

Abstract

Der Name Trigoboard steht für ein neues Bausystem mit vielen positiven Eigenschaften. Um mit einem neuen Wand- und Deckensystem zu bauen, benötigt der Planer statische Angaben. Das Ziel dieser Arbeit ist, erste Bemessungswerte für den Einsatz in vertikalen Aussenwänden aufzuzeigen. Studenten an der HSB in Biel haben als mögliche Beanspruchungen die aussteifende Wirkung und das Knickverhalten eines Trigoboard-Elementes getestet. Obwohl aus diesen Vorversuchen die Bemessungswerte nur mit grossen Sicherheiten abgeleitet sind, liegen die Werte auf erstaunlich hohem Niveau.

Im Quervergleich mit anderen Systemen sind die vertikalen Windlasten, welche ein Trigoboard-Element mit einer Breite von einem Meter aufnimmt, mit 18.7 kN überdurchschnittlich hoch. Mit der Interaktion einer vertikalen Normalkraft wäre die aussteifende Wirkung noch besser. Dieser Versuchsaufbau ist jedoch an der HSB zur Zeit noch nicht möglich. Auf Empfehlung der Verfasser sind solche Versuche noch nachzuholen. Die Versuche haben gezeigt, dass von einem Wandelement mit einer Entlastungsnut im Zentrum des Trigoboards abzusehen ist. Des weiteren wurde das Schubmodul der Wandelemente, bezüglich den Einwirkungen aus Wind und Stabilisierungskräften, ermittelt.

Die zweite Untersuchung befasste sich mit dem Bruchverhalten in vertikaler Richtung. Die Knickversuche haben ergeben, dass der geschossspezifische Aufbau dem System Trigoboard gerecht wird. Der Einfluss der gerade oberhalb liegenden Decke muss bei zukünftigen Projekten berücksichtigt werden, denn die zulässigen Lasten können dadurch bis zu 70 % höher liegen. Deshalb wird es in Zukunft möglich sein, bei durchschnittlichen Deckenaufbauten (Auflagerlast der Decke = 24 kN/m¹) bis zu achtgeschossige Häuser mit dem Bausystem Trigoboard zu bauen. Hier wird vielmehr der Brandschutz Grenzen setzen als die statische Tragfähigkeit. Da das Bestimmen der Bemessungswerte aus den vorliegenden Ergebnissen einen überdurchschnittlich grossen Sicherheitsfaktor bei der Umrechnung der Bruchwerte verlangt. Für den Planer ist aus den Versuchsergebnissen eine Wertetabelle und ein Nachweisverfahren, aufbauend auf theoretischen Berechnungsmodellen, entstanden.

Die Verfasser empfehlen den Initianten für beide Beanspruchungsarten, umfassende Versuche, welche auf den Erfahrungen dieser Vorversuche aufbauen, die bis jetzt gewonnenen Erkenntnisse zusätzlich bestätigen zu lassen.

Um die Arbeit abzurunden behandelt das letzte Kapitel dieser Arbeit verkaufstechnische Aspekte. Dank einem umfangreichen Schlagwörterkatalog mit Vor- und Nachteilen des Trigoboards, können die Erfinder das Marketing auf vier Verkaufsargumenten aufbauen.

Die Zukunft wird's zeigen, in wie fern die Entscheidungsträger des schweizerischen Baumarktes, die Vorteile des Bausystems Trigoboard auszunutzen wissen. Als Aussenwandelement ist das Trigoboard, zumindest aus der Sicht der Statik, der Konkurrenz mindestens ebenbürtig.

Vorwort

Im 8. Semester zum Ingenieur FH, an der Hochschule für Architektur, Bau und Holz (HSB) in Biel, führen die Studenten im Rahmen des Studiums eine Projektarbeit durch. Diese hat zum Ziel, in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner, das theoretische und praktische Wissen anzuwenden und weiter zu entwickeln.

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit dem Untersuchen und Analysieren der Trigoboard-Elemente auf horizontale Stabilität (Schubfluss der Aussteifung) und Knicken.

An dieser Stelle danken wir den Initianten des Trigoboards, Herr Joe Dober und Herr Josef Ehrler, dass wir die Möglichkeit hatten, diese interessante und aufschlussreiche Arbeit durchzuführen. Insbesondere danken wir unseren betreuenden Dozenten, Herr Dr. Andreas Hurst und Herr Dr. Maurice Brunner, welche stets Zeit für die Beantwortung der offenen Fragen hatten.

Einen weiteren Dank geht an Herr Peter Makiol, vom Büro Makiol und Wiederkehr. Durch seine hilfreichen Tipps und Anregungen konnten wir einige Verbesserungen anbringen.

Als letztes danken wir den Herr Schnüriger und Herr Roder, ohne den beiden Mitarbeiter der HSB hätten die Versuche im Labor nicht durchgeführt werden können.

Des weitem bedanken wir uns bei allen Personen, die uns während dieser Zeit begleitet und unterstützt haben.

Biel, den 17.6.2005

Reinhard Markus
Rüdisühli Martin

Impressum

Verfasser:

Reinhard Markus
Grund
CH-3474 Rüedisbach

Rüdisühli Martin
Spidach
Postfach 509
LI-9491 Ruggell

Industriepartner:

Dober Joe
Chliarni-Trotte
CH-6403 Küssnacht am Rigi

Ehrler Josef
Robmatt
CH-6344 Meierskappel



Makiol und Wiederkehr
Peter Makiol
Industriestrasse 9
CH-5712 Beinwil am See

Betreuer:

Dr. Brunner Maurice
Dozent für Baustatik

Dr. Andreas Hurst
Bereichsleiter FH

Hochschule für Architektur Bau und Holz HSB
Fachbereich Holz
Solothurnstrasse 102
CH-2504 Biel-Bienne

1. Inhaltsangabe

1. Inhaltsangabe	4
2. Einleitung	6
2.1 Vorwort	6
2.2 Problemstellung	6
2.3 Abgrenzungen	6
2.4 Ziele der Arbeit	6
2.5 Vorgehen	6
3. Bestehende Ergebnisse	7
3.1 Vorbemerkungen	7
3.2 Marktchancen	7
3.3 Klimaversuche	8
3.4 Biegefestigkeitsversuche	8
4. Schubflussversuche	9
4.1 Einleitung	9
4.1.1 Abgrenzungen	9
4.1.2 Ziel des Schubflussversuches	9
4.1.3 Methodik	9
4.2 Versuche	10
4.2.1 Probenbeschreibung	10
4.2.2 Versuchsaufbau	11
4.2.3 Messgeräte	12
4.2.4 Einflussfaktoren	13
4.2.5 Statische Vorberechnungen	13
4.2.6 Versuchsablauf	14
4.2.7 Ergebnisse	15
4.2.8 Interpretation der Ergebnisse	22
4.3 Bemessung der Wandelemente	26
4.4 Fazit	27
4.4.1 Optimierungsvorschläge	27
5. Knickversuche	29
5.1 Einleitung	29
5.1.1 Abgrenzungen	29
5.1.2 Ziel des Knickversuches	29
5.1.3 Methodik	29
5.2 Versuche	31
5.2.1 Probenbeschreibung	31
5.2.2 Versuchsaufbau	32
5.2.3 Messgeräte	35
5.2.4 Einflussfaktoren	35
5.2.5 Statische Vorberechnungen	36
5.2.6 Ergebnisse	37
5.2.7 Interpretation der Ergebnisse	43
5.3 Berechnungsmodelle	52
5.3.1 Modell 1	52
5.3.2 Modell 2	52
5.3.3 Modell 3	53

5.3.4	Modell 4.....	54
5.3.5	Schlussfolgerungen.....	55
5.4	Bemessungstabelle.....	56
5.4.1	Tabelle basierend auf den Versuchsergebnissen	56
5.4.2	Berechnungsverfahren nach Modell 3+4.....	57
5.4.3	Vereinfachter Nachweis	59
5.5	Fazit	61
5.5.1	Allgemein	61
5.5.2	Optimierungsvorschläge	61
6.	Marketing- und Verkaufsschlagwörter	62
6.1	Einleitung	62
6.1.1	Ziele der Schlagwörter	62
6.1.2	Methodik.....	62
6.2	Analyse der Schlagwörter	62
6.2.1	Positives.....	62
6.2.2	Negatives	63
6.2.3	Marketing- und Verkaufsargumente	64
7.	Schlussfolgerungen	65
7.1	Nutzen der Arbeit	65
7.2	Rückblick und Ausblick.....	65
8.	Verzeichnisse	66
8.1	Abbildungsverzeichnis.....	66
8.2	Literaturverzeichnis	67
9.	Zwingende Formen.....	68

2. Einleitung

2.1 Vorwort

Im Rahmen des 8. Semesters an der Fachhochschule HSB in Biel, erhalten die Studenten die Möglichkeit, ihre theoretischen und praktischen Fachkenntnisse anzuwenden und zu vertiefen.

Ziel dieser Arbeit ist die Unterstützung der Entwicklung des Trigoboard. Die Arbeit ist dabei in drei Abschnitte aufgeteilt:

1. Aufführen bestehender Ergebnisse
2. Untersuchung der Wandelemente auf Knicken und Schub (Stabilität)
3. Schlagwortsuche für Marketing und Verkauf

Die betreuenden Dozenten Herr Dr. Andreas Hurst und Herr Dr. Maurice Brunner sowie die Industriepartner Herr Joe Dober und Herr Josef Ehrler unterstützten und begleiteten die Studenten während der Arbeit. Vom Ingenieurbüro Makiol und Wiederkehr hat Herr Peter Makiol einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

2.2 Problemstellung

Die Rippenplatte wurde bereits bei einigen Projekten eingesetzt. Für die Erstellung eines Bauteilekataloges müssen die Trigoboard-Elemente bauphysikalisch und statisch geprüft werden. Diese Semesterarbeit untersucht das Knick- sowie das Schubverhalten der Wandelemente.

Für ein junges, innovatives Produkt im Markt ist es wichtig und interessant, einige Schlagwörter für die Vermarktung des Produktes zu finden. Auch dieser Aufgabe wird die Arbeit gerecht.

2.3 Abgrenzungen

Die Projektarbeit führt bestehende Ergebnisse auf, untersucht das Tragverhalten der Wandelemente und zeigt einige stichhaltige Verkaufsargumente auf. Am Schluss werden den Initianten einige Verbesserungsvorschläge bezüglich Verarbeitung des Produktes aufgezeigt.

Es ist zu beachten, dass die gemachten Versuche nur Vorversuchreihen sind. Für genaue statische Werte sind weitere umfangreichere Untersuchungen durchzuführen.

Bei Abweichung zu den abgesteckten Rahmenbedingungen, sind besondere Überlegungen anzustellen.

2.4 Ziele der Arbeit

Aus der Sicht der Initianten ist die Bestimmung des Tragverhaltens bezüglich Knicken und Schub (Stabilität) sehr wichtig. Neben den gewonnenen Werten soll für den Schub das Elastizitätsmodul ermittelt werden. Fürs Knicken wird eine Bemessungstabelle erstellt. Diese Resultate dienen als Grundlage für die Bemessung sowie weiterführenden Untersuchungen.

Durch die Suche nach geeigneten Schlagwörtern will man sicherstellen, dass beim Vermarkten und Verkauf, Argumente eingesetzt werden, welche das Trigoboard von anderen Produkten auf dem Markt abhebt.

2.5 Vorgehen

Der Aufbau der Arbeit, ist an verschiedene Punkte gegliedert. Als erstes wird die Vorstatik erstellt. So kann man abschätzen, welche Kräfte bei den Versuchen zu

erwarten sind. Nach der Statik muss man sich Gedanken zum Versuchsaufbau machen. Dabei gilt, mit der einfachsten Versuchsanordnung das best mögliche Ergebnis zu erzielen. Ist man so weit, können die Versuche durchgeführt werden. Am Schluss werden die erhaltenen Resultate ausgewertet. Dabei stellt sich immer die Frage, welchen Sicherheitsfaktor setzt man an, um auf die Bemessungs-Werte zu kommen.

Nach Absprache mit Herr Dr. Balz Gfeller kam man zum Entschluss, dass die Werte mit dem Faktor 2.67 dividiert werden, um auf das Designniveau zu kommen.

$$2.67 = \frac{1.5}{4}$$

Das Dividieren durch vier führt zu den zulässigen Werten nach alter Norm SIA 164. Mit dem Faktor 1.5 werden diese Werte auf das Designniveau gehoben.

3. Bestehende Ergebnisse

3.1 Vorbemerkungen

Die bestehenden Ergebnisse wurden durch Marc-André Herzog und Stephan Wettstein im Rahmen einer Semesterarbeit ermittelt. Die Versuche und Auswertung der Resultate wurden an der HSB (Hochschule für Architektur, Bau und Holz) in Biel durchgeführt.

Der Bericht ist an der Schule HSB oder bei den Industriepartnern erhältlich. Für einen Einblick in die Arbeit müssen beiden Parteien (HSB und Industriepartner) einverstanden sein. Die Adressen sind im Impressum aufgeführt.

Nachfolgend noch die wichtigsten Angaben:

Nr.-Projektarbeit	F/4/P/478/05/0
Thema	Trigoboard
Name Studierende	Marc-André Herzog, Stephan Wettstein
Betreuende Dozenten	Weber Heinz, Brunner Maurice
Kurs	XVII
Semester	Wintersemester 04/05

3.2 Marktchancen

Es wurde eine Befragung der Studenten durchgeführt, um festzustellen, ob das Trigoboard Marktpotenzial hat. Die Befragung kann im Anhang ab Seite 15, in der oben erwähnten Arbeit, nachgelesen werden.

Ergebnisse

Die Auswertung der Marktanalyse zeigt, dass Marktchancen für das System Trigoboard bestehen. Für die Initianten des Systems gilt es, die Erkenntnisse aus der Marktanalyse bei ihrem weiteren Vorgehen zu berücksichtigen. Die Hauptkonkurrenten müssen laufend beobachtet werden. Weiter muss man den Holzbauern, die für sie wichtigen Vorteile klar kommunizieren.

Die Umfrage wurde an Studenten durchgeführt und ist somit nicht so repräsentativ. Es wird darauf hingewiesen, dass es interessant wäre, den gleichen Fragebogen einer Gruppe von Architekten zu geben, um Abweichungen zu den Holzbauer/Ingenieuren festzustellen.

Empfehlungen

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen, wird dem Trigoboard-Team empfohlen ein detailliertes Kommunikations-Konzept zu entwickeln. Sehr effizient ist ein gezieltes Event-Marketing an laufenden Projekten. So kann sich der potentielle Kunde ein gutes Bild vom System und dessen Vorteile machen.

In einer weiteren Phase sollen Architekten, Holzbauer und Bauherren auf ihre Zufriedenheit und eventuelle Verbesserungsvorschläge befragt werden.

3.3 Klimaversuche

Allgemeines Fazit

Man stellte fest, dass die Bewegungen in der Vertikalen (die vertikale Längenänderung und die vertikale Krümmung) bei allen Klimaversuchen vernachlässigt werden können. Grund dafür ist das geringe Schwundmass von Massivholz in Faserlängsrichtung.

Es wurde festgestellt, dass bei den Gleich- und Differenzklimaversuchen, ohne Entlastungsnut eine markant grössere Längenänderung vorherrscht. Auf der anderen Seite wirken sich die Entlastungsnuten bei den Gleich-, Differenz- und Bestrahlungsversuchen negativ auf die diagonale Verwindung der Elemente aus.

Wegen der grossen horizontalen Längenänderung wird empfohlen, pro 1000mm Elementbreite, eine Entlastungsnut von mindestens 4mm Breite vorzusehen.

Empfehlungen

Die Rippen bilden die Verbindung zur Beplankung, deshalb sollen sie sich bei einer Verformungen möglichst gleichmässig bewegen, um die Beplankung nicht zu beeinträchtigen. Bei weiterführenden Versuchen könnte es deshalb interessant sein, die Bewegungen der Rippen zu messen.

3.4 Biegefestigkeitsversuche

Optimierungsvorschläge

Bei der Sortierung der Holzqualität sollte darauf geachtet werden, dass grosse Äste sich nicht an bruchgefährdeten Stellen befinden (in der Mitte der Träger).

Bei den Versuchen wurden vereinzelt Leimbrüche festgestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass eine hohe und vor allem gleichmässige Leimfugenqualität nötig ist.

Für die Schubspannung und die Querkräfte ist die Lage der Löcher mitentscheidend. Deshalb wird empfohlen, falls möglich, Löcher nur in der Mitte des Trägers anzubringen. So kann die Festigkeit des Trägers erhöht werden. Die Festigkeit kann auch durch das Einbringen von Schrauben (Befestigungssystem SFS) bei den Löchern verbessert werden.

Empfehlungen

Um statisch signifikante Aussagen über die Tragelemente ohne Löcher machen zu könne, müssten noch weitere Versuche durchgeführt werden. Im Speziellen bei den Elementen mit dem Steg nach unten. Hier liegen die Bruchlasten sehr weit auseinander.

4. Schubflussversuche

Im Rahmen der Produktentwicklung haben die Initianten des Trigoboard eine Vorversuchsreihe ausgearbeitet. Dabei werden die Trigoboard Wandelemente auf ihre Festigkeit überprüft.

4.1 Einleitung

4.1.1 Abgrenzungen

Die Prüfungen untersuchen nur die horizontale Krafteinleitung (Bsp. aus Wind/Stabilisierungskräfte) auf die Wandelemente. Der Grund liegt in der Versuchsanordnung, da mit dem vorhandenen Prüfgerät nicht gleichzeitig eine vertikale und horizontale Kraft simuliert werden kann.

4.1.2 Ziel des Schubflussversuches

Das Ziel des Schubflussversuches ist es, die Stabilität der Wände zu ermitteln. Man will wissen, wie viel horizontale Kraft auf die Wand aufgebracht werden darf (vgl. Abb. 1).

Die erhaltenen Ergebnisse sollen als erste Richtwerte dienen. Es ist zu beachten, dass dies nur eine Vorversuchsreihe ist und die Resultate infolge der geringen Probenanzahl nicht repräsentativ sind. Das heisst, dass die Designwerte nur mit einem erhöhten Sicherheitsfaktor ermittelt werden können. Er berücksichtigt, dass (trotz der grossen Streuung) die Sicherheit für die Bemessung dennoch gegeben ist und hat die Grösse von 2.67. Durch dividieren der Resultate mit diesem Faktor, erhält man die Design-Werte.

Die Wände werden auf die Deformation und maximale Bruchkraft untersucht. Dabei unterscheidet man Prüfkörper mit oder ohne Entlastungsnut (Abb. 1, mit Entlastungsnut in der Mitte der Platte).

4.1.3 Methodik

Bevor man die eigentlichen Versuche durchführt, musste man sich einige Gedanken zum Versuchsaufbau und den zu erwartenden Kräften machen. Er wird nach der DIN EN 594 durchgeführt.

Der Versuchsaufbau wurde eingehend mit den Dozenten und Benutzern des Maschinenparks besprochen. Das Ergebnis ist die gleichzeitige Prüfung zweier Elemente (vgl. Abb. 2). Dies ist die einzige Möglichkeit die horizontale Kraft auf die Wandelemente zu simulieren. Hat jedoch zwei Nachteile:

1. Aus zwei Proben kann nur ein Ergebnis ermittelt werden.
2. Die Kraft aus den oberen Stockwerken, welche die Wand zusätzlich gegen Schubverformungen stabilisiert, kann man nicht simulieren.

Die Resultate hält man auf Computer, Fotos und Videokameras fest. Diese werden ausgewertet und beurteilt. Die Fotos und das Video geben Aufschluss über die Versagensart. So können Verbesserungsvorschläge gemacht und das Produkt weiterentwickelt werden.

4.2 Versuche

4.2.1 Probenbeschreibung

Die Trigoboard-Wände aus Tannen- und Fichtenholz sind in der Holzqualität C24 gefertigt. Dies entspricht dem üblichen Bauholz.

Die Proben haben eine Abmessung von 2500×1000 mm (vgl. Abb. 1). Sie besitzen fünf Rippen, davon zwei End- und drei Mittelrippen. Die Rippen sind auf einem 27 mm starken Rücken aufgeleimt. Es gibt zwei verschiedene Rückentypen. Einer ohne und einer mit Entlastungsnut (vgl. Abb. 1). Die Entlastungsnut befindet sich in der Mitte des Rückens und ist 4 mm breit.

Somit ist die Versuchsreihe für die Schubflussprüfung in zwei Serien unterteilt. Die erste Serie beinhaltet die Trigoboard-Elemente ohne Entlastungsnut, die zweite diejenigen mit Entlastungsnut.

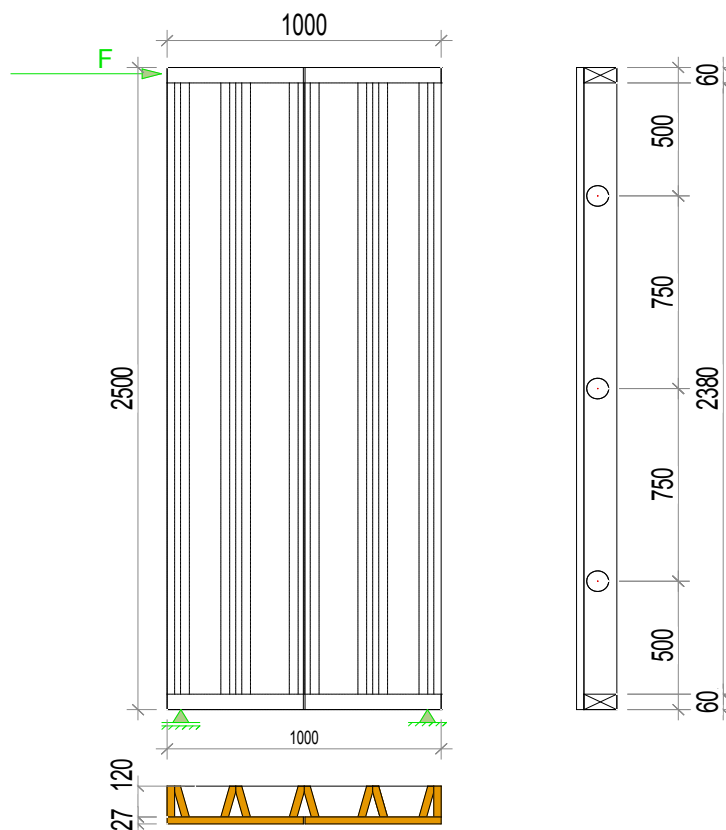


Abb. 1: Schubflussprobe mit Entlastungsnut

Die Trigoboard-Elemente welche für die Prüfung verwendet wurden, hatten im Bereich der belasteten Ränder eine Verstärkung in Form eines Vollholzes bekommen (vgl. Abb. 4). Der Grund dieser Verstärkung liegt im Versuchsaufbau. Da zwei Trigoboard-Elemente miteinander verbunden werden mussten, erhielt man eine Art „Biegebalken“. Dieser Biegebalken überträgt in Balkenmitte hauptsächlich Zug- und Druckkräfte. Die Druckkraft wird dabei über das Holz direkt abgetragen. Die Zugkraft ist mit einem Blech, welches unten angebracht wurde (vgl. Abb. 3), übertragen worden. Damit dies möglich war, mussten Randverstärkungen angebracht werden.

4.2.2 Versuchsaufbau

Es werden jeweils zwei Prüfkörper zu einem „Biegeträger“ zusammengeschlossen. Im Zugbereich wird der Zusammenschluss über eine Schrauben-Blechverbindung erreicht (vgl. Abb. 3). Die Druckkraft wird über Kontaktpressung mit Holz auf Holz übertragen. Damit der Träger in der Mitte gegen seitliches Ausknicken gehalten ist, werden Eisenwinkel angebracht (vgl. Abb. 2).



Abb. 2: Versuchsaufbau Schubfluss



Abb. 3: Ausbildung der Zugverbindung

Der Zylinder leitet die Kraft in der Mitte des „Biegeträgers“ ein. Die aufgebrachte Einwirkung entspricht der doppelten zu erwartenden Kraft, weil der Versuch ja mit zwei Elementen gemacht wird. Diese Kraft wurde anhand einer statischen Vorberechnung ermittelt (vgl. Anhang und Kapitel 4.2.5).

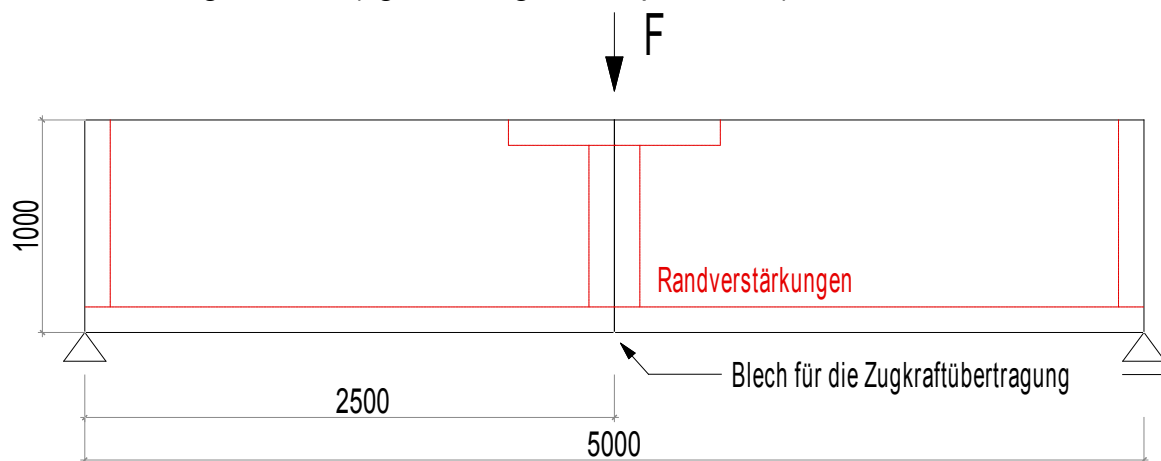


Abb. 4: Versuchsaufbau

4.2.3 Messgeräte

Prüfgerät (Kraft)

Die Versuche wurden auf dem grossen Prüfrahm (vgl. Abb. 5) der HSB in Biel durchgeführt.

Der Prüfrahm ist mit Zylindern sowie der Software von „Walter + Bai“ ausgestattet. Beim Prüfrahm hat man die Möglichkeit, die Kräfte und Verschiebungen, welche vom Zylinder ausgehen zu messen.

Diese Messung ist jedoch problematisch, da sich der ganze Prüfrahm leicht verschiebt. Aus diesem Grunde hat man die Verschiebungen mit einer unabhängigen Messeinrichtung aufgezeichnet.

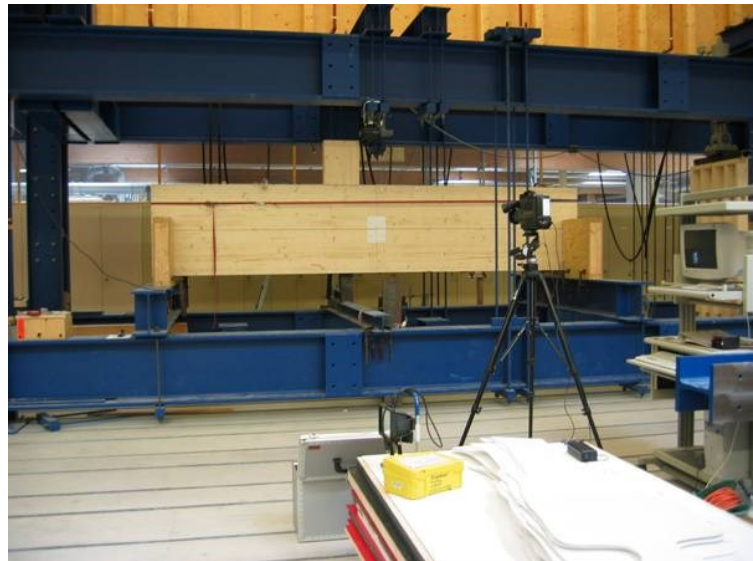


Abb. 5: Messgerät „Videokamera“

Videokamera (Punktemessung)

Die Punktemessung wurde mit einer Sony-Videokamera und dem „Dotmeasurement for Windows“ Software-Programm durchgeführt. Die Kamera kann die Verschiebungen in horizontaler als auch in vertikaler Richtung messen. Dabei kann die Anzahl der Messpunkte variieren. Bei den Prüfkörper ohne Entlastungsnut wurden zwei Messpunkte eingesetzt, bei denjenigen mit Entlastungsnut vier (vgl. Abb. 6). Die Messpunkte (MP) sind von links oben, nach rechts unten durchnummeriert.



Abb. 6: Messpunkte
"Videokamera"

Videokamera (Film)

Für die Aufnahme des Films wurde die JVC „F1.2 Super Bright“ verwendet. Mit der Hilfe der Filme, erhofft man sich, den Ausgangspunkt und die Art des Bruches leichter ermittelt zu können.

Digitalkamera (Foto)

Für das Abbilden der Fotos wurde die Digitalkamera CANON „PowerShot S45“ verwendet. Die Bilder dienen für das Visualisieren und Interpretieren der Ergebnisse.

4.2.4 Einflussfaktoren

Rohdichte	Mit zunehmender Rohdichte steigt die Biegefestigkeit ¹ .
Faser-Lastwinkel	Eine Vergrösserung des Faser-Last-Winkels bewirkt eine Abnahme der Biegefestigkeit.
Äste/Risse	Äste verursachen einen starken Abfall der Biegefestigkeit. Sie können jedoch einen positiven Einfluss auf die Schubspannung haben.
Feuchtegehalt	Eine Erhöhung des Feuchtegehaltes bewirkt eine erhebliche Reduktion der Biegefestigkeit. Bei Zunahme der Feuchtigkeit um jeweils 1% reduziert sich die Biegefestigkeit um 4%.
Leimfuge	Bei einer schlechten Verleimung der Leimfuge, kann diese als Erste versagen. Die Leimfuge sollte immer besser als das Holz sein.

4.2.5 Statische Vorberechnungen

Bevor man die Versuche durchführt, muss die Bruchlast ermittelt werden. Diese wird benötigt, damit die Prüfung durchgeführt werden kann. Denn bei Beginn der Prüfung muss die zu erwartende Last F_{est} eingegeben werden, weil die DIN EN 594 sich bei ihrem Prüfablauf auf die Bruchlast stützt.

Weil das statische Modell nicht ganz klar war, wurde die maximale Kraft auf zwei Arten berechnet.

Für die erste Variante wurde das Trigoboard-Element als Kragarm betrachtet. Die zu erwartende Kraft F_{est} erzeugt Biege- und Schubspannungen. Das maximale Moment ist das Produkt aus F_{est} und der Plattenhöhe von 2.5 m. Für das Widerstandsmoment W wurden nur die Abmessungen der Rückwandplatte berücksichtigt. Beim Schubnachweis kann einfach die Kraft F_{est} als Querkraft übernommen werden. Mit der "Bisquit"-Formel konnte die Schubspannung ermittelt werden und mit der Bruchspannung verglichen werden. Die Bruchkraft F_{est} erhält man, indem der Designwert mit dem Faktor 2.27 multipliziert wird. Dieser Umrechnungsfaktor wurde der Vorgängerarbeit zum Thema Trigoboard entnommen und setzt sich aus folgender Formel zusammen:

$$1.7 * \frac{3}{2.25} = 2.27$$

Der Faktor 1.7 rechnet die Designwerte auf charakteristische Spannungen um. Die beiden anderen Faktoren ermöglichen das Bestimmen der Mittleren Bruchkraft für Kantholz. Schlussendlich ergibt sich eine Bruchspannung von 32 N/mm² für Biegung und 3.4 N/mm² für Schub.

Die zweite Variante betrachtet das Element mit der Fachwerksanalyse, gemäss DIN 1052 Seite 104/105. Die Kraft F_{est} erzeugt in der Zugdiagonale ein Gemisch aus

¹ Da die Prüfkörper wie ein Biegeträger getestet werden, sind die Einflüsse auf die Biegefestigkeit zu berücksichtigen.

Zugspannungen senkrecht und parallel zur Faserrichtung. Als Mitwirkende Breite wurde $b_z = 0.42 \text{ m}$ angenommen. Die Design-Zugspannungen wurden mit dem Faserlastwinkel von 68.2° nach der Formel 9 aus SIA 265 ausgerechnet und mit Faktor 2.27 auf Bruchniveau erhöht. Da durch den tiefen Wert von Zug senkrecht die zulässige Bruchspannung mit 1.55 N/mm^2 überdurchschnittlich schlecht sind, ist auch ein unrealistisch tiefer Wert für $F_{\text{est}} = 6.5 \text{ kN}$ entstanden. Als weitere Berechnungsvorgänge wurden noch der Anschluss der Zugdiagonale an die Rippen und die Drucknachweise in vertikaler und senkrechter Richtung geführt. Hier kommt man auf wesentlich bessere Werte. Leider ist aber die Kraft von 6.5 kN massgebend. Verglichen mit der Berechnungsvariante 1 hat man mit diesem DIN-Nachweis wesentlich schlechtere und auch unrealistischere Werte erhalten. Deshalb wird die Kraft aus der ersten Berechnung weiterverwendet.

Analog zur Berechnungsvariante 1 wurde F_{est} auch für die Probekörper mit Nut der Bruchwert berechnet. Hier ist die Rückwandplatte als zwei unabhängige Kragarmplatten anzusehen. Es wurden wieder die Biege- und Schubspannungen überprüft. Wenn man die Verbindung der beiden Platten über die Rippen vernachlässigt, erhält man für $F_{\text{est}} 28.8 \text{ kN}$.

Ganz am Schluss sind noch die Verformungen bei Bruch berechnet worden. Für die Elemente ohne Nut liegt die Verformung bei 25 mm und für mit Nut bei 62 mm .

4.2.6 Versuchsablauf

Der Versuch wurde nach der DIN EN 594 durchgeführt. Diese Norm schreibt vor, dass die Versuche über mehrere Belastungsebenen mit zwischenzeitlicher Entlastung und abschliessender Belastung bis zum Bruch durchgeführt werden müssen. In der Abb. 7 sind die verschiedenen Zyklen aufgeführt. Beim ersten Zyklus wird eine Belastung von 10% der erwarteten Bruchlast aufgebracht und danach wieder entlastet. Der zweite Zyklus schreibt eine Belastung von 40 % vor bevor dann wieder entlastet wird. Der dritte Zyklus läuft wieder auf 40% hoch, bleibt eine Zeit auf diesem Niveau bestehen und läuft anschliessend durch bis zum Bruch.

Weitere Informationen können aus der oben beschriebenen Norm entnommen werden.

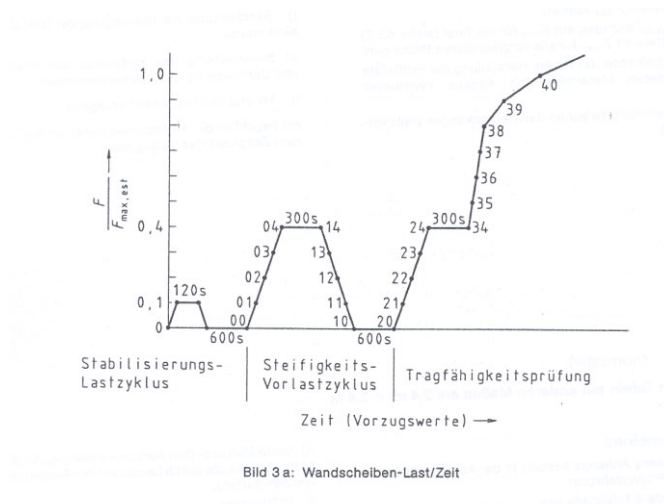


Abb. 7: Grafik Versuchsablauf

4.2.7 Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle wird ein Überblick über die gemachten Schubflussversuche mit den entsprechenden Nummern gegeben.

Tabelle 1: Überblick Schubflussversuche

Schubflussversuch-Nr.	Entlastungsnut	
	mit	ohne
1		X
2		X
3		X
4	X	
5	X	
6	X	

Ermittlung des Schubmoduls

Das Schubmodul wurde anhand der Arbeitsgleichung ermittelt, wobei die Formel nach GA^* aufgelöst wurde. Als massgebendes Element wurde die Steigung w/F aus den Ergebnissen (Kraft-Weg-Diagrammen) berechnet. Dabei hat man den obersten und untersten Punkt aus der Steigung des zweiten Zyklus genommen (vgl. Tabelle 3; F_1 , F_2 , w_1 , w_2). Anhand dieser Werte wurde die oben genannte Steigung ermittelt. Die restlichen Angaben der Berechnung befinden sich im Anhang.

Bei der Berechnung hat man auch noch die Auswirkungen verschiedener E-Moduli untersucht. Diese sind in der Tabelle 2 aufgeführt

Tabelle 2: Die verschiedenen E-Moduli

E-Modul 1	9 kN/mm ²
E-Modul 2	10 kN/mm ²
E-Modul 3	11 kN/mm ²
E-Modul 4	12 kN/mm ²

Tabelle 3: Steigung w/F

Nr	F			w			w/f
	F_1	F_2	F_{eff}	w_1	w_2	w_{eff}	
1	2.0	44.0	42.0	1.0	7.0	6.0	0.1429
2	2.0	44.0	42.0	1.2	7.0	5.8	0.1381
3	1.0	48.0	47.0	1.0	7.5	6.5	0.1383

Nach Information der Initianten, wird die neuste Generation der Trigoboard-Elemente ohne Entlastungsnuten hergestellt. Aus diesem Grund können die Untersuchungen der Schubmodule für die Probekörper mit Entlastungsnuten (Nr.4-6) weggelassen werden.

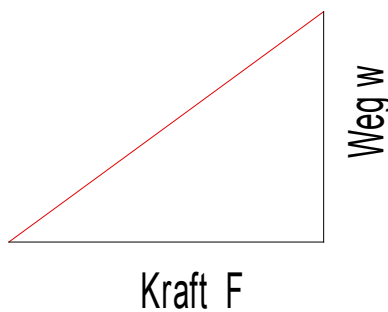


Abb. 8: Steigung w/F

Arbeitsgleichung

$$w = \sum c \cdot V \cdot \bar{V} \cdot \frac{l}{G \cdot A^*} + \sum c \cdot M \cdot \bar{M} \cdot \frac{l}{E \cdot I} = \sum c \cdot \frac{F}{2} \cdot \frac{\bar{F}}{2} \cdot \frac{l}{G \cdot A^*} + \sum c \cdot \frac{F \cdot l}{4} \cdot \frac{\bar{F} \cdot l}{4} \cdot \frac{l}{E \cdot I}$$

Ermittlung des G-Moduls

$$GA^* = \frac{\frac{l}{4}}{\frac{w}{F} - \frac{l^3}{48 \cdot EI}} \rightarrow G = \frac{GA^*}{A^*}$$

- A* Variante 1 = nur die 5/6 der Fläche des Rückens
 Variante 2 = 5/6 der Fläche inklusive Rippen (abzüglich der Löcher)

Diejenige Variante, welche näher am G-Modul von C24 nach der Norm SIA 265 liegt ($G = 500 \text{ N/mm}^2$), kommt zum tragen. Man kann so erkennen, wie die Kraft durch das Trigoboard-Element fließt. Stimmt z. Beispiel die Variante 1 besser überein, wird die Kraft hauptsächlich über den Rücken abgetragen:

- Variante 1: Kraft wird nur über die Rückenplatte abgetragen
 Variante 2: Kraft wird über die Rückenplatte und die Rippen abgetragen

Wandelemente ohne Entlastungsnut (Nr. 1-3)

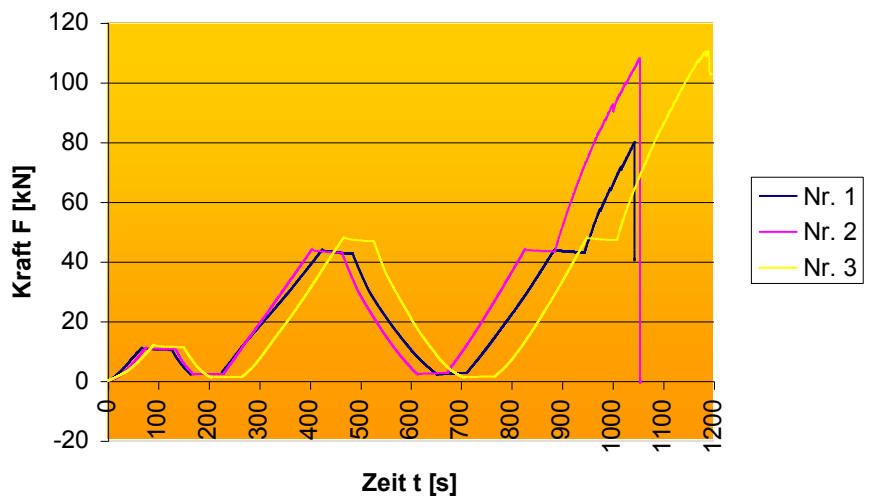


Abb. 9: Kraft-Zeit-Diagramm, Schubfluss ohne Nut

In Abb. 9 kann man erkennen, je flacher die Kurve am Anfang ist, desto mehr Schlupf hatten die verschiedenen Probekörper. Interessanterweise, haben alle Versuchskörper ungefähr die gleiche Steifigkeit, da die Neigung der Kurven im 2. und 3. Zyklus identisch sind.

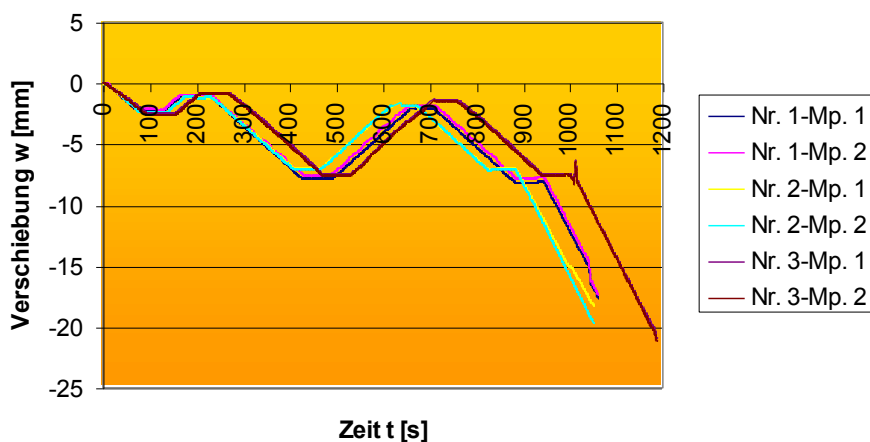


Abb. 10: Weg-Zeit-Diagramm, Schubfluss ohne Nut

Die Verzögerung der in Abb. 10 aufgeführten Nr.3 hat mit der Eingabe der maximal erwarteten Belastung zu tun. Die Nr. 3 wurde als erstes getestet, dabei hat man die maximale Kraft leicht höher angesetzt. Da die Werte prozentual von der maximalen Bruchlast abhängig sind, dauerte es ein wenig länger bis die 10 bzw. 40% erreicht wurden.

In der Abb. 11 ist die Kraft in Abhängigkeit zum Weg aufgeführt. Ist die Kurve am Anfang sehr flach, dann bedeutet dies das Schlupf vorhanden war. Weiter kann man aus der Abbildung die elastischen sowie die plastischen Deformationen erkennen.

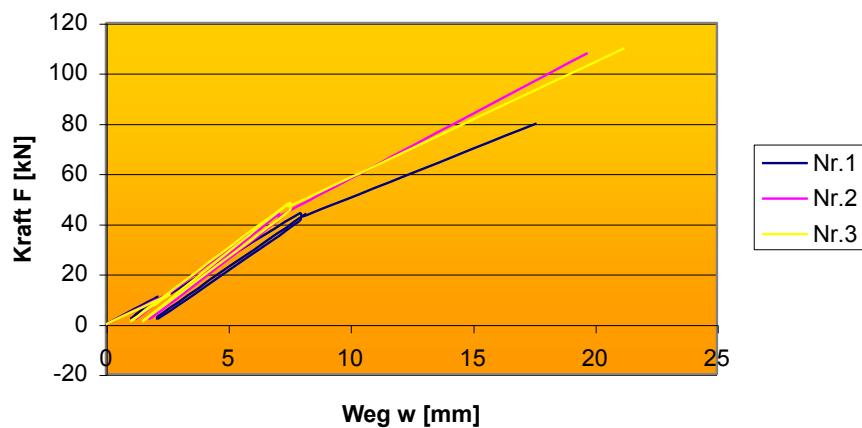


Abb. 11: Kraft-Weg-Diagramm, Schubfluss ohne Nut

Statische Werte

Die Werte aus den Versuchen wurden wie oben beschreiben mit dem Faktor 2.67 abgemindert. Daraus resultierten dann die Werte auf Designniveau F_d . Natürlich sind die Versuchswerte durch zwei geteilt worden, weil ja immer zwei Probekörper miteinander getestet wurden.

Tabelle 4: Statischen Werte, ohne Nut

Probennummer	F max [kN]	w max [mm]	F_d [kN] ²	
Nr.1	80	17.6	15.0	18.7
Nr.2	108	19.7	20.3	
Nr.3	110	21.2	20.7	

Schubmodul

Die Schubmodule sind wie oben beschrieben ermittelt worden. Dabei wurden verschiedene E-Moduli angesetzt. Aus den Ergebnissen der Tabelle 5 bis Tabelle 7 ist klar ersichtlich, dass die Variante 2 die realistischere ist, weil dort die ausgerechneten Schubmoduli näher an 500 N/mm^2 liegen. Dies bedeutet, dass die Kraft über den Rücken und die Rippen abgetragen wird.

Nr. 1:

Tabelle 5: Schubmodul Nr.1

	GA* [kN]	G [N/mm ²]	
		A* (Var.1)	A* (Var.2)
mit E-Modul E1	21030.75	934.70	671.12
mit E-Modul E2	18442.34	819.66	588.52
mit E-Modul E3	16755.11	744.67	534.68
mit E-Modul E4	15568.20	691.92	496.80

² Sicherheitsfaktor für die Berechnung der 5%-Fraktile = 2.67 (vgl. Begründung, 4.1.2)

Nr. 2:

Tabelle 6: Schubmodul Nr.2

	GA* [kN]	G [N/mm ²]	
		A* (Var.1)	A* (Var.2)
mit E-Modul E1	22862.42	1016.11	729.57
mit E-Modul E2	19835.94	881.60	632.99
mit E-Modul E3	17897.48	795.44	571.13
mit E-Modul E4	16549.72	735.54	528.12

Nr. 3:

Tabelle 7: Schubmodul Nr. 3

	GA* [kN]	G [N/mm ²]	
		A* (Var.1)	A* (Var.2)
mit E-Modul E1	22778.00	1012.36	726.87
mit E-Modul E2	19772.36	878.77	630.96
mit E-Modul E3	17845.71	793.14	569.48
mit E-Modul E4	16505.44	733.58	526.71

Statistik

Tabelle 8: Statistik, ohne Nut

Kriterium	F max	w max	Fd
Mittelwert x	99.3 kN	19.5 mm	18.7 kN
Standardabweichung s	16.8 kN	1.8 mm	3.2 kN
Variationskoeffizient v	16.9 %	9.3 %	16.9 %

Wandelemente mit Entlastungsnut (Nr. 4-6)

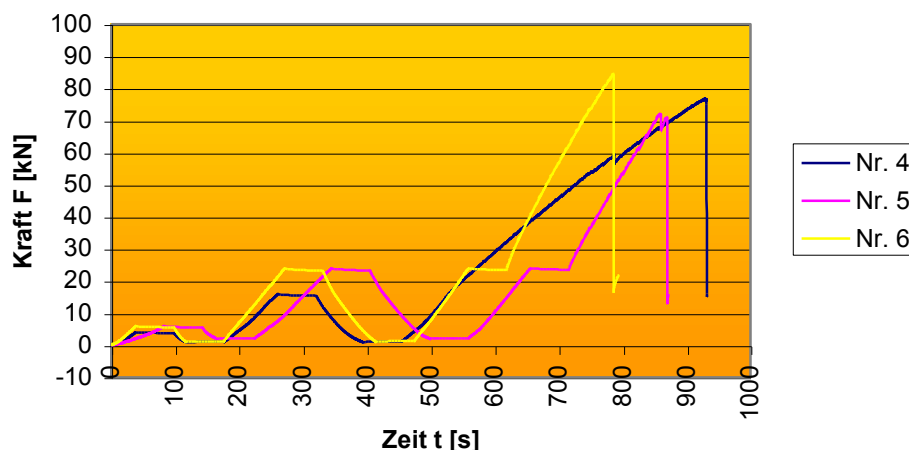


Abb. 12: Kraft-Zeit-Diagramm, Schubfluss mit Nut

Wie in Abb. 12 ersichtlich wurde die Nr. 4 als erstes getestet. Dabei hatte man verschiedene Fehler in der Software festgestellt, weshalb zum Beispiel im 3. Zyklus kein Plateau vorhanden ist. Diese wurden anschliessend korrigiert.

Weiters kann man gut erkennen, dass die Nr. 5 einen relativ grossen Schlupf aufwies.

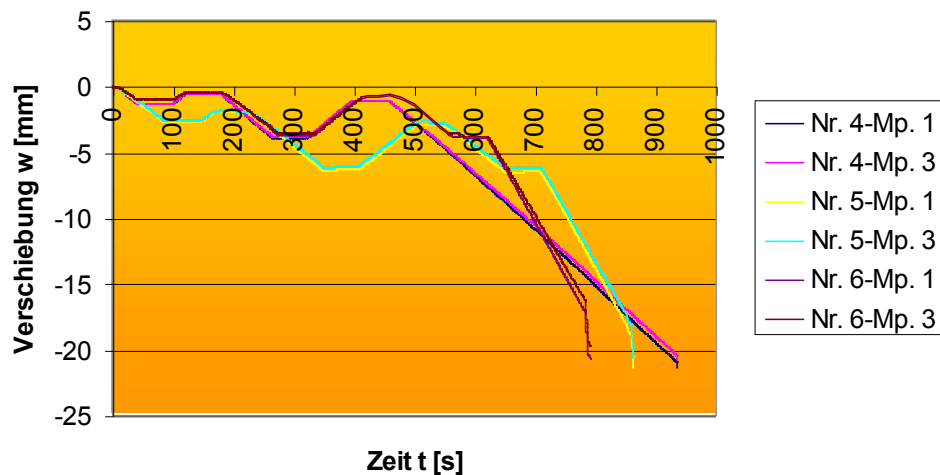


Abb. 13: Weg-Zeit-Diagramm, Schubfluss mit Nut

Im Weg-Zeit-Diagramm lässt sich sehr einfach die Steifigkeit einer Probekörpers erkennen. Dabei stellte man fest, dass die Nr. 5 sehr weich war. Sie weist bei gleicher Belastung eine deutlich höhere Deformation als die beiden anderen Elemente auf.

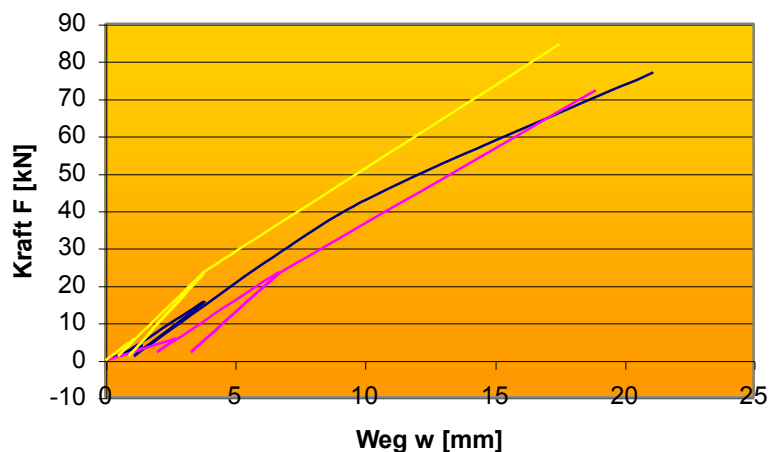


Abb. 14: Kraft-Weg-Diagramm, Schubfluss mit Nut

Auch in dieser Abbildung wird der grosse Schlupf bei der Nr. 5 ersichtlich. Im Gegensatz zu den anderen Versuchskörpern weist er auch eine grosse plastische Verformung auf (ca. 3 bis 3.5 mm).

Statische Werte

Die statischen Werte wurden, wie bereits oben beschreiben, ermittelt.

Tabelle 9: Statischen Werte, mit Nut

Probennummer	F max [kN]	w max [mm]	Fd [kN] ³	
Nr.4	77	21.1	14.5	14.6
Nr.5	72.2	18.9	13.6	
Nr.6	84.5	17.5	15.9	

Statistik

Tabelle 10: Statistik, mit Nut

Kriterium	F max	w max	Fd
Mittelwert x	77.9 kN	19.2 mm	14.6 kN
Standardabweichung s	6.2 kN	1.8 mm	1.2 kN
Variationskoeffizient v	8.0 %	9.5 %	8.0 %

³ Sicherheitsfaktor für die Berechnung = 2.67 (vgl. Begründung 4.1.2)

4.2.8 Interpretation der Ergebnisse

Wandelemente ohne Entlastungsnut (Nr. 1-3)

Bei den Schubspannungsversuchen ohne Entlastungsnut stellte man zwei unterschiedliche Arten von Brüchen fest.

Nr.1, Leimfugenbruch

Der Prüfkörper Nr.1 (vgl. Abb. 15 + Abb. 16) wies einen Leimfugenbruch auf. Dies hatte zur Folge, dass die Bruchkraft F_u deutlich tiefer lag, als bei den Prüfkörpern Nr. 2 und 3. In Prozenten ausgedrückt, liegt sie ca. bei 75%, der oben genannten Versuchselemente. Der Grund des Bruches liegt in der schlechten Leimfugenqualität.

Es ist festzuhalten, dass nach dem Leimfugenbruch die Belastung über den zweiten Prüfkörper abgetragen wurde. D.h. nach dem Leimfugenbruch war die Prüfung noch nicht ganz abgeschlossen. Es konnte weiterhin eine konstante Kraftzunahme festgestellt werden. (vgl. Abb. 9).

Als sehr positiv kann man festhalten, dass trotz eines Versagens in der Leimfuge, kein plötzlicher Bruch festzustellen war. Dies ist vergleichbar mit einem duktilen Verhalten, wie man es hauptsächlich im Stahl- und Betonbau kennt.



Abb. 15: Nr.1 Leimfugenbruch der Platte



Abb. 16: Nr.1 Bruch greift in die Platte über

Nr. 2 und 3, Schubbruch

Bei Nr. 2 und 3 konnte als Grund für den Bruch ein Schubversagen festgestellt werden (vgl. Abb. 17 - Abb. 21). Dieser Schubbruch tritt in Kombination mit einem Querkzugproblem auf. Es lässt sich jedoch nicht genau sagen, welche der Beiden massgebende für den Bruch waren.

Stellt man sich die Kraftabtragung im Rücken des Trigoboard gemäss Abb. 22 vor, wird der Kraftverlauf in der Platte etwas deutlicher. Die Kraft F drückt in „Balken“-Mitte. Dies verursacht im Rücken des Trigoboard-Elementes eine Zugkraft in diagonalen Richtung. Da nun die Diagonale unter dem Winkel α zu den Fasern geneigt ist, entstehen neben den Zugkräften in Faserrichtung auch Querkzugkräfte senkrecht dazu.



Abb. 17: Nr.2 Lage des Versagens



Abb. 18: Nr.2, Bruch des Rückens, oberhalb der „Rippe“



Abb. 19: Nr.3 Lage des Bruchs

In Abb. 20 kann man sehr schön das Bruchbild erkennen. Die beiden Teile wurden, wie oben beschreiben, infolge Querkzug und Schub voneinander getrennt.



Abb. 20: Nr.3 Bruchbild



Abb. 21: Nr.3 Schub- Querkzugversagen

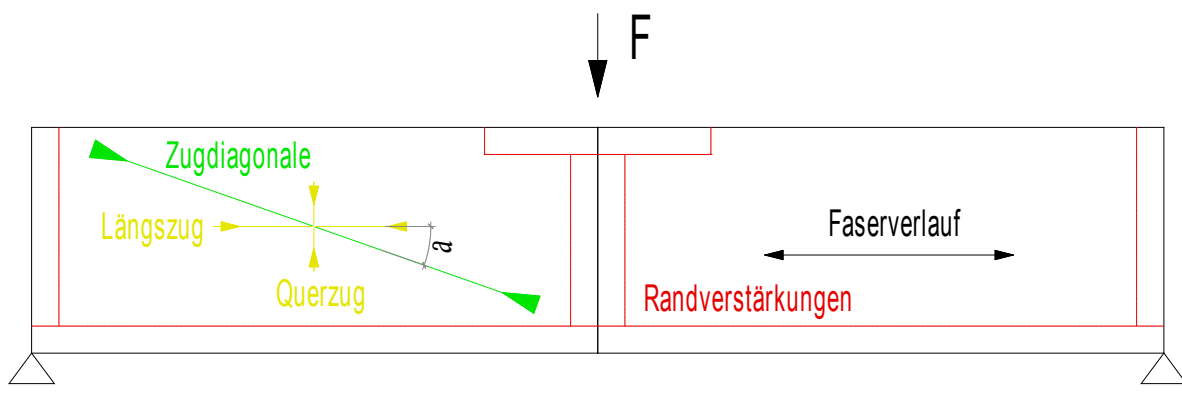


Abb. 22: Kraftfluss in der Rückenplatte (ohne Entlastungsnut)

Schubmodul

Die Schubmoduli wurden anhand zwei verschiedener Varianten berechnet. In der ersten Variante hat man angenommen, dass die Kraft nur durch den Trigoboard-Rücken übertragen wird. Dabei stellte man fest, dass man Schubmoduli erhält,

welche um einiges höher liegen (vgl. Tabelle 5-Tabelle 7), als die erwartenden Werte von 500N/mm^2 .

Bei der Variante 2 ging man davon aus, dass die Kraft auch über die Rippen übertragen wird. Dies führte dann zu den erwarteten Werten im Bereich von $497\text{--}730\text{N/mm}^2$, in Abhängigkeit des angesetzten E-Moduls. Dies führte zu einer wichtigen Erkenntnis: Die Schubkräfte werden nicht ausschliesslich über den Plattenrücken des Trigobords abgetragen. Die Kräfte fliessen auch durch die Rippen.

Wandelemente mit Entlastungsnut (Nr. 4-6)

Im Gegensatz zu den Wandelementen ohne Entlastungsnut, weisen diejenigen mit Entlastungsnut, ein gleichmässiges Bruchverhalten auf.

Bei allen Versuchskörpern konnte ein Versagen in der mittleren Rippe festgestellt werden. Im diesem Bereich befindet sich die Entlastungsnut (vgl. Abb. 23). Die Kraft will den gleichen Weg nehmen, wie in Abb. 22 aufgeführt. D.h. anstelle der idealisierten Lastabtragung (vgl. Abb. 24), gibt es eine Mischung zwischen diesen beiden Varianten. Dies hat zur Folge, dass ein gewisser Anteil der Kraft über die mittlere Rippe übertragen wird. Da diese aber im Bereich der Entlastungsnut liegt, sprich am schwächsten Ort, kommt es dort zum Bruch.

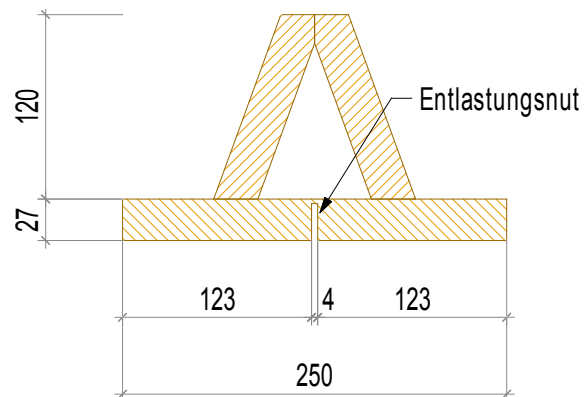


Abb. 23: Mittelrippe mit Entlastungsnut

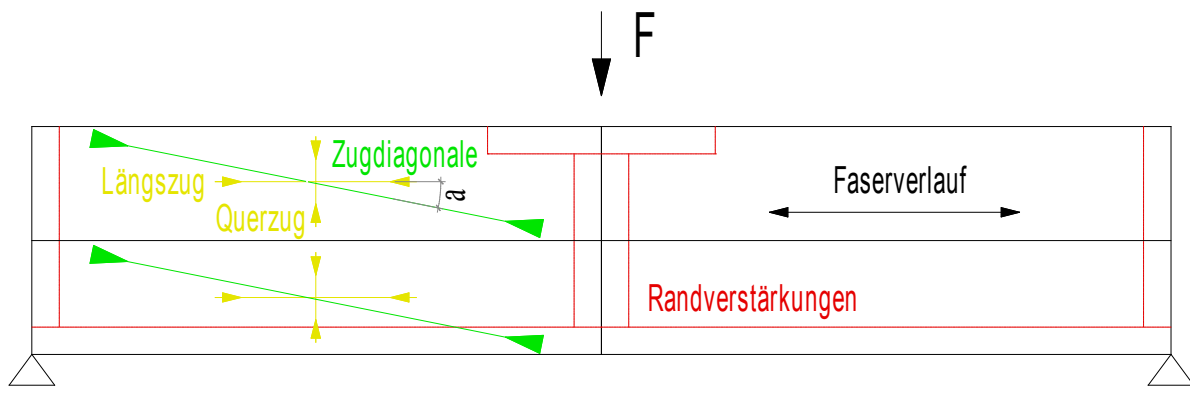


Abb. 24: Idealisierter Kraftfluss in der Rückenplatte (mit Entlastungsnut)

In den Abb. 25-Abb. 30 sind einige Fotos zu den Bruchbildern aufgeführt. Dabei kann man sehr schön erkennen, dass der Bruch in der Leimfuge zwischen Rippe und Plattenrücken beginnt. Der Bruchriss bewegt sich zur Mitte des Elementes hin, auf den äusseren Bereich der Rippe zu.



Abb. 25: Nr.4 Rippenbruch auf Schub



Abb. 26: Nr.4 Bruchverlauf in der Rippe



Abb. 27: Nr.5 Schubbruch in der Rippe



Abb. 28: Nr.5 Verschiebung an den Enden der Rippe

In Abb. 29+Abb. 31 kann man erkennen, dass sich der obere und untere Teil des Rückens gegeneinander verschoben haben. Dies führt im Bereich der Entlastungsnut zu einer Stauchung (im Loch erkennbar).



Abb. 29: Nr.5 Schubbruch



Abb. 30: Nr.6 Verlauf des Schubversagens



Abb. 31: Nr.6 Schubbruch in Elementmitte

4.3 Bemessung der Wandelemente

Da die "neuen" Trigoboard-Elemente ohne Entlastungsnut in Plattenmitte auskommen, kann für die Bemessung die Kraft aus den Versuchen „ohne Entlastungsnut“ verwendet werden (vgl. Tabelle 4).

Die angegebenen Lasten beziehen sich auf eine Breite von je 1m. Das bedeutet, wenn ein Gebäude eine Trigoboard-Wand von 12m Länge hat, darf dieser Wert mit 12 multipliziert werden.

Bemessungsbeispiel

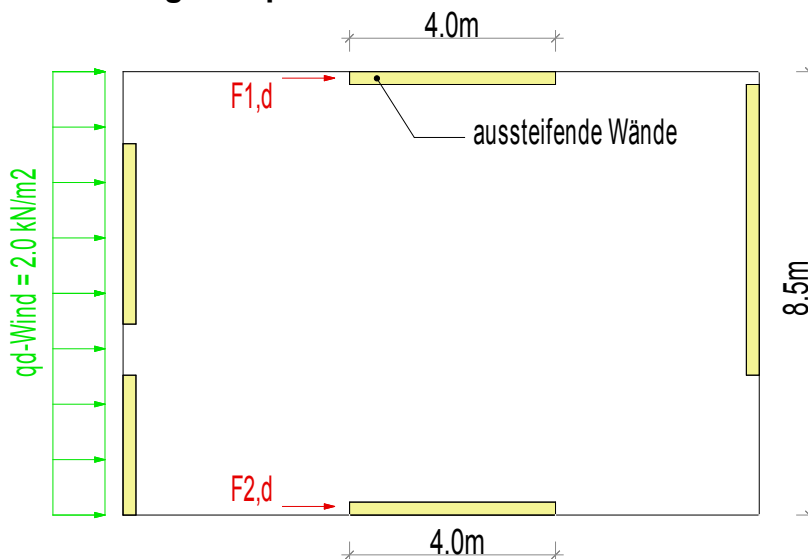


Abb. 32: Grundriss Bemessungsbeispiel

Die Last (aus Wind) auf die beiden aussteifenden Wände wird demnach wie folgt berechnet:

$$F_{1,d} = \frac{q_d \cdot l}{2} = \frac{2.0 \text{ kN/m} \cdot 8.5 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{8.5 \text{ kN}}}$$

Nachweis:

$$F_d = l \cdot 18.7 \text{ kN} = 4 \cdot 18.7 \text{ kN} = 74.8 \text{ kN} \gg F_{1,d} = 8.5 \text{ kN}$$

Der Nachweis ist ohne Probleme erfüllt.

4.4 Fazit

Es ist zu beachten, dass dies nur eine Vorversuchsreihe ist. Für eine genaue Ermittlung der statischen Werte ist eine grösser angelegte Versuchsreihe nötig. Die Art des Versuchsaufbaus erlaubte, dass nur jeweils ein Trigoboard getestet werden konnte. Pro Ergebnis mussten so zwei Trigoboard eingesetzt werden, was einer Ausnutzung der Prüfkörper von 50% entspricht. Damit die Versuche optimal und mit nur je einem Trigoboard durchgeführt werden können, fehlen an der HSB die entsprechenden Prüfvorrichtungen.

Es ist zu beachten, dass der Einfluss der vertikalen Belastung (aus den oberen Stockwerken) nicht berücksichtigt werden konnte. Bei einer Berücksichtigung würde man bessere Ergebnisse erhalten, da dank dieser zusätzlichen vertikalen Last ein höherer Widerstand aktiviert werden kann. Die Wandelemente sind in diesem Fall gegen Schubverformungen besser stabilisiert.

Im Allgemeinen kann man mit den erhaltenen Ergebnissen sehr zufrieden sein. Die Wandelemente weisen eine hohe Steifigkeit und können eine hohe horizontale Kraft aufnehmen und abtragen.

Es ist noch festzuhalten, dass die Bearbeiter der Versuche eine anderen Bruchort erwartet haben. Es wurde erwartet, dass der „Biegeträger“ auf Schub (in der Mitte) oder Biegezug (unten) brechen würde. Dieser fand, wie bereits bekannt, über der unteren Randverstärkung statt. Dabei konnte kein Biegezugbruch festgestellt werden. Betrachtete man die Einleitung der Zugkraft etwas genauer, so stellte man fest, dass diese Zugkraft ungünstige Querkraftkräfte hervorbrachte. Diese überlagerten sich mit den Schubkräften. Somit hatte man eine Mischung aus einem Querkraft- und Schubproblem.

4.4.1 Optimierungsvorschläge Entlastungsnut

Es wird empfohlen, die Entlastungsnuten weg zu lassen. Somit hat man eine sofortige Erhöhung der Traglasten von ca. 30%. Es muss eine neue Lösung gefunden werden, wie das Schwinden und Quellen aufgenommen werden kann. Nach Absprache mit den Initianten, scheint man auch schon eine innovative Lösung gefunden zu haben. Die Entlastungsnut wird entfernt und an den Stössen der Wandelemente neu berücksichtigt (vgl. Abb. 33).

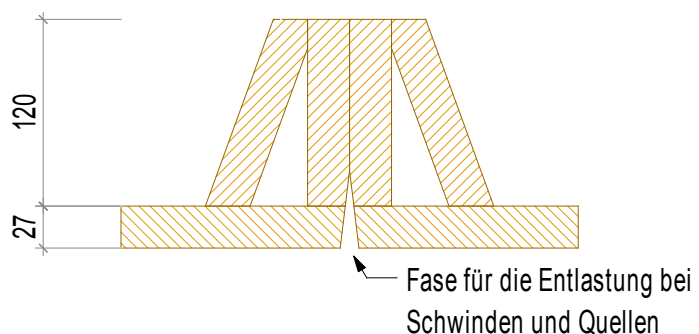


Abb. 33: Entlastungsfase am Ende anstelle der Entlastungsnut in Elementmitte

Materialstärke

Falls mit dem Trigoboard grosse aussteifende Lasten aufgenommen werden müssen, wird empfohlen, die Dicke des Rückens zu erhöhen. Durch die Erhöhung erhält man eine grössere Fläche, was die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Platte verbessert.

Leimfugen

Die Verleimtechnik sollte nach Möglichkeit optimiert werden. Im Versuch Nr. 1 konnte ein Leimfugenbruch festgestellt werden. Das Risiko eines Leimfugenbruches muss auf jeden Fall eingegrenzt werden.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau konnte aufgrund äusserer Bedingungen nicht optimal gewählt werden, weil die Prüfvorrichtungen es nicht erlaubten.

Ein grosses Problem war dabei, dass man immer zwei Elemente gleichzeitig untersuchen musste. Wie oben beschreiben wurde dazu ein Blech als Verbindung der zwei Elemente angeschraubt (vgl. Abb. 4). Die konzentrierte Lasteinleitung durch dieses Blech verursachte ein Moment. Aus dem Moment sind in der Rückenplatte zusätzliche Querkzugsspannungen entstanden.

Für den idealen Versuchsaufbau müssten, wie in Abb. 34 dargestellt, die Elemente senkrecht aufgestellt und mit einer horizontalen und einer vertikalen Kraft getestet werden.

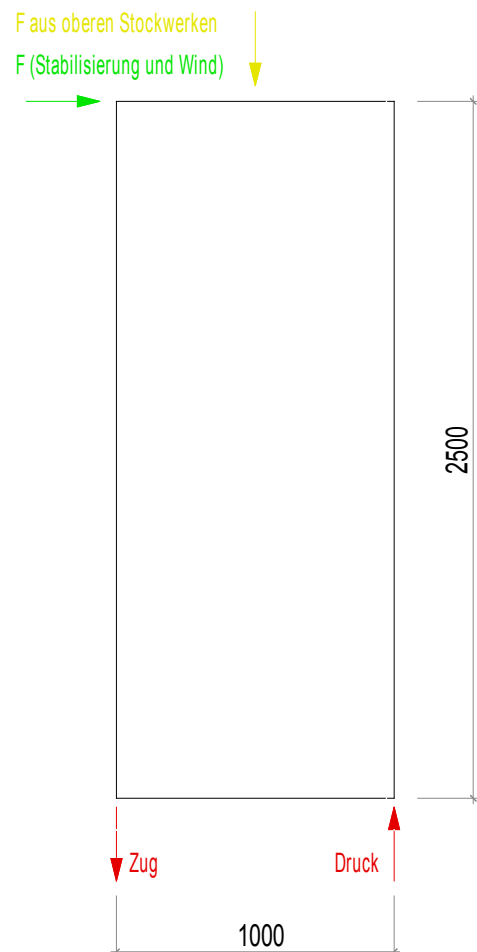


Abb. 34: Idealer Versuchsaufbau für den Schubfluss

5. Knickversuche

5.1 Einleitung

5.1.1 Abgrenzungen

Die Knickversuche beinhalten die Überprüfung der Knickstabilität von Trigoboard-Elementen in Wänden. Als Prüflasten sind nur vertikale Einwirkungen vorgesehen. Von einer Kombination mit horizontalen Windkräften ist aus versuchstechnischen Gründen abgesehen worden. Die Ergebnisse sind für ein Trigoboard-Element mit einer Rippenhöhe von 12 cm gültig. Es ist nicht möglich die Resultate auf eine andere Geometrie (d.h. andere Rippenhöhe) umzurechnen. Weiter wird es auch nicht möglich sein die Resultate für einen anderen Rippenabstand umzurechnen, weil der Einfluss der Rippe nicht genau ermittelt werden kann.

5.1.2 Ziel des Knickversuches

Wie auch die Schubflussversuche sollen die Knickversuche Aussagen zum Einsatz der Trigoboard-Elemente in Wänden ermöglichen. Das Ziel der Knickversuche ist es, die Knickstabilität der Wände zu ermitteln. Man will wissen, wie viel Vertikallast auf das Trigoboard aufgebracht werden darf. Die Ergebnisse sollen als erste Richtwerte dienen. Nach Möglichkeit werden auch die Auswirkungen einer Etagenbauweise, d.h. Einsatz im mehrgeschossigen Holzbau, auf die Knicklast überprüft.

Wie auch beim Schubflussversuch gilt es zu beachten, dass dies nur eine Vorversuchsreihe ist und die Resultate infolge der geringen Probenanzahl nicht als repräsentativ angesehen werden dürfen. Im Klartext heisst das: die 5%-Fraktile darf man nicht ermitteln. Um dennoch eine erste Aussage für die Bemessung zu erhalten, wird die mittlere Bruchlast, gleich wie bei der Auswertung unserer ersten Versuchsreihe, um den Faktor 4 abgemindert. Diese zulässigen Bruchwerte können anschliessend um 50 Prozent erhöht werden, damit man die charakteristischen Bemessungswerte erhält. Nach Vorstellungen der Erfinder von Trigoboard, möchte man auf Werte stossen, welche das Bauen bis zu 6 Etagen zulassen. Um auch Aussagen zu der horizontalen Verformung zu machen, sollen während des Versuchs die Bewegungen der Trigoboard-Elemente aufgezeichnet werden.

5.1.3 Methodik

Bevor man Versuche durchführt, ist es erforderlich sich Gedanken zum Versuchsaufbau und den zu erwartenden Kräften zu machen. Dies wurde eingehend mit den Dozenten und Benutzern des Maschinenparks besprochen. Mit Hilfe von ihnen soll es möglich sein, den Versuch praxisspezifisch durchzuführen. Für die Simulierung von mehrgeschossigen Gebäuden wurden einige Berechnungen zu der Krafteinleitung gemacht. Aufgrund dieser Eigenheit wurde entschieden, die Knickversuche aufzuteilen. Drei Versuchskörper werden mit zentrischer Krafteinleitung geprüft. (vgl. Abb. 35) für die anderen drei Testelemente wäre es sinnvoll, dass mit zwei Druckzylindern gearbeitet wird. Da aber aus Platzgründen diese Anordnung nicht möglich ist, wurde mit einer äquivalenten exzentrischen Krafteinleitung gearbeitet (vgl. Abb. 36). Der genaue Beschrieb beider Versuchsaufbauten ist in den Bildern und Erklärungen von Kapitel 5.2.2 näher erläutert.

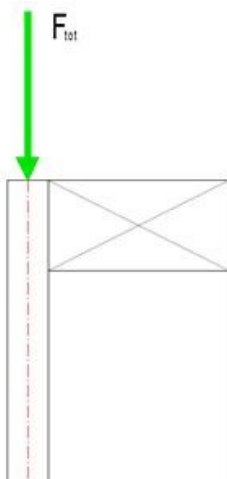


Abb. 35: zentrische Krafteinleitung

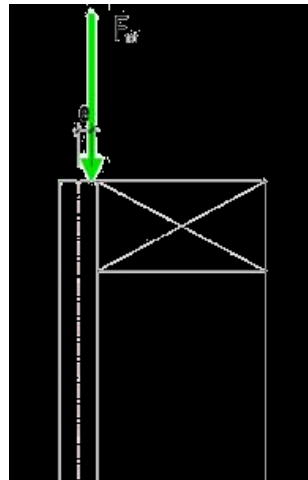


Abb. 36: exzentrische Krafteinleitung

Motiviert durch das Prüfverfahren für den Schubflussversuch (DIN EN 594), wurde im Internet nach ähnlichen Arbeitshilfen recherchiert. Auch nach eingehender Suche ist man auf keine Richtlinien gestossen. Deshalb wurde entschieden die Kraft mit Pausen aufzubringen. In Abb. 37 sind die Plateaus bei 100 kN und 200 kN ersichtlich. Somit hat der Versuchskörper Zeit sich auf die Einwirkung einzustellen, womit die Auswirkung der veränderlichen Nutzlast im Versuchsablauf berücksichtigt ist.

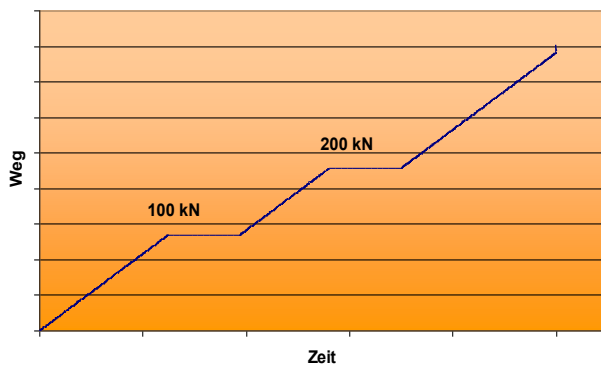


Abb. 37: Versuchsablauf

Fürs Überprüfen und Auswerten der Resultate wird auch dieser Versuchsablauf mit digitalen Medien (PC, Videokamera, Fotokamera) aufgezeichnet. Die Versagensarten

werden mit Fotos und einer zweiten Videokamera festgehalten. So ist es möglich die Resultate auszuwerten, anschliessend Bemessungshilfen zu erstellen und Verbesserungsmassnahmen vorzuschlagen.

5.2 Versuche

5.2.1 Probenbeschreibung

Die Probekörper haben die Geometrie, wie im Kapitel 4.2.1 beschrieben. Mit Interesse sind die drei Löcher in den Rippen zu verfolgen. Haben sie einen Einfluss auf das Versagen auf das Versagen?

Zu Beginn der Versuchsreihe wollte man die Elemente wie in Abb. 38 dargestellt testen (d.h. mit $b=1\text{m}$). Auf Grund der Begrenzung von 400 kN pro Prüfzylinder, mussten die Elemente auseinander geschnitten werden. Entstanden sind zwei Querschnittstypen:

- zwei Mittelrippen mit der Breite von 50 cm
- eine Mittelrippe kombiniert mit einer Randrippe (Breite = 37.5 cm)

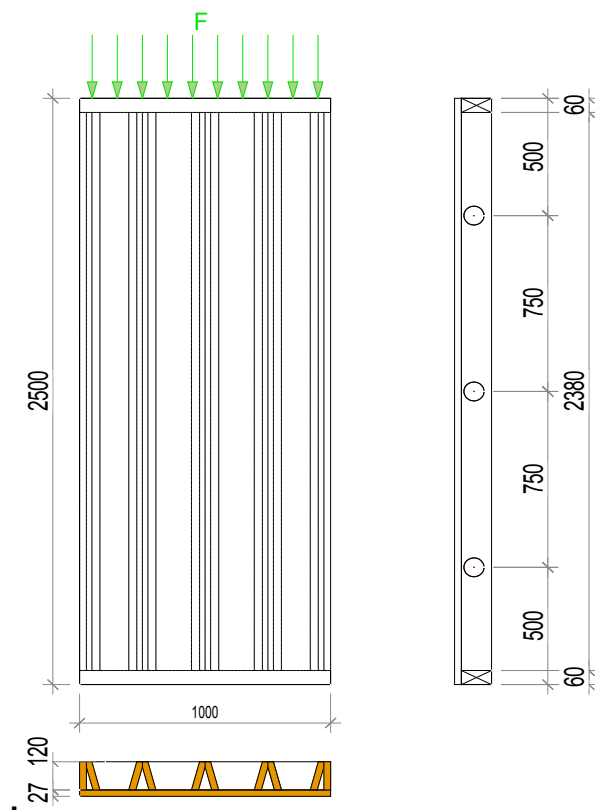


Abb. 38: Knickversuchprobe (Ausgangslage)



Abb. 39: Mittelstück mit 2 Rippen



Abb. 40: Endstück mit Rippe und Randrippe

5.2.2 Versuchsaufbau

Allgemein

Die Knickversuche wurden mit einem Zylinder in vertikaler Richtung geprüft. Aus Einsatzgründen hat man die Kraft im Zentrum der Rückwandplatte (zentrisch) bzw. mit Abstand e (exzentrisch) eingeleitet. Um eine Linienlast zu simulieren schraubte man ein vierkant Stahlrohr an die Zylinderplatte. In Abb. 43 + Abb. 44 ist dieses Rohr mit den entsprechenden Anschlüssen abgebildet. Der rote Strich, der die Mitte des Zylinders anzeigt, dient zur Positionierung der Probekörper. Um das seitliche Wegrutschen besser verhindern zu können, hat man im Stahlrohr (vgl. Abb. 43) Stifte angebracht, welche sich im Prüfkörper verankern.

Idealisiert wird die Kraft aus den oberen Stockwerken nur über die Rückenplatte abgetragen. Dies kommt daher, da die Schwelle (Auflager Decke) aus Querholz besteht und der Rücken in vertikaler Richtung nur Stirnholz aufweist. Das Querholz ist bekanntlich weniger stabil als Stirnholz und somit verlagern sich die Kräfte zum Stirnholz hin. Dieser Effekt wurde berücksichtigt, indem eine Eisenschwelle eingelegt wurde (vgl. Abb. 42). Diese erlaubte uns die Simulation der Kraftübertragung in der Rückenplatte.



Abb. 41: Prüfvorrichtung



Abb. 42: Kraftaufnahme



Abb. 43: Druckbalken mit Stiften

Zentrisch

Bei den zentrischen Versuchen wird die Kraft in der Plattenachse eingeleitet. Wie in Abb. 44 dargestellt, positioniert man die Platte des Trigobords direkt unter der Zylinderachse.



Abb. 44: Krafteinleitung

Exzentrisch

Der Unterschied zwischen den zentrischen und exzentrischen Versuchen ist, wie oben erwähnt, die Stelle der Krafteinleitung. Im exzentrischen Fall wird der Zylinder ganz einfach mit dem ausgerechneten Abstand vom Mittelpunkt der Platte angeordnet.

Zur Ermittlung der Verschiebung wurden folgende Annahmen und Berechnungen gemacht:

Es treten zwei Kräfte mit unterschiedlichem Ort der Einleitung auf (vgl. Abb. 45). Die Kraft aus den oberen Stockwerken greift im Mittelpunkt der Platte an und die Kraft aus der Decke wird im Mittelpunkt der Rippen eingeleitet. Daraus kombiniert ergibt sich die zu erwartende Bruchlast mit dem berechneten Abstand e (vgl. Abb. 36). Die Kraft aus der Decke setzt sich aus den ständigen Lasten und der Nutzlast zusammen.

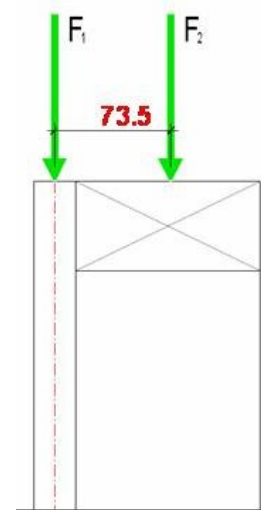


Abb. 45: zwei Kräfte mit Abstand

Berechnung

Zur Ermittlung der Einflussfläche wird ein Einfeldsystem mit einer Spannweite von 7 Meter entsprechend dem Beispiel aus SIA D 0195 Seite 55 angenommen.



Abb. 46: Aufbau Bodensystem

Lasten

$$g_k = 1.74 \text{ kN/m}^2$$

$$q_n = 3 \text{ kN/m}^2 \text{ (Nutzlast Kategorie B, SIA 261)}$$

Lastkombination

$$q_d = 1,35 \cdot 1,74 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 3,0 \text{ kN/m}^2 = \underline{6.85 \text{ kN/m}^2}$$

Auflagerlinienlast

$$q_d = \frac{q_d \cdot l}{2} = \frac{6.85 \text{ kN/m}^2 \cdot 7 \text{ m}}{2} = \underline{24 \text{ kN/m}}$$

Umgerechnet auf das Bruchniveau

$$q_{d,u} = 24 \text{ kN/m} \cdot 2.27 = \underline{54.9 \text{ kN/m}}$$

Umgerechnet auf die Elementbreite

$$q_d = q_{d,u} \cdot 0.5 \text{ m} = \underline{27.5 \text{ kN/m}}$$

$$q_d = q_{d,u} \cdot 0.375 \text{ m} = \underline{20.6 \text{ kN/m}}$$

Als zu erwartende Bruchkraft wurde der kleinste Wert F_{tot} aus den zentrischen Knickversuchen angenommen.

Exzentrizität e, Element mit zwei Rippen ($F_{\text{tot}}=140\text{kN}$)

$$e_1 = F_2 \cdot \frac{\text{Abst.} \cdot d}{F_{\text{tot}}} = 27.4 \text{ kN} \cdot \frac{0.0755 \text{ m}}{140 \text{ kN}} = \underline{0.014 \text{ m}}$$

analog, Element mit Rippe und Randrippe ($F_{\text{tot}}=100\text{kN}$)

$$e_1 = F_2 \cdot \frac{\text{Abst.} \cdot d}{F_{\text{tot}}} = 20.8 \text{ kN} \cdot \frac{0.0755 \text{ m}}{100 \text{ kN}} = \underline{0.015 \text{ m}}$$

Auf Grund dieser Berechnungen wurde als Abstand e vom Plattenmittelpunkt für die Krafteinleitung einen Wert von 15 mm gewählt. Zum besseren Verständnis siehe auch Abb. 36.

Was passiert bei einer höheren Bruchlast?

In diesem Fall würden sich der Abstand und auch das zu erwartende Moment verkleinern. Je nachdem kann sich dies günstig oder ungünstig auf die Bruchlast auswirken. In dieser Phase der Arbeit lässt sich dazu noch keine vernünftige Aussage machen. In den Auswertung und Bemessungsformeln ist auf diesen Umstand hinzuweisen. Es ist zu berücksichtigen, dass sich durch Veränderung der Auflast, der Nutzlast und des Eigengewichtes (Boden) der Abstand e vergrössern oder verkleinern kann.

5.2.3 Messgeräte

Es wurden die gleichen Messgeräte verwendet, wie in Kapitel 4, Abschnitt 4.2.3 beschrieben.

In Abb. 47 kann man erkennen, wie die Videokamera die Verschiebung aufzeichnete. Auf dem Trigoboard wurden drei Messpunkte angebracht, welche dann erfasst und im „Dotmeasurement for Windows“ in Wertetabellen abgespeichert wurden.



Abb. 47: Aufzeichnung der Verschiebung

5.2.4 Einflussfaktoren

Es gibt zwei Arten von Einflussfaktoren: Direkte, bedingt durch das Material und die Geometrie sowie indirekte, welche äussere Einflüsse zur Ursache haben.

Material und Geometrie

Rohdichte	Mit zunehmender Rohdichte steigt die Knick- und die Druckfestigkeit.
Faser-Lastwinkel	Eine Vergrösserung des Faser-Last-Winkels bewirkt eine Abnahme der Festigkeit.
Äste/Risse	Äste verursachen einen starken lokalen Abfall der Querkzugfestigkeit und der Knickverzweigung. Auf die Druckfestigkeit im generellen haben Äste jedoch einen positiven Einfluss. Risse im Holz hingegen führen immer zu einem Verlust der Festigkeit.
Leimfuge	Bei einer schlechten Verleimung kann diese als erste versagen. Die Leimfuge sollte immer besser als das Holz sein. Die optimale Verleimung von Politurethan setzt eine gewisse Holzfeuchte voraus.
Feuchtegehalt	Eine Erhöhung des Feuchtegehaltes bewirkt eine erhebliche Reduktion der Festigkeiten. Bei Zunahme der Feuchtigkeit um jeweils 1% reduziert sich die Druckfestigkeit um 6%.
Geometrie	die Geometrie bestimmt zusammen mit der Faserrichtung den Fluss der Kräfte. Je nachdem haben wir es mit einem Verzweigungsproblem (Knicken) oder mit Querkzugsspannungen zu tun. Für das Knicken ist auch das Verhältnis von Breite/Höhe wichtig.

Äussere Einflüsse

Umgebungsfeuchte

Sie bewirkt eine Veränderung der Holzausgleichsfeuchte. Die Probekörper sollten von der Herstellung bis zum Versuch in ähnlichen Klimaten gelagert werden.

Krafteinleitung

Entscheidend ist der Ort mit dem entsprechenden Abstand zum Querschnittsmittelpunkt, wo die Kraft in den Probekörper ein- und austritt.

5.2.5 Statische Vorberechnungen

Ziel

Ziel einer statischen Vorberechnung ist es, die Prüfanlage entsprechend einzustellen. Im Gegensatz zu den Schubflussversuchen ist die zu erwartende Bruchlast nicht nötig für den Versuchsablauf. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass das Abschätzen der Bruchlast dennoch entscheidend sein kann

Berechnungsansatz

Die Berechnungsmethode basiert auf dem klassischen Knickbruch (SIA 265, S. 30). Entscheidend für die Bruchlast ist die bezogene Schlankheit λ_{rel} . Sie wurde mit der Fläche A , dem Trägheitsmoment i und den Materialeigenschaften für Schnittholz C24 berechnet. Als Knicklänge hat man die Längsabmessung von 2.5m eingesetzt. Die Querschnittswerte sind im Fagus vom Statikprogramm Cubus ermittelt worden. Des weitem wurde angenommen, dass die Kraft im Querschnittsmittelpunkt angreift. Um den Einfluss der Löcher zu ermitteln, sind zwei parallele Berechnungen durchgeführt worden. Die zu erwartende Bruchlast ist der Mittelwert aus beiden Berechnungen.

Für die Versuche mit der exzentrischen Krafteinleitung rechnet sich die Bruchlast aus einer Addition der Knickspannungen und der Biegespannung (SIA 265, Formel 37). Dabei wird die Kraft F_u mit dem Abstand e (vgl. Abb. Abb. 36) eingeleitet. Als letzte Bemerkung sei hier noch erwähnt, dass in einigen Fällen die Druckfestigkeit (nicht Knicken) der Rückwandplatte massgebend werden kann. Die Projektbearbeiter sind sich grundsätzlich bewusst, dass diese Berechnungen nur eine grobe Abschätzung darstellen und die Versuchsergebnisse andere Werte liefern können. Für die genaue Betrachtung der Vorberechnung sind die Handrechnungen und die Exceltabellen im Anhang zu empfehlen.

Berechnungswerte

Wie in der Tabelle 11 ersichtlich können Bruchwerte von 740 kN und 660 kN erwartet werden. Interessant ist die Aussage, dass bei einer exzentrisch eingeleiteten Kraft die Werte um ca. 10-15% tiefer sind, wie bei einer zentrischen Einleitung.

Tabelle 11 Berechnungswerte Vorstatik

Querschnittstyp	Krafteinleitung	Bruchlast kN
1 Mittelrippe	zentrisch	186
1 Mittelrippe	exzentrisch	153
1m Element	zentrisch	740
1m Element	exzentrisch	660
2 Mittelrippen	zentrisch	372
2 Mittelrippen	exzentrisch	310
Endstück	zentrisch	279
Endstück	exzentrisch	250

5.2.6 Ergebnisse

In diesem Kapitel geht es darum einen Einblick zu erhalten in die Resultate der Versuche. Die entsprechenden Interpretationen sind im nächsten Kapitel enthalten. Grundsätzlich lassen sich die Knickversuche in vier Gruppen mit 2-3 Probekörper unterteilen (vgl. Tabelle 12):

- Abschlussschlusselemente zentrisch
- Abschlusselemente exzentrisch
- Mitte zentrisch
- Mitte exzentrisch

Tabelle 12: Eigenschaften Probekörper

Nr.	Exzentrizität		Stück	
	ja	nein	Abschluss	Mitte
20		x		x
21		x	x	
22		x		x
23		x		x
24		x	x	
25		x	x	
26		x	x	
27	x			x
28	x		x	
29	x		x	
30	x			x
31	x			x

Abschlusselemente (vgl. Abb. 40)

Auf die Abschlusselemente wird nur kurz eingegangen, da die Einflüsse der Randrippen nicht berücksichtigt werden müssen. In der Praxis verbindet man die Elemente am Ende miteinander, wodurch eine grössere Fläche und somit eine höhere Steifigkeit entsteht (vgl. Abb. 33). Aus diesem Grunde sind für die Bemessung nur die Resultate der mittleren Rippen massgebend. Somit liegt man bei der Berechnung mit vier Mittelrippen auf der sicheren Seite. Als Vergleich wurden die Werte für ein 1-Meter Element trotzdem exakt zusammengestellt.

Der Einfluss der exzentrischen Krafteinleitung ist nur schlecht ersichtlich, da der Probekörper 29 bei der Lastaufbringung weggerutscht und vorgängig gebrochen ist. Daher konnte er für die Interpretation nicht verwendet werden, weshalb für den exzentrischen Versuch nur ein aussagekräftiger Probekörper vorliegt.

Abschluss zentrisch und exzentrisch

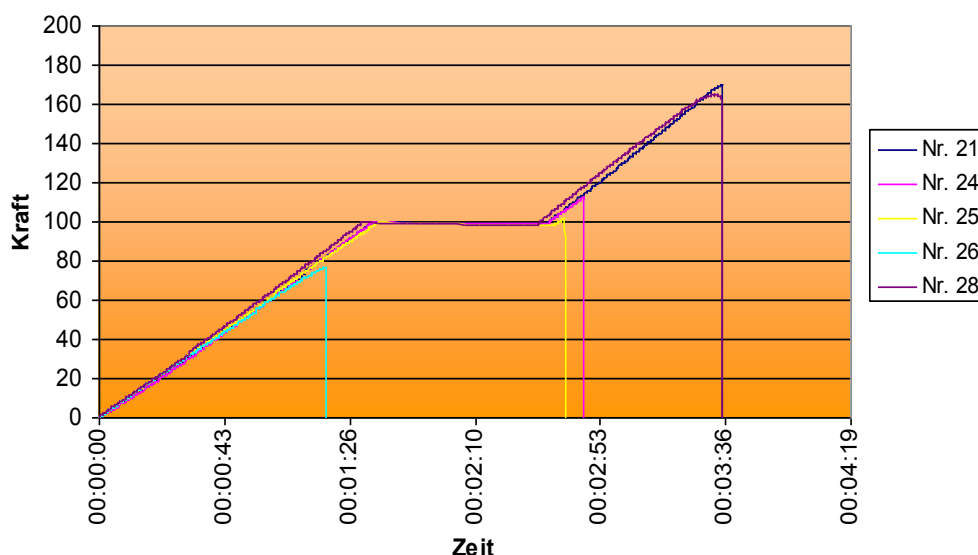


Abb. 48 Versuchswerte Abschlusselemente

In der Abbildung gerade oberhalb ist gut ersichtlich, dass alle Versuche ungefähr die gleiche Steifigkeit besitzen. Weiter ist die grosse Streuung ablesbar. Da der Probekörper Nummer 26 während des Versuches abgerutscht ist, liegt sein Wert weit abgeschlagen. Da das Element schon einen Riss zwischen der Platte und der Rippe

aufgewiesen hat, konnte dieser Probekörper nicht noch einmal getestet werden. Bei der Berechnung des Mittelwertes wird dieser Bruchwert nicht berücksichtigt.

Die anderen Resultate liegen aufgeteilt in zwei Gruppen beieinander. Interessant ist die Tatsache, dass der exzentrische Versuch das zweitbeste Resultat erzielt hat. Somit stimmen die Vorberechnungen nicht ganz mit den Resultaten überein. Bildet man den Mittelwert aus den zentrischen Versuchen (Nr.21, 24 + 25), so schneidet der exzentrische Versuch besser ab.

Die Aussage zu machen, dass die exzentrische Krafteinleitung sich günstig auf das Bruchverhalten auswirkt, ist aber aufgrund nur eines Probekörpers zu wagen. Die Versuche mit den Mittelrippen werden in diesem Fall mehr aussagen.

In Tabelle 13 ist aus den Probekörper 21, 24 + 25 ein Mittelwert von 128 kN gebildet worden. Aufgrund der grossen Standardabweichung sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu geniessen. Bei der Kombination von zentrischer und exzentrischer Krafteinleitung wird die Standardabweichung leicht besser (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 13 Bruchwerte Abschlusselemente

Nummer	Zeit	Wert	Mittelwert	Standartabweichung
Abschluss normal				
21	00:03:35	170	128	36.92
24	00:02:47	112		
25	00:02:40	102		
Abschluss exzentrisch				
28	00:03:32	165	165	0.00

Tabelle 14 Bruchwerte Abschlusselemente kombiniert

Nummer	Zeit	Wert	Mittelwert	Standartabweichung
Abschluss zentrisch und exzentrisch				
21	00:03:35	170	137	35.32
24	00:02:47	112		
25	00:02:40	102		
28	00:03:32	165		

Eine weitere interessante Auswertung ist die horizontale Durchbiegung der Trigo board-Elemente. In Abb. 49 sind die Knickkurven bei Bruch dargestellt. Die horizontale Verschiebung wird in ein Koordinatensystem eingetragen. In der Waagrechten wird der vertikale Endpunkt genommen und senkrecht dazu die horizontale Verschiebung. Anschliessend legt man eine polynomische Trendlinie. Nun stellt man fest, dass auch der oberste Punkt, dort wo die Krafteinleitung ist, sich horizontal verschoben hat. Für die tatsächliche Knickkurve müssen deshalb die Werte entsprechend korrigiert werden.

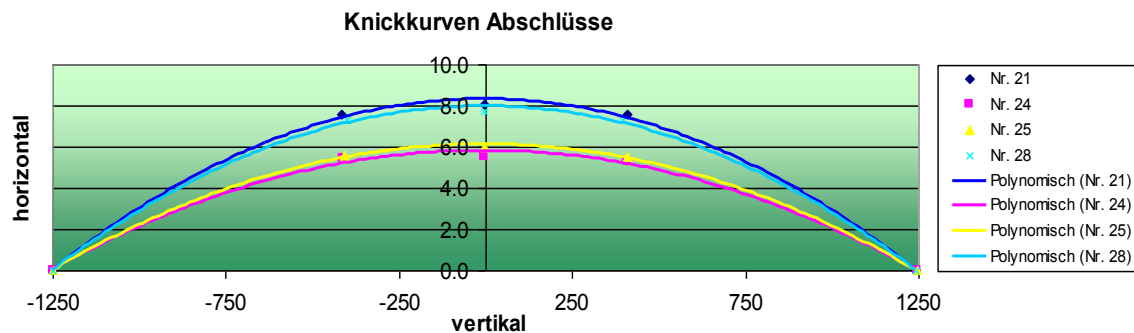


Abb. 49 Knicklinie bei Bruchlasten

Die maximale Auslenkung ist bei den Probekörpern mit höheren Bruchlasten (Nr. 21 + 28) grösser als bei denjenigen mit tieferen Werten (Nr. 24 + 25).

Mittelrippen (vgl. Abb. 39)

Die folgenden Ausführungen sind in zentrische und exzentrische Versuche gegliedert. Der Umfang der Auswertung beträgt jeweils drei Probekörper.

Zentrische Krafteinleitung

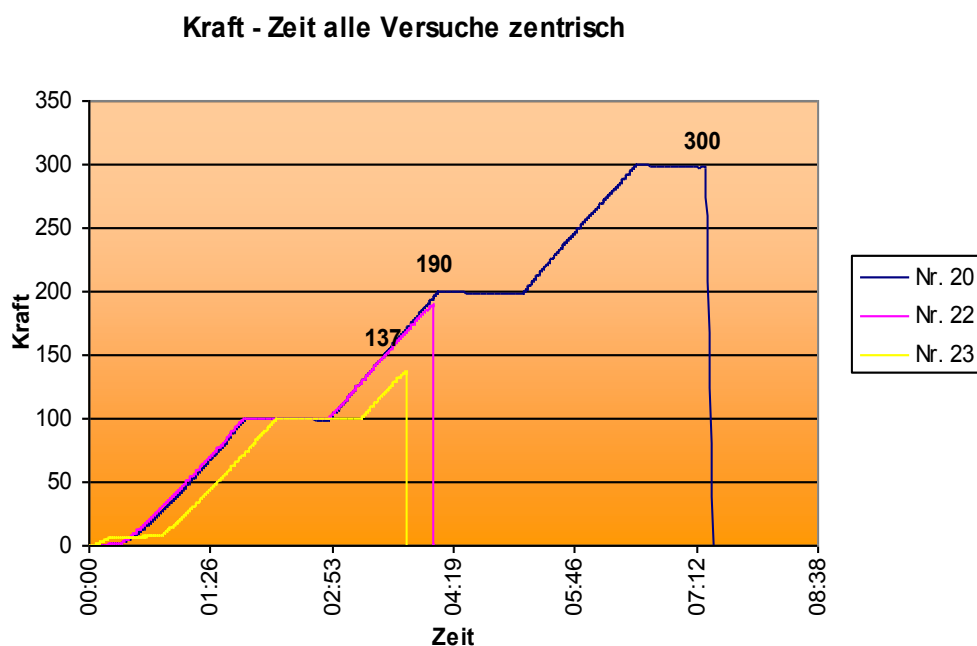


Abb. 50 Versuchsablauf zentrisch

Die Abb. 50 zeigt den Versuchsablauf der drei Probekörper und ihre Bruchwerte. Ausser dem Probekörper 23 folgen sich die Kraft-Zeit Funktionen derselben Linie was bedeutet, dass Nr. 20 und 22 ungefähr gleich steif sind.

Der waagrechte Verlauf zu Beginn bei Nr. 23 könnte auf möglichen Schlupf (z.B. Luft zwischen Schwelle und Rippe) hinweisen. Auch in den Bruchwerten sind die Probekörper verschieden. Bemerkenswert ist das Resultat der Nr. 20. Mit rund 300 kN, ist es mehr als 100% höher als der Rest. Der Mittelwert über die drei Probekörper wird durch die Nr. 20 stark angehoben. Er beträgt wie in Tabelle 15

ersichtlich 209 kN. Auch hier ist eine grosse Standartabweichung von mehr als 30% vorhanden.

Tabelle 15 Bruchwerte zentrisch

Nummer	Zeit	Wert	Mittelwert	Standartabweichung
Mitte zentrisch				
20	00:03:35	300	209	83.07
22	00:02:47	190		
23	00:02:40	137		

Die horizontalen Verschiebungen zeigen ein ähnliches Bild wie bei den vorgängigen Versuchen. In diesem Fall lässt sich keine Korrelation zwischen Durchbiegung und Bruchlasten feststellen. Der Probekörper 22 hat mit wesentlich tieferen Testwerten praktisch dieselbe Durchbiegung wie die Nummer 20.

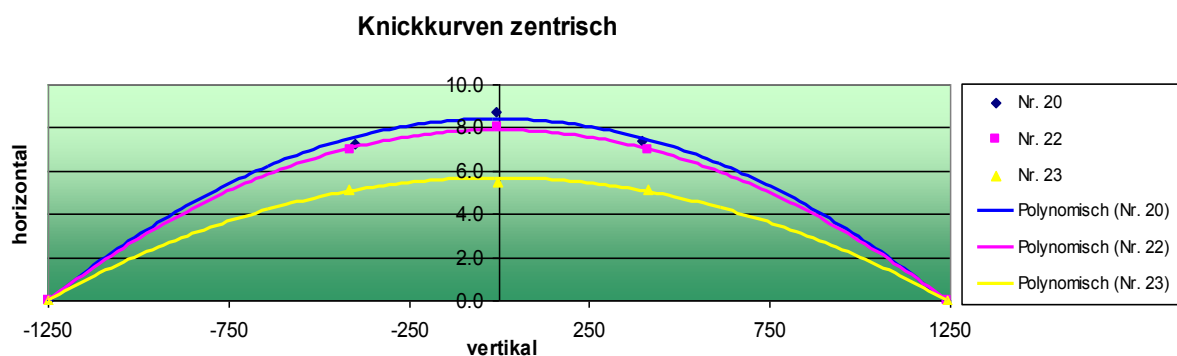


Abb. 51 Knicklinie bei Bruchlasten

Das Kraft-Weg-Diagramm in Abb. 52, zeigt den Verlauf der Verschiebung des mittleren Messpunktes in Funktion der Kraft. Auf den ersten Blick sieht es verwirrend aus. Die Frage ist, ob die Verschiebungen auch richtig gemessen wurden, da die Probekörper 22 und 23 sehr unregelmässige Kurven aufweisen.

Aus den Erfahrungen der anderen Versuchen ist es jedoch unmöglich, dass die Kamera so ungenau aufzeichnet, weshalb diese Sprünge als Anfangsschwankungen interpretiert werden.

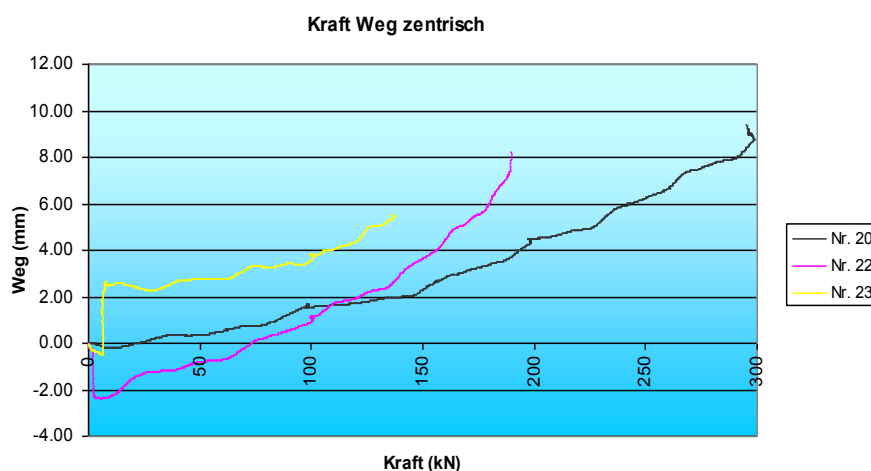


Abb. 52 Weg in Funktion der Kraft (zentrisch)

Mittelrippen (vgl. Abb. 39) mit exzentrischer Krafteinleitung

Kraft - Zeit alle Versuche exzentrisch

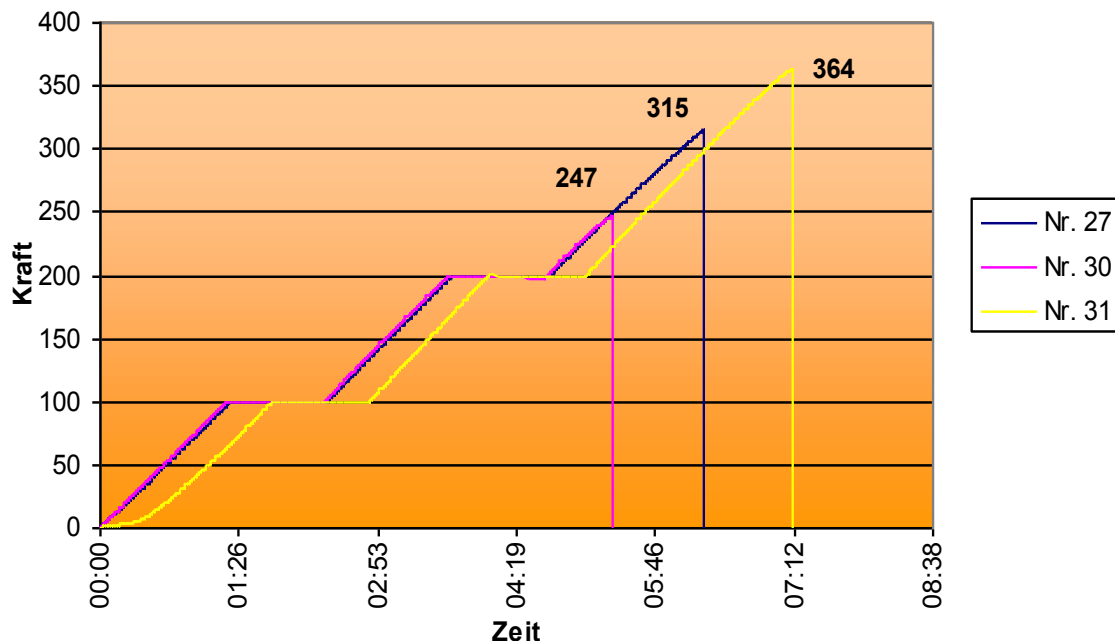


Abb. 53: Versuchsablauf exzentrisch

In Abb. 53 ist der Versuchsablauf der drei Probekörper und den dazugehörigen Bruchwerten abgebildet. Mit Ausnahme des Probekörpers 31, liegen die Kraft-Zeit Funktionen auf derselben Linie. Möglicherweise ist dieser Unterschied durch Schlupf (z.B. Luft zwischen Schwelle und Rippe) entstanden. Die Bruchwerte weisen im Vergleich zu den anderen Resultaten eine geringere Standardabweichung auf.

Tabelle 16: Bruchwerte exzentrisch

Nummer	Zeit	Wert	Mittelwert	Standartabweichung
Mitte zentrisch				
27	00:03:35	315	309	58.99
30	00:02:47	247		
31	00:02:40	364		

Die Auslenkung der Knickkurven in Abb. 54 sind deutlich grösser als bei den zentrischen Versuchen. Erstaunlich ist, dass der Probekörper 27 trotz tieferen Bruchwerte, um 5 mm mehr durchbiegt, wie die Nummer 31. Auch hier lassen sich keine Korrelationen zwischen der Durchbiegung und den Bruchlasten feststellen.

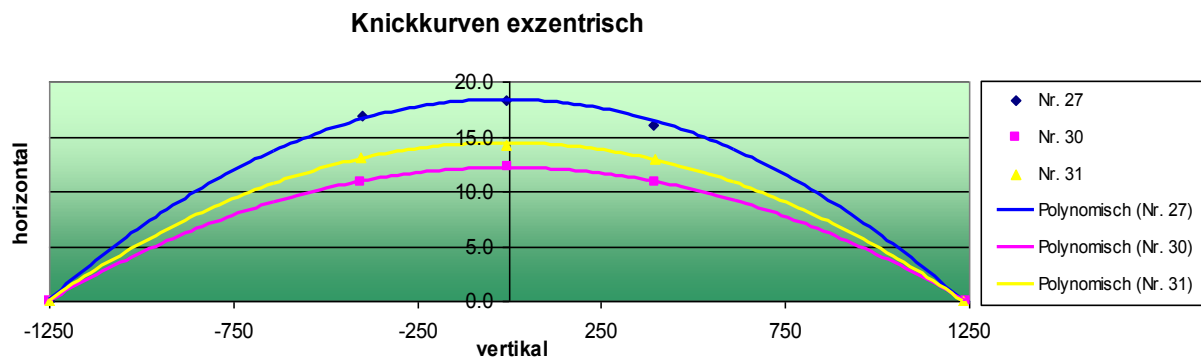


Abb. 54: Knickkurven bei Bruchlast

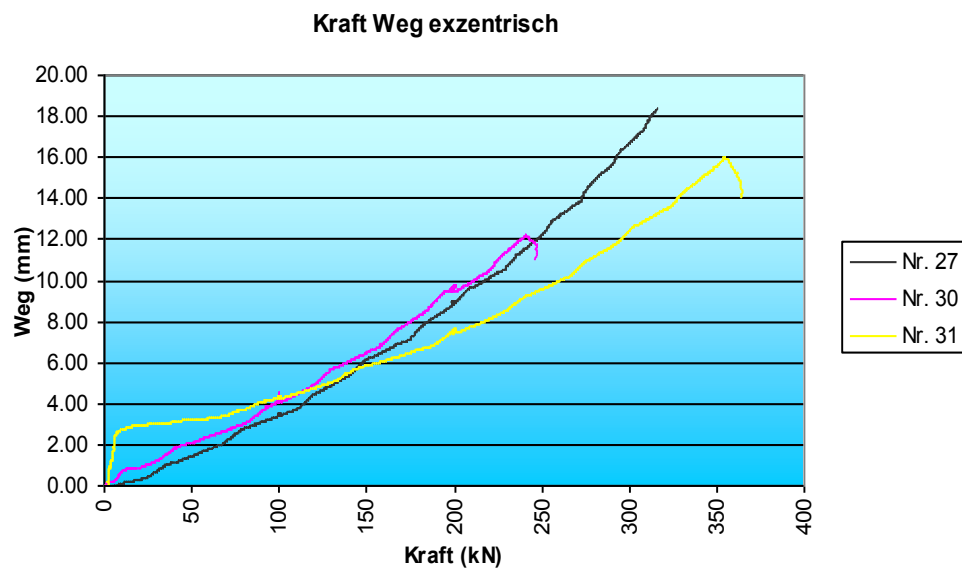


Abb. 55 Weg in Funktion der Kraft (exzentrisch)

5.2.7 Interpretation der Ergebnisse

Die Interpretationen in diesem Kapitel beziehen sich aus oben genannten Gründen nur auf die Ergebnisse der Mittelrippen. Wiederum wird in zentrische und exzentrische Versuche unterteilt.

Zentrische Versuche

Die Probekörper 20, 22 und 23 haben ganz unterschiedliche Bruchlasten. Nach statistischen Prinzipien muss man die Ausreisser, d.h. die Resultate die stark über oder unter dem Mittelwert der Ergebnisse sind, aus der Wertung nehmen. In diesem Fall betrifft das die Nummer 20. Der Bruchwert von diesem Probekörper ist mehr als doppelt so hoch wie der Durchschnitt der beiden anderen (vgl. Tabelle 15). Hier stellt sich wirklich die Frage, ob man auf Kosten der Relevanz der Ergebnisse (noch weniger Probekörper) nur die beiden tieferen Werte mitberücksichtigt. Nach einem näheren Betrachten der Resultate ist eine Antwort möglich.

Probekörper Nr. 20

Die Beobachtungen und das Betrachten der Bruchbilder des Probekörpers Nr. 20 lässt auf einen vorgängigen Bruch in der Rippe mit anschliessendem Knickversagen der Rückwandplatte schliessen. Weiter erkennt man in Abb. 56, dass der Querkzug- oder Schubbruch in der Ebene der Löcher stattgefunden hat. Betrachtet man den Verlauf der horizontalen Verschiebung in Funktion der Kraft (Abb. 52), stellt man eine gewisse Konstanz fest. Man könnte es als idealen Knickverlauf eines homogenen Stoffes bezeichnen. Vermutlich ist die Nummer 20 homogener (d.h. wenig Äste, gleichmässige Jahrringbreite) als die anderen Versuchskörper.

Dass sehr hohe Kräfte im Spiel waren, zeigen die Eindrücke in der Schwelle (Abb. 57). Somit ist auch der Beweis erbracht, dass in der Realität doch ein Teil der Kräfte durch die beiden Schwellen fliesen.



Abb. 56 Versagen von Nr. 20



Abb. 57 Eindruck in Schwelle (Nr. 20)

Probekörper Nr. 22

Bei der Nummer 22 handelt es sich ebenfalls um einen Querkzug- oder Schubbruch. Im Gegensatz ist hier die Rückwandplatte nicht geknickt.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat sicher die Luft zwischen der Rippe und der Schwelle. Abb. 59 zeigt einen deutlichen Schlitz von ungefähr 5 mm. Möglicherweise ist die Auslenkung am Anfang der Kraft-Weg-Kurve auf diesen Umstand zurückzuführen. Da die Schwelle, wie bei der Nummer 20 gut ersichtlich, auch einen Teil der Kraft übernimmt,



Abb. 58 Versagen Nr. 22

kann der Bruchwert aus diesem Grund zusätzlich höher liegen. Noch ein letzter Grund für das tiefere Versagen: In Abb. 58 erkennt man deutlich, dass sich ein Teil des Bruches direkt in der Leimfuge liegt. Bei der Verleimung ist sicher noch Potential vorhanden.

Probekörper Nr. 23

Auch beim Probekörper Nummer 23 liegt der Querkzug- oder Schubbruch in den Rippen. Hier ist das teilweise Versagen in der Leimfuge sichtbar. Interessanterweise sind an einigen Stellen Holzspalten aus der Platte gerissen worden. Vergleicht man den Versuchsablauf mit den anderen Probekörper, so erkennt man, dass am Anfang des Knickversuchs Schlupf vorhanden war. Entweder war der Probekörper sehr weich oder er hatte Luft zwischen der Rippe und der Schwelle.

Betrachtet man das Versuchsergebnis, stellt man fest, dass es verglichen mit Nr. 20 und 22 am tiefsten liegt.



Abb. 59 Probekörper Nr. 22



Abb. 60: Bruchbild von Nr. 23

Dies ist auf zwei Gründe zurückzuführen:

1. Ursache: Die Nummer 23 hat viele Äste im Bereich des Bruchs.
2. Ursache: Rechnet man mit den horizontalen Verschiebungen der drei Messpunkte eine polynomische Knickkurve aus, so stellt man fest, dass der Punkt direkt bei der Krafteinleitung eine beachtliche horizontale Verschiebung hat (vgl. Abb. 61).

Dies bewirkt ein zusätzliches Moment. Mit dem Berechnungsmodell 3 (Kapitel 5.3.3) kann man die tatsächliche Bruchkraft ohne zusätzliches Moment ermitteln. Nach diesem Verfahren erhält man mit dieser Exzentrizität einen Bruchwert von 171 kN. Ohne Verschiebung liegt er um 23% höher. Nun kann der Versuchswert von 137 kN

mit dem Faktor 1.23 erhöht werden. Mit dem "neuen" Wert von 169 kN kann der Mittelwert aus den drei Versuchen neu berechnet werden. Er beträgt jetzt 219 kN.

Nr.23 Knicklinie bei Fmax mit Verschiebung oben

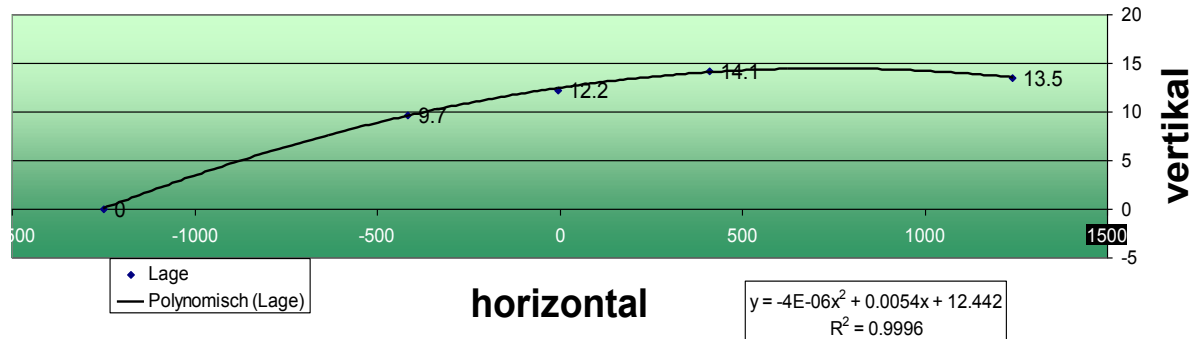


Abb. 61: unkorrigierte Knicklinie bei Bruch (Nr.23)

Schlussfolgerung zentrische Versuche

Die Frage, ob man die Nummer 20 weglassen muss, ist mehr oder weniger klar. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird sie weggelassen. Vergleicht man die Mittelwerte aus Tabelle 17, so liegt der Mittelwert ohne Nr. 20 und mit der angepassten Nr. 23 um 15% tiefer verglichen mit dem MW ohne Anpassungen der Probekörper. Wir haben also eine Sicherheit von Faktor 0.85 schon im Mittelwert drin. Ganz sicher zu tief ist der Wert, wenn wir einfach die Nummer 20 weglassen ohne die Horizontale Verschiebung bei Nummer 23 mit einzubeziehen. Die Standardabweichung (14.8 kN) wird jetzt auch viel günstiger, als wenn man alle Probekörper im Mittelwert einrechnet.

Schlussendlich kann man feststellen, dass mit einer umfangreicheren Versuchsreihe man auf bessere, abgesicherte und möglicherweise höhere Werte kommen kann.

Zusammensetzung	Mittelwert	Stabw
	kN	kN
alle Probekörper	209	83.07
ohne 20	163	37.08
mit 20 und 23 angepasst	219	70.49
ohne 20 und 23 angepasst	179	14.76

Tabelle 17: Mittelwerte der zentrischen Versuche

Exzentrische Versuche

Die Kraft bei den exzentrischen Versuchen greift nicht im Mittelpunkt der Rückwandplatte an. Sie wird mit der Exzentrizität e von 15 mm zum Querschnittsmittelpunkt hin verschoben (vgl. Abb. 36). Dieser Abstand berücksichtigt den Einfluss der Decke gerade oberhalb des Wandelements. Er berechnet sich wie oben schon erwähnt aus der Lasteinzugsfläche der Decke und aus einem angenommen Bruchwert.

Probekörper Nr. 27

In Abb. 62 erkennt man, dass auf der einen Seite des Probekörpers ein klassischer Knickbruch und auf der andern Seite ein Querkzugproblem entstanden ist. Teilweise hat die Rippe einen Teil der Platte ausgerissen und es ist ein Loch entstanden. Trotz der vielen Äste (vgl. Abb. 63) und den zum Teil grossen Jahrringbreiten hat die Nummer 27 ein gutes Resultat erzielt. Verglichen mit der Kraft ist die horizontale Durchbiegung sehr hoch bzw. höher als es zum Beispiel bei der Nummer 31 der Fall war. Bei Bruch ist sie gegenüber dem Probekörper 31 um 5mm grösser. Ob sich diese Tatsache auf die Bruchkraft einen Einfluss hat ist schwer zu sagen.



Abb. 62: Bruch Nummer 27

Einen weiteren Einfluss könnte der Leimbruch im unteren Teil des Trigobords haben.



Abb. 63: Äste und Bruch in den Jahrringen (Nr. 27)

Probekörper Nr. 30

Bei der Nummer 30 handelt es sich um einen Schub oder Querkzugbruch mit nachträglichem Knicken der Rippen. Die Resultate der Nummer 30 sind verglichen mit den beiden anderen exzentrischen Versuchen eher tief. Auch hier stellt sich die Frage, ob man diesen Probekörper aus der Wertung nehmen soll, da aber die Rippen geknickt sind, handelt es sich um einen "normalen" Bruch. Die vedrückte Schwelle hat keinen grossen Einfluss auf das Resultat, weil auch die Nummer 31 eine zerquetschte Schwelle aufweist. Für die Aufnahme der Nr. 30 in der Auswertung, kann als letztes Argument, der Unterschied vom Mittelwert abzüglich der Standartabweichung ($309 - 59 = 250$; Bruch war bei 247 kN) aufgeführt werden. D.h. Der Wert des Probekörpers liegt ca. in diesem Rahmen und ist somit zulässig.

Einen Einfluss hat sicher die Auslenkung bezogen auf die Kraft. Die starke Steigung der Kraft-Weg Kurve zeigt, dass der Probekörper eher weich ist. Ein weiterer Grund für die kleine Bruchkraft ist bei der Leimfuge zu suchen. Eine Rippe weist einen Leimfugenbruch auf mehr als die Hälfte der Höhe auf. Mit einer Optimierung der Leimfuge könnte die Bruchkraft erhöht werden.



Abb. 64: Gebrochene Rippen (Nr.30)



Abb. 65: Eindrücke und Bruch der Schwelle (Nr. 30)

Probekörper Nr. 31

Verglichen mit der Nummer 27 hat der Probekörper 31 eine geringe horizontale Verschiebung und Steigung der Kraft-Weg-Kurve. Zu Beginn des Versuchs ist die Kraft Kurve flach, d.h. am Anfang musste die Kraft bei diesem Element Schlupf überwinden. Gemäss der neben stehenden Abbildung hat der Bruch in den Rippen auf der Höhe der Löcher stattgefunden. Die knickende Rippe hat in der Platte durchgehende Löcher ausgerissen. Oben und unten stellt man einen Leimbruch fest. Dieses Manko hat sich möglicherweise Nachteilig auf die Bruchkraft ausgewirkt. Dennoch, der Probekörper hat einen sehr hohen Bruchwert.



Abb. 66: Versagen Nummer 31

Das Zerquetschen der Schwelle, bedingt durch die hohen Kräfte, hat sehr wahrscheinlich keine Konsequenz auf das Resultat. Es ist aber denkbar, dass eine Hartholzschwelle eine kleine Verbesserung bringen könnte. Bleibt noch die Frage, ob man die Resultate statistisch gesehen als Ausreisser betrachten muss. Wie auch bei Nummer 27 wird dieser Bruchwert zur Berechnung des Mittelwerts nicht weggelassen, da der Unterschied zum Mittelwert im Rahmen der Standardabweichung liegt.

Schlussfolgerung exzentrische Versuche

Es können alle Resultate verwendet werden. Wir haben eine Streuung der Resultate von -20% bis +18% bezogen auf den Mittelwert. Auch die Standardabweichung ist gegenüber den zentrischen Versuchen (mit Nummer 20) beachtlich kleiner. Meistens handelt es sich um Querkzug- oder Schubbrüche. Vereinzelt hat man auch ein Knicken in den Rippen festgestellt.

Allgemein

Generell kann festgestellt werden, dass die Versuche mit einer exzentrischen Krafteinleitung die besseren Resultate geliefert haben. In der Berechnung muss diese Tatsache auf jeden Fall berücksichtigt und nach Versagensmodellen gesucht werden. Die Kräfte verlaufen also nicht nur in der Rückwandplatte, sondern werden als Krafftradiatoren auch durch die Rippen geleitet. Dadurch entsteht ein Querkzugproblem. Es kann kein Schubproblem sein, da der Schubnachweis bei Knickstäben nie massgebend wird. Die Druckspannung wird ja mit dem Knickfaktor abgemindert.

An dieser Stelle kann ein kleiner Vergleich mit den Abschlusselementen gemacht werden. Man stellt fest, dass die Randrippe die Versuchsergebnisse stark verschlechtern. Zieht man bei den zentrischen Versuchen der Randrippe den Wert einer Mittelrippe ab, so erhält man noch einen Restwert von 38.5 kN pro äussere Rippe. Das sind nur noch 43 Prozent vom Wert einer mittleren Rippe.

Interessant ist der Vergleich der Flächen. Die Randrippe hat einen Flächenanteil von 74% einer Mittelrippe. Vergleicht man die Trägheitsradien, so stellt man fest, dass

der Trägheitsradius der Randrippe um 16% besser ist als jener der "normalen Rippe". Auch bei den Widerstandsmomenten schneidet die Randrippe leicht besser ab. Theoretisch sind zwei Randrippen also besser als eine Mittelrippe. Weshalb die Versuche gerade das Gegenteil aussagen, kann hier nicht beantwortet werden.

Auswertungsmodelle

Obwohl die Ergebnisse von vier Mittelrippen, aus den genannten Gründen, für einen Laufmeter Trigoboard zusammengezählt werden, kann ein Vergleich, um den Einfluss der Randrippen abzuschätzen, nützlich sein. Diese Gegenüberstellung zeigt auf, wie die erhaltenen Resultate zu bewerten sind.

Je nach dem wie man die Versuchskörper kombiniert, ergeben sich drei verschiedene Auswertungsmodelle. Man erhält mit den drei Werten eine Angabe über die Bandbreite der Resultate.

Auswertungsmodell 1

Die erste Auswertung berücksichtigt die Resultate von drei Mittel- (aus dem Mittel- und Endstück) und zwei Randrippen. Vorgehensweise der Kombination:

1. Umrechnung auf eine Rippe:

Bei den Rippen des Mittelstücks wird das Versuchsergebnis einfach durch zwei geteilt. Die Endstücke können nicht auf diese Art in Randrippe und Mittelrippe aufgeteilt werden. Hier muss das Resultat entsprechend der Fläche verteilt werden. So erhalten die Randrippen tiefere Bruchwerte wie die Mittelrippen.

2. Bilden der Mittelwerte:

Aus den vier bis sechs Werten für die Mittelrippe wurde der Mittelwert gebildet. Dasselbe Vorgehen hat man bei den Randrippen angewendet.

3. Kombination der Resultate:

In diesem Fall werden die Mittelwerte von drei Mittelrippen und zwei Randrippen addiert. Zum besseren Verständnis zeigt Abb. 67 die Kombination der rot-blauen Rippen (End- und Mittelstück) und der blauen Rippen (Endstück) auf.

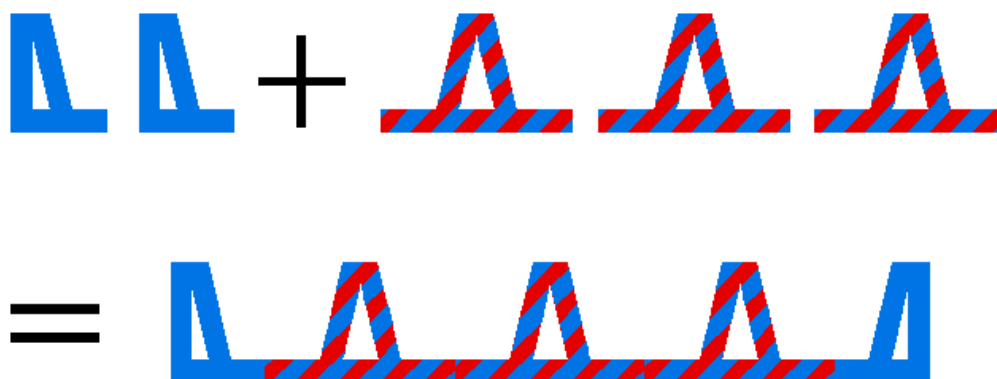


Abb. 67 Auswertung 1

Auswertungsmodell 2

Im Unterschied zur vorhergehenden Kombination wird der Mittelwert der Mittelrippen nur aus den Mittelstückversuchen ermittelt.

1. Bilden der Mittelwerte:

Aus den drei Resultaten für die Mittelstücke wurde der Mittelwert gebildet. Dasselbe Vorgehen gilt auch für die Endstücke.

2. Umrechnung auf eine Rippe:

Bei den Mittelrippen wird der Mittelwert einfach durch zwei geteilt. Die Endstücke können nicht auf diese Art in Randrippe und Mittelrippe aufgeteilt werden. Hier muss man den Mittelwert über die Fläche aufteilen. So erhalten die Randrippen tiefere Bruchwerte wie die Mittelrippen.

3. Kombination der Resultate:

Auch hier werden die Mittelwerte dreier Mittelrippen und zweier Randrippen addiert (rot = Mittelstück, blau = Randrippe).

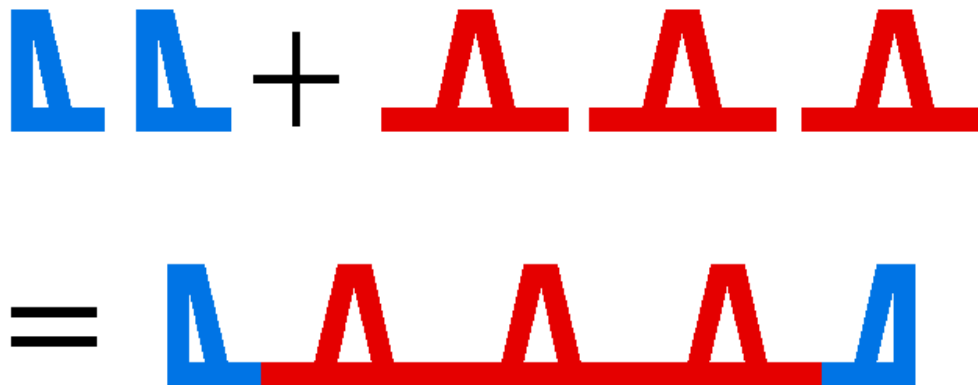


Abb. 68 Auswertung 2

Auswertungsmodell 3

Hier wird wie in Auswertung 2 der Durchschnitt der Probekörper kombiniert. Der Unterschied liegt in der Anzahl Mittelrippen (aus Mittelstück). Sie ist auf eins begrenzt.

1. Bilden der Mittelwerte:

Aus den drei Resultaten für die Mittelstücke wurde der Mittelwert gebildet. Dasselbe Vorgehen gilt auch für die Endstücke.

2. Umrechnung auf eine Rippe:

Bei den Mittelstücken wird der Mittelwert einfach durch zwei geteilt. Das Endstück kann als Ganzes belassen werden.

3. Kombination der Resultate:

Nun wird zweimal der Mittelwerte der Endstücke mit dem Wert für eine Mittelrippe aufaddiert.

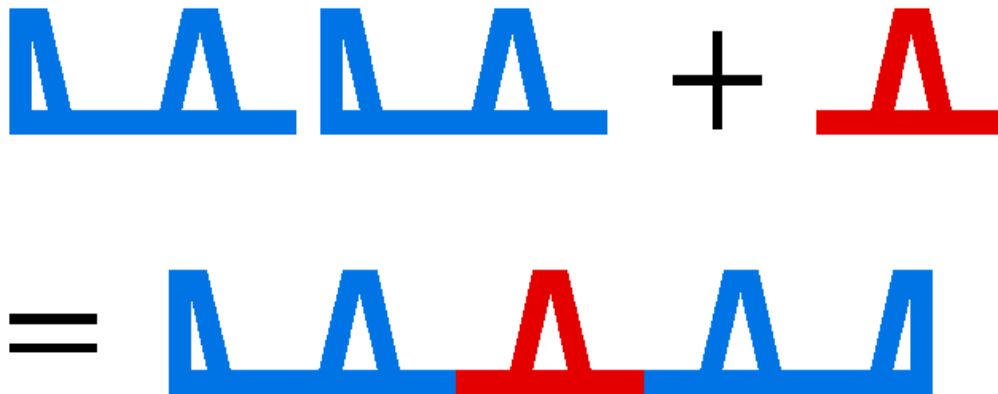


Abb. 69 Auswertung 3

Ergebnisse

Als Ergebnisse aus diesen drei Kombinationen sind je drei Werte für die zentrischen und die exzentrischen Versuche entstanden. In Tabelle 18 ist der schlechteste und beste Wert angegeben. Mit dem Umrechnungsfaktor 4 gelangt man auf die zulässigen Bemessungswerte nach alter Norm SIA 164. Um auf die Design-Werte zu kommen, muss man diese mit dem Faktor 1.5 multiplizieren.

Tabelle 18 Resultate für 1 m¹

kN	Kraft Versuche	Design-Kraft	
Kraft Versuch zentrisch	346 -378	130 -142	100%
Kraft Versuch exzentrisch	484 -603	182 -226	150%

Wertetabellen

Im Gegensatz zu Tabelle 18 wird in Tabelle 19 und Tabelle 20 nur mit den Mittelstücken (2 Rippen) die Resultate für eine Rippe bzw. 4 Rippen bestimmt. Der Unterschied zwischen den zentrischen und den exzentrischen Versuchen ist mit 72% noch grösser als in Tabelle 18 (mit den Auswertungsmodellen 1-3). Die Werte für vier Rippen mit exzentrischer Krafteinleitung sind leicht höher als die Obergrenze aus Tabelle 18. Bei den Berechnungsmodellen ist deshalb darauf zu achten, dass die Ergebnisse leicht unter den Versuchswerten liegen.

Tabelle 19 Resultate mit 4 Rippen

kN	Kraft Versuche	Design-Kraft	
Kraft Versuch zentrisch	358	134	100%
Kraft Versuch exzentrisch	617	231	172%

Tabelle 20 Resultate pro Rippe

kN	Kraft Versuche	Design-Kraft	
Kraft Versuch zentrisch	90	34	100%
Kraft Versuch exzentrisch	154	58	172%

5.3 Berechnungsmodelle

In allen vier Berechnungsmodellen entsprechen die Resultate immer den Bruchwerten einer Mittelrippe.

5.3.1 Modell 1

Bei diesem Berechnungsmodell verläuft die Kraft in Platte und Rippe. Zuerst werden die Spannungen (Biegung und Normalkraft) in der Platte bestimmt, wobei die Querschnittswerte inklusive der Rippen verwendet werden. Anschliessend rechnet man über die Fläche der Platte, den Anteil der Kraft, welche durch die Rückwandplatte fliesst, aus. Als Resultat erhält man, dass 84 % der Normalkraft über den Rücken und rund 16% Prozent durch die Rippe geleitet werden. Diese 16% laufen als Kraftradiator neben dem Loch durch. Die Umleitung erzeugt eine Querkraft Q_z . Mit der Länge 440 mm und der doppelten Rippenbreite muss diese Querkraft aufgenommen werden. Da der Nachweis mit den sehr kleinen Bemessungsspannungen für Querkraft $f_{t,90,d} = 0.1 \text{ N/mm}^2$ geführt wird, ist das Ergebnis eine relativ geringe Bruchkraft von 68 kN. Ein weiterer Nachteil dieser Berechnung ist, dass man die exzentrische Krafteinleitung nicht berücksichtigen kann.

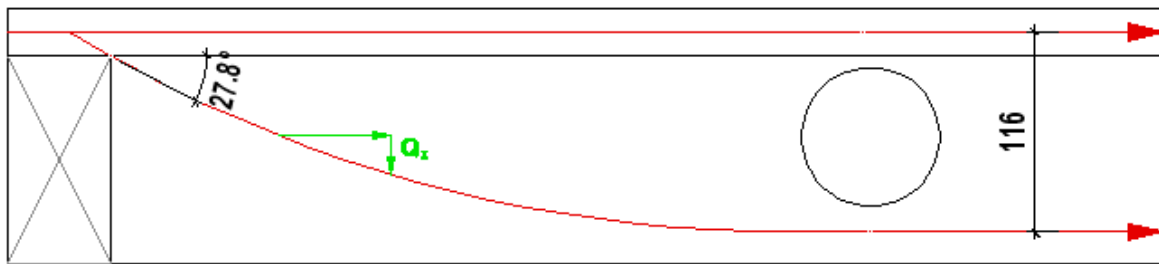


Abb. 70: Kraftverlauf nach Modell 1

5.3.2 Modell 2

Im zweiten Berechnungsmodell geht man von der Annahme aus, dass die Normalkraft nur in der Platte verläuft. Die Rippen dienen lediglich als Knickaussteifung, weshalb das Modell von SIA 265 Seite 53 angesetzt werden darf. Dort kann anhand der Normalkraft die Stabilisierungskraft bestimmt werden.

$$q_d = \frac{N_{id}}{30 * l}$$

Durch diese Formel erhält man eine Linienlast. Umgerechnet auf eine Punktlast ergibt diese Beanspruchung eine Querkraft. Mit dem Nachweis auf Querkraft, wo die Fläche auf die ganze Elementhöhe angesetzt wird, erhält man eine maximale Normalkraft von über 900 kN. Diese Kraft entspricht überhaupt nicht den Versuchsergebnissen und somit ist diese Berechnungsart nicht realitätsgetreu.

5.3.3 Modell 3

Das dritte Modell ist viel realitätsgetreuer. Für die zentrischen Versuche gibt dieses Modell einen Bruchwert von 105 kN und für exzentrische Belastung 143 kN. Mit 105 kN liegt man 17 % über den Versuchswerten und mit 143 kN für die exzentrischen Versuche 7% darunter.

Doch nun zu den Berechnungsschritten: Es wird angenommen, dass die Kraft in der Platte sowie in den Rippen verläuft. Der Abstand zum Querschnittsmittelpunkt multipliziert mit der Bruchkraft ergibt ein Moment. Bei den zentrischen Probekörpern ist dieser Abstand z_0 minus die halbe Plattendicke. Für die exzentrischen Versuche wird diesem Abstand zusätzlich die Distanz e zwischen dem Lasteinführungspunkt und der Plattenmitte abgezogen. Das nun entstandene Moment muss in eine Linienlast umgewandelt werden. Dies erreicht man indem mittels Integraltabellen die Durchbiegung bedingt aus dem Moment und diejenige aus der Linienlast gleichsetzt. Für die Linienlast erhält man folgende Formel:

$$q_d = \frac{9.6 * N * c}{l^2}$$

- l: die tatsächliche Rippenlänge (2380 mm)
- c: der korrigierte Abstand vom Querschnittsmittelpunkt $c = z_0 - 27/2 - e$
- N: Normalkraft mit Abstand e eingeleitet

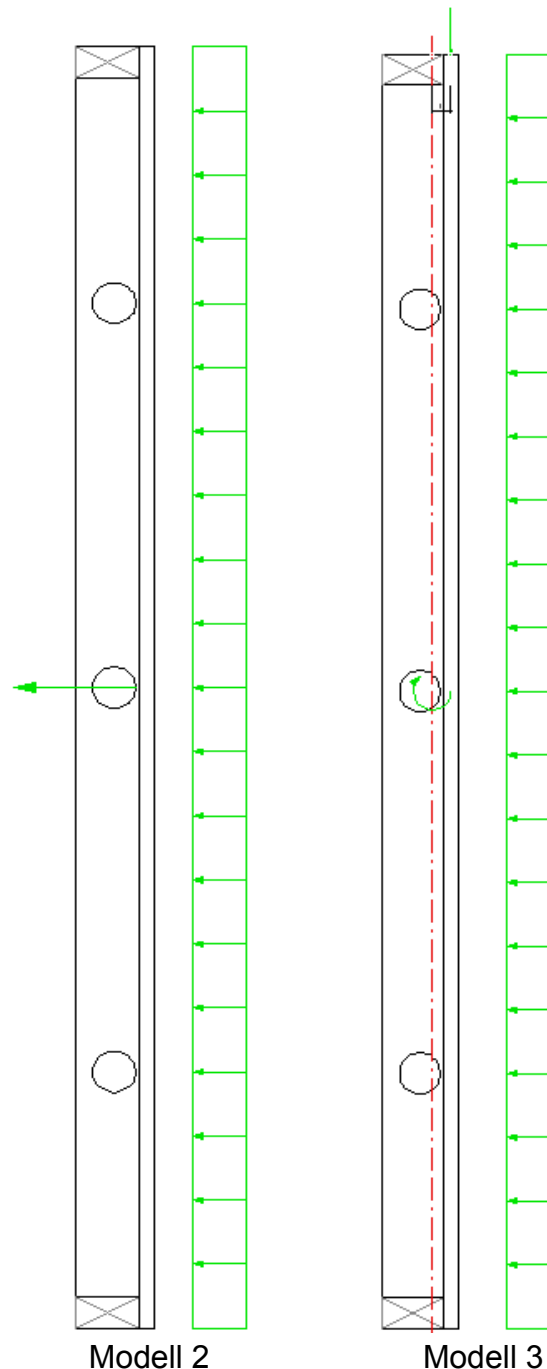


Abb. 71: Berechnungsmodelle 2 und 3

Diese Linienlast muss wieder in ein Moment umgewandelt werden. Schlussendlich kann aus dem Nachweis, Knicken mit Biegung, die maximale Bruchkraft ausgerechnet werden.

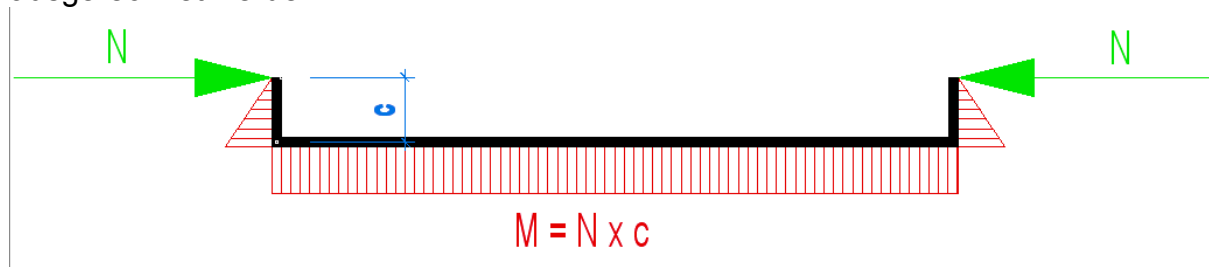


Abb. 72: statisches Modell 3

Der gleiche Vorgang (vgl. Abb. 72) wird auch gewählt, wenn der Knickstab schon Vorverformungen hat und so die Normalkraft nicht im Zentrum angreift.

Um noch den Einfluss der Löcher zu berücksichtigen, wurden die Werte zusätzlich für einen Querschnitt mit Löchern berechnet. Der Mittelwert aus den Berechnungen mit und ohne Loch bildet die zu erwartende Bruchkraft.

5.3.4 Modell 4

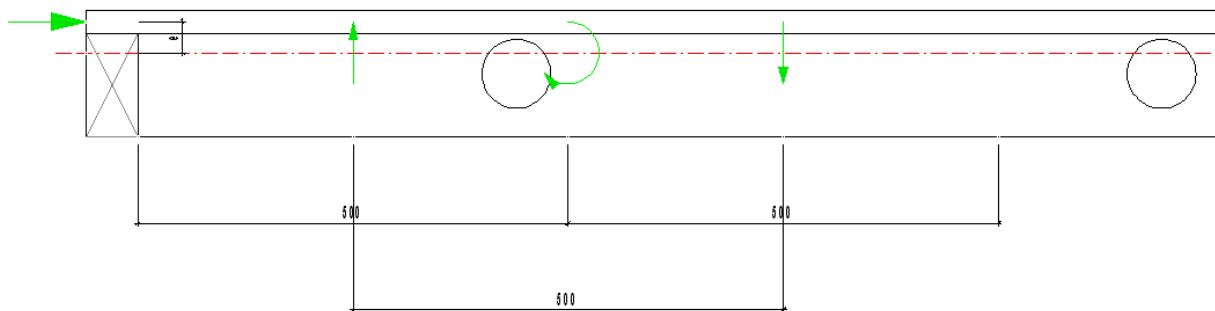


Abb. 73: Moment und Kräfte Modell 4

Weil das Versagen bei den Versuchen meistens auf ein Querkzugproblem zurück zu führen ist, wurde noch eine weitere Berechnung mit einem Querkzugnachweis geführt. Hier wandelt man das Moment, welches aus dem Abstand zum Querschnittsmittelpunkt ($z_0 - 27/2 - e$) und der Normalkraft entsteht, mit einem inneren Hebelarm h von 50 cm in eine Druck und Zugkraft um. Die Zugkraft ergibt ein Querkzugproblem wodurch ein entsprechender Nachweis erforderlich ist. Als Fläche wurde das Produkt aus zwei horizontalen Rippenbreiten ($2b = 2 \cdot 28 \text{ mm}$) und einer Einflusslänge a von wiederum 50 cm gewählt. Weil der innere Hebelarm entsprechend den Versuchsergebnissen gewählt wurde, stimmen die Resultate aus dieser Berechnung mit den Resultaten aus den zentrischen und exzentrischen Versuchen sehr genau überein. Sie betragen 89 bzw. 153 kN pro Rippe

5.3.5 Schlussfolgerungen

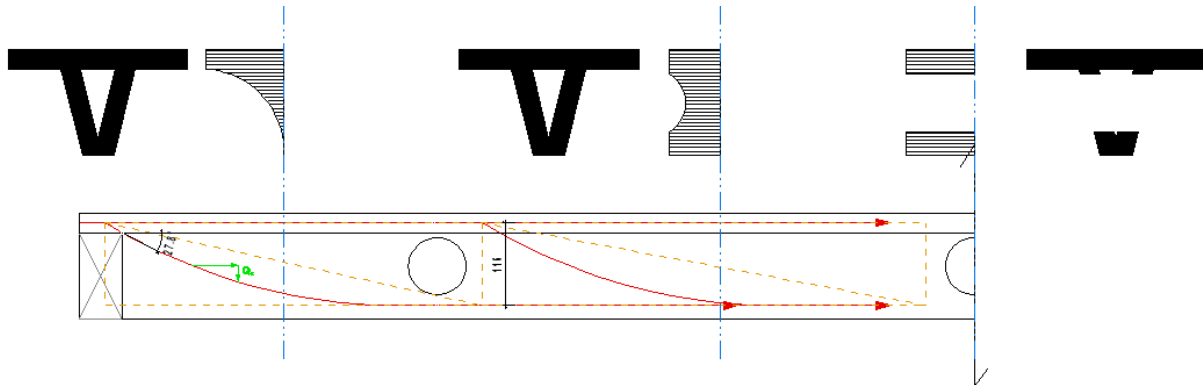


Abb. 74: Fachwerkmodell

Verglichen mit den Versuchsergebnissen sind die Modelle 1 und 2 nicht realistisch. Das Modell 1 könnte man noch erweitern, indem sich die Kraft über eine längere Distanz verteilt. So erhält man gemäss Abb. 74 ein Fachwerkmodell. In dieser Abbildung ist auch ersichtlich, dass sich die Spannungen erst mit einem gewissen Abstand über die ganze Querschnittsfläche verteilen. Verglichen mit dem Modell 3, wo (vgl. Abb. 72) sich ein maximales Moment und somit auch die Spannungen schon am Anfang bilden, scheint die Fachwerksmodellierung bedeutend realistischer. Das Modell 4 hat Ähnlichkeiten mit dem Fachwerkmodell. Hier werden die Spannungen auch erst im Verlauf des Abstandes zum Krafteinleitungsort auf den ganzen Querschnitt verteilt.

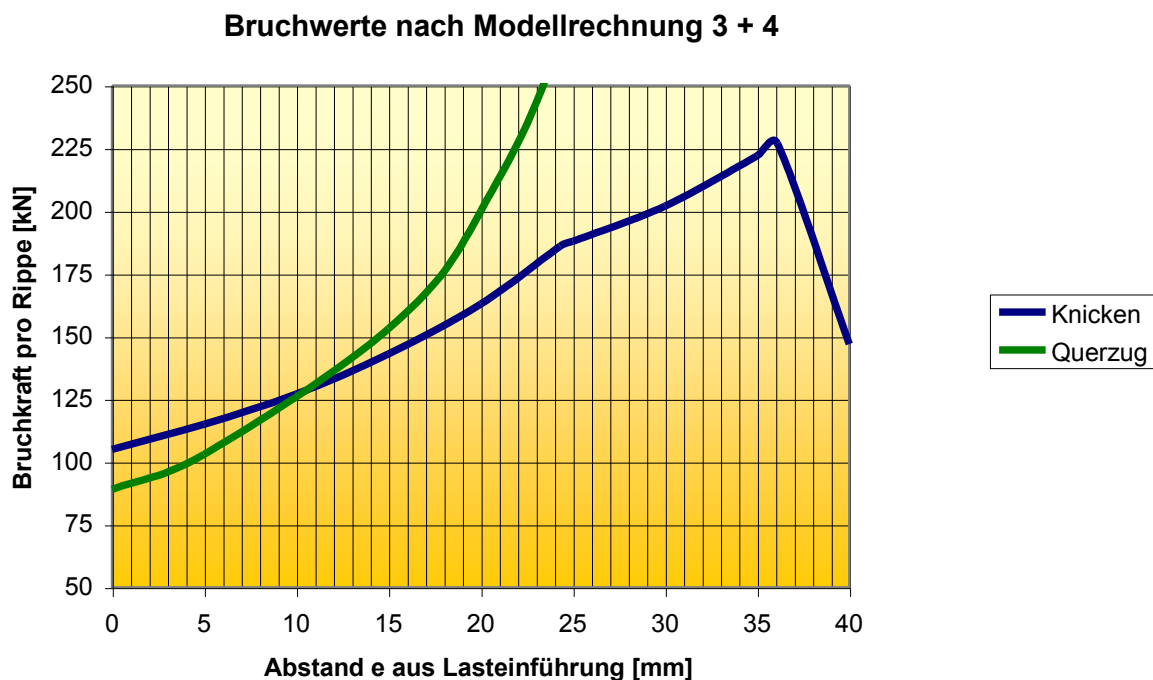


Abb. 75: Bruchwerte für 1 Rippe nach Modell 3+4

Schlussendlich gewählt für die Bemessungstabellen wurden die Modelle 3 und 4. Das Modell 3 wurde zusätzlich herbeigezogen weil die Resultate bei Modell vier mit

einem grösseren Abstand sich praktisch ins unendliche steigern. Somit hat man in der Bemessungsgrafik eine Kombination der beiden Modelle 3+4 gemacht. Für den Nachweis ist jeweils die tiefere der beiden Kurven anzusetzen (vgl. Abb. 75).

Wenn die Kraft im Querschnittsmittelpunkt angreift (d.h. keine Auflagerlast aus der Stockwerksdecke), kann man von einem normalen Knickproblem sprechen. Idealistischerweise muss in diesem Fall die Schwelle die Kräfte übertragen. Ab 36 mm Abstand sinken die Bruchwerte wieder, weil dort die Kraft genau im Querschnittsmittelpunkt angreift

5.4 Bemessungstabelle

5.4.1 Tabelle basierend auf den Versuchsergebnissen

Aus den Versuchsergebnissen kann man eine Tabelle mit den Kräften F_1 und F_2 ableiten (vgl. Abb. 45).

Tabelle 21: Design-Wertetabelle auf den Versuchsergebnisse aufgebaut

Abstand vom Plattenmittelpunkt (e)	Linienlast von Decke (F_2)	Linienlast von übergeordneten Geschossen (F_1)	Totale Last ($F_1 + F_2$)
mm	kN/m	kN/m	kN/m
0	-	134	134
1	2	136	138
2	4	138	142
3	6	140	146
4	8	143	151
5	11	145	156
6	13	148	161
7	16	150	166
8	19	153	172
9	22	157	179
10	25	161	186
11	29	164	193
12	33	168	201
13	37	173	210
14	42	178	220
15	47	184	231

Ablese Beispiel:

Wieder kann das Beispiel aus SIA D 0195 Seite 55 verwendet werden.

Eigengewicht: $G = 1.74 \text{ kN/m}^2$

Nutzlast: $Q = 3.0 \text{ kN/m}^2$

Daraus ergibt sich die Lastkombination:

$$q_d = 1,35 \cdot 1,74 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 3,0 \text{ kN/m}^2 = 6.85 \text{ kN/m}^2$$

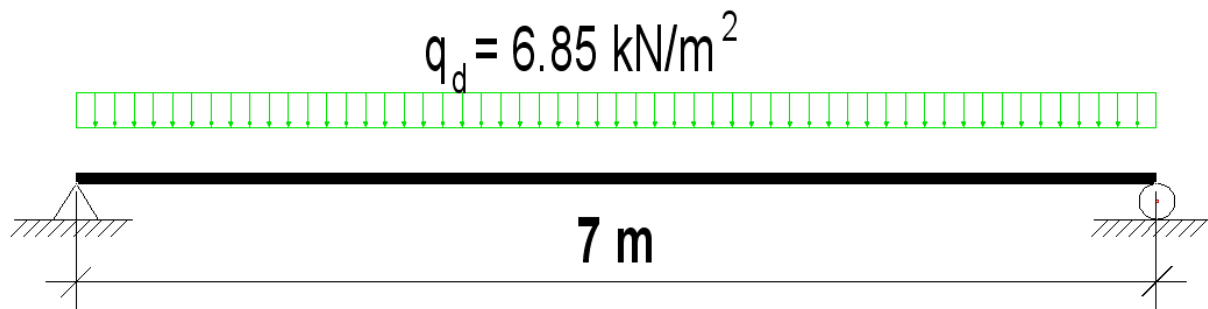


Abb. 76: Lasteinwirkung

Auflagerlinienlast:

$$q_d = \frac{q_d \cdot l}{2} = \frac{6.85 \text{ kN/m}^2 \cdot 7 \text{ m}}{2} = 24 \text{ kN/m}$$

Nun geht man in die zweite Spalte der Tabelle bei F_2 . Die Werte für F_1 zwischen $F_2 = 22$ und 25 kN können linear interpoliert werden. Als höchste Kraft (F_1) aus den übergeordneten Stockwerken kann eine Linienlast von 159 kN/m^2 zusätzlich aufgebracht werden. Das entspricht in unserem Fall dem Gewicht aus knapp 7 zusätzlichen Stockwerken mit einer Auflagerlinienlast von 24 kN/m .

Bemerkungen

In Tabelle 21 sind die Design-Bemessungswerte, welche auf den Versuchsergebnissen aufbauen, dargestellt. Zwischen den Abständen 0 und 15 mm sind die Werte mit dem Berechnungsmodell vier berechnet worden. Es gilt zu beachten, dass bei kleinem Abstand e eine zusätzliche Sicherheit eingerechnet worden ist (vgl. Schlussfolgerungen zu zentrischen Versuche). Die Werte um 15 mm Abstand enthalten keine solche Sicherheit. Grundsätzlich sind aber alle Design-Werte mit Faktor 2.67 ($4/1.5$) abgemindert, d.h. die Bemessungswerte haben mindestens eine vierfache Sicherheit bezogen auf die Bruchkräfte.

5.4.2 Berechnungsverfahren nach Modell 3+4**Vorbemerkungen**

Nach den beiden empfohlenen Berechnungsverfahren können die Trigoboard Elemente in Wänden auch nachgewiesen werden. Es ist aber darauf zu achten, dass bedingt durch den grossen Sicherheitsabzug (Faktor $\frac{1}{4}$), die Designwerte nicht aus der SIA 265 Tabelle 6 verwendet werden dürfen. Es muss ein anderes Verhältnis γ_M/η_M verwendet werden. Dieses Verhältnis errechnet sich nach folgender Formel:

$$\gamma_M/\eta_M = \frac{4}{1.5} \cdot \frac{1.7}{2.27} = 1.98$$

Die charakteristischen Werte müssen mit dem Faktor 1.98 abgemindert werden. Für die tabellierten Designwerte kann somit der Abminderungsfaktor $1.7/1.98 = 0.86$ als Umrechnung dienen.

Vorgehen beim Führen des Nachweises

Zuerst muss der Krafteinleitungsabstand e bestimmt werden. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$e = \frac{F_2 * 73.5}{F_2 + F_1}$$

F_2 : Die Linienlast aus der gerade darüber liegenden Decke [kN/m¹]

F_1 : Die Linienlast aus den übergeordneten Decken [kN/m¹]

e : Abstand der Resultierenden Kraft von der Plattenmitte [mm]

Anschliessend müssen die zwei Nachweise Querkzug und Interaktion Knicken/Biegung geführt werden. Mit einem Abstand $e > 12\text{mm}$ wird der Knicknachweis massgebend und für $e < 12\text{mm}$ der Querkzugnachweis. Ab $e > 24\text{mm}$ ($c = 0$ ⁴) wirkt keine innere Biegung mehr auf das Trigoboard. Es ist ein reiner Knicknachweis erforderlich, falls keine horizontale Windkraft auf die Wandelemente wirkt.

Für die Interaktion Druck mit Biegung sind die mittleren Querschnittswerte aus Tabelle 22 zu verwenden.

Tabelle 22: mittlere Querschnittswerte

mm ²	44'621
mm ⁴	91'017'228
mm	103
mm	44
mm ³	881'139
mm	2'380

Um das Moment zu berechnen müssen folgende Formeln eingesetzt werden:

$$q_d = \frac{9.6 * N * c}{l^2}$$

$$M_d = q_d * l$$

l : die Tatsächliche Rippenlänge (2380 mm)

c : der korrigierte Abstand vom Querschnittsmittelpunkt, $c = z_o - 27/2 - e$

N : resultierende Normalkraft ($F_1 + F_2$) mit Abstand c eingeleitet

q_d : äquivalente Linienlast zur Berechnung von M_d

M_d : Moment dass in die Interaktion Knicken mit Biegung einfliesst

Schlussendlich können mit dem üblichen Verfahren nach SIA 265 der Knickbeiwert und die Knickspannung bestimmt werden. Für die bezogene Schlankheit λ_{rel} ist die Formel 35 (Kantholz) zu verwenden. Der eigentliche Nachweis wird gemäss Formel 37 geführt.

⁴ z_o von Querschnitt mit Loch erreicht

Die Querkzugspannung wird mit folgender Formel bestimmt:

$$f_{t,90,d} = \frac{Md}{h} * \frac{1}{a * 2b}$$

wobei:

$$M_d = (F_1 + F_2) * (z_o - \frac{27}{2} - e)$$

a : Länge der Querkzugsspannungszone, generell 500 mm

b : horizontale Rippenbreite, hier $b = 28$ mm

h : innerer Hebelarm, generell 500 mm

M_d : Moment aus Lastenführung

z_o : oberer Hebelarm ohne Loch, hier $z_o = 49.6$ mm

Der Nachweis ist eine Gegenüberstellung der Spannungen.

Bei hohen Lasten aus der gerade über dem Wandelement liegenden Decke, wird ein Querkdrucknachweis erforderlich sein. Als Querkdruckfläche kann $A = 20287 \text{ mm}^2$ verwendet werden. Natürlich sind hier die "normalen" Querkdruckspannungen gemäss SIA 265 Tabelle 6 anzusetzen.

Ein Beispiel für den Nachweis eines Trigobaord-Elementes ist im Anhang zu finden.

5.4.3 Vereinfachter Nachweis

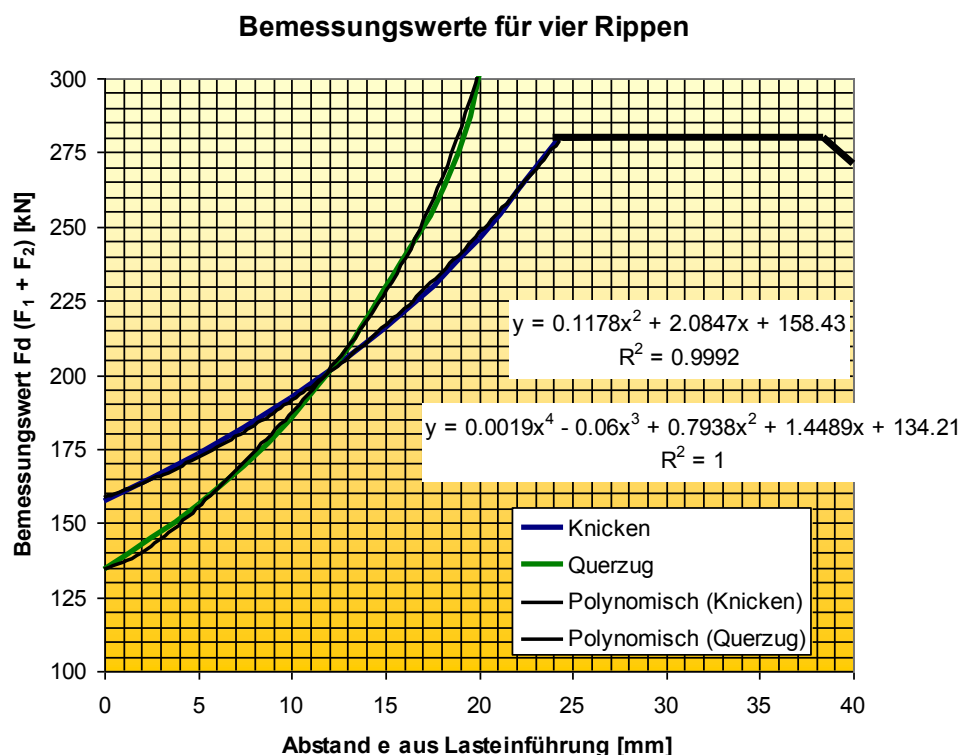


Abb. 77: Bemessungswerte basierend auf den Berechnungsmodellen

Ablesebeispiel

Wieder kann das Beispiel aus SIA D 0195 Seite 55 herbeigezogen werden.

Eigengewicht: 1.74 kN/m^2

Nutzlast: 3 kN/m^2

Daraus ergibt sich die Lastkombination:

$$q_d = 21,35 \cdot 1,74 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 3,0 \text{ kN/m}^2 = \underline{6.85 \text{ kN/m}^2}$$

Auflagerlinienlast:

$$q_d = \frac{q_d \cdot l}{2} = \frac{6.85 \text{ kN/m}^2 \cdot 7 \text{ m}}{2} = \underline{24 \text{ kN/m}}$$

Man nimmt an, dass das Haus insgesamt 8 Etagen hat. Das Dach wird mit einer Linienlast von 15 kN/m^1 in Rechnung gestellt (Nutzlast ist Leiteinwirkung). Deshalb ist $F_1 = 6 \times 24 \text{ kN/m}^1 + 15 \text{ kN/m}^1 = 159 \text{ kN/m}^1$. Die Nutzlast könnte für mehrere Etagen gemäss SIA 261 noch abgemindert werden. In diesem Beispiel wird aber darauf verzichtet.

Nun rechnet man nach folgender Formel den Abstand e aus:

$$e = \frac{F_2 \cdot 73.5}{F_2 + F_1} = \underline{9.6 \text{ mm}}$$

Anschliessend kann in der Abb. 77 die maximale Bemessungskraft F_d abgelesen und diese mit den vorhandenen Lasten verglichen werden. Es ist auch möglich in den Formeln den Abstand e einzugeben und den Bemessungswert genau auszurechnen.

$$\underline{F_d = 183 \text{ kN/m} = F_1 + F_2 = 183 \text{ kN/m}}$$



Bemerkungen zur Abb. 77

Die beiden Kurven schneiden sich bei 202 kN und 12 mm Abstand. Unterhalb $e = 12 \text{ mm}$ muss die Kurve für Querzug und oberhalb die Kurve für Knicken verwendet werden. Zwischen $e = 24 \text{ mm}$ und $e = 36 \text{ mm}$ wird ein konstanter Wert $F_d = 280 \text{ kN/m}^1$ verwendet. Ist der Abstand e grösser als 36 mm gibt es ein Biegemoment, das in die andere Richtung wirkt. Verwendet man die Formeln, so setzt man für x den Abstand e ein. Die obere Formel gilt für $e > 12 \text{ mm}$ und die etwas kompliziertere untere Formel für $e < 12 \text{ mm}$. Beide Formeln gelten nur bis $e = 24 \text{ mm}$. Die Abstände für $e = 24$ und 36 mm ergeben sich aus dem Querschnittswert z_o . Bei 24 mm greift die resultierende Kraft ($F_1 + F_2$) im Querschnittsmittelpunkt mit den Installationslöchern und bei 36 mm ist der Mittelpunkt ohne Löcher erreicht.

5.5 Fazit

5.5.1 Allgemein

Die Resultate sind grundsätzlich mit Vorsicht zu geniessen. Das bestätigt die Standardabweichung von bis zu 40% des jeweiligen Mittelwerts. Mit umfangreicheren Versuchen kann man die Bemessungstabelle und die Nachweise nach den Berechnungsmodellen 3+4 bestätigen oder sogar erhöhen. Damit man mit der vorliegenden Versuchsreihe auf abgesicherte Bemessungswerte kommt, sind Sicherheiten von mindestens Faktor vier und zusätzliche Sicherheitsdifferenzen in den Mittelwerten und Berechnungsverfahren eingebaut.

Ganz sicher darf man davon ausgehen, dass die Stockwerksaufteilung sinnvoll ist. Die Versuche mit einem Abstand $e > 0$ mm vom Mittelpunkt der Rückwandplatte haben eindeutig bessere Resultate geliefert.

Für weitere Versuche wird empfohlen, mit mehr Probekörpern zu arbeiten. Dabei ist auch hier die Stockwerksaufteilung mit zentrischer und exzentrischer Krafteinleitung zu simulieren. Nach Möglichkeit sollen drei Versuchstypen durchgeführt werden. Als Abstand e kann 0, 10 und 20 mm gewählt werden. Bei neuen Versuchen muss darauf geachtet werden dass der oberste Punkt der Elemente gehalten ist, damit nicht ein zusätzliches Moment entsteht. Ist dieser Versuchsaufbau nicht möglich, so muss mindestens die horizontale Auslenkung gemessen und das daraus entstehende Moment in Rechnung gestellt werden.

5.5.2 Optimierungsvorschläge

Die Leimfuge zwischen Rippe und Platte ist noch weiter zu optimieren. Auch die Massgenauigkeit der Rippe muss einer Qualitätskontrolle unterzogen werden. Es darf kein Schlitz zwischen Schwelle und Rippe entstehen, ansonsten werden die Bruchwerte verfälscht.

Um die statischen Eigenschaften des Trigoboard-Wandelements zu verbessern, kann man die Rippenbreite von 27 mm erhöhen. Im Gegenzug könnte man, um Material zu sparen, die Dicke der Rückwandplatte reduzieren. Es gilt jedoch zu beachten, dass in diesem Fall der Abstand c zum Querschnittsmittel grösser wird und das daraus entstehende Moment die Bruchwerte verschlechtert. Ob das Ersetzen der Fichtenschwelle durch eine Hartholzwelle Verbesserungen der Bruchwerte bringt, ist nicht ganz klar. Die Versuche haben gezeigt, dass die Schwelle erst bei hohen Lasten eingedrückt wird. Da wir ja mit den Bemessungswerten weit unter den Bruchlasten arbeiten, ist davon auszugehen, dass auch eine Nadelholzwelle die Lasten, ohne ersichtliche Deformationen, überträgt.

6. Marketing- und Verkaufsschlagwörter

6.1 Einleitung

Um sich im heutigen Markt von anderen Anbietern differenzieren zu können, ist eine durchdachte Marketing- und Verkaufsstrategie unumgänglich. Die Strategie ist jedoch nur so gut, wie die Fakten, welche für das Produkt sprechen. Aus diesem Grunde hat man diese Schlagwörter ermittelt.

6.1.1 Ziele der Schlagwörter

Die Schlagwörter haben das Ziel, das Produkt von anderen Produkten abzuheben. Diese sollen den Verkauf und die Vermarktung des Produktes unterstützen. Die Industriepartner wünschen sich vier Schlagwörter, mit denen das Produkt beschrieben werden kann.

6.1.2 Methodik

Die Schlagwortsuche wird mit Hilfe der Industriepartner (Produzent und Ingenieur), Architekten und Studenten ermittelt. Dies hat den Vorteil, dass das Produkt aus den verschiedenen Sichtweisen der jeweiligen Benutzergruppen (Produzent, Planer) durchleuchtet wurde. In der Phase der Analyse werden nicht nur die positiven, sondern auch die negativen Eigenschaften vom Erzeugnis gesucht.

Nachdem die Schlagwortsuche abgeschlossen war, hat man die aussagekräftigsten Wörter unter dem Abschnitt „Marketing und Verkaufsargumente“ aufgeführt.

6.2 Analyse der Schlagwörter

6.2.1 Positives

Ökologische Sicht

- Da das Trigoboard aus Holz besteht, hat man ein angenehmes Klima im Gebäude.
- Beim Trigoboard wird formaldehydfrei gebaut, d.h. es kommen nur Massivholzplatten und keine Holzwerkstoffe zum Einsatz.

Preis

- Das Trigoboard liegt im Preissegment von Lignatur und Lignotrend. Die Vorteile einer günstigen Installation und einfacher Wartung (flexible Innenwandbekleidungen) liegen auf der Hand.
- Das Trigoboard benötigt keine grossen Verbindungsmittel.
- Wirtschaftlicher Vorteil bei der Anschaffung: Die Einschichtplatten aus Seitenware sind billiger als die Dreischichtplatten.

Planung

- Durch die klar getrennten Schichten, kann die Luftdichtigkeit problemlos erreicht werden. Bei der Bauphysik treten keine Probleme auf, da es keine Wärmebrücken gibt.
- Das Trigoboard lässt sich ohne Probleme mit anderen Produkten, wie mit dem Deckensystem Lignatur, kombinieren.
- Der bedeutendste Vorteil ist die freie Planung. Es gibt viele Architekten, welche die Finger von Holz lassen. Der Grund liegt in der aufwendigen Planungsphase der Anschlüsse und Installationen bei herkömmlichen

Systemen. Dies fällt nun weg, da nach dem Errichten des Gebäudes an jedem beliebigen Ort Steckdosen und Rohre angebracht werden können. Das Trigoboard ist rasterlos. Dadurch sind Durchbrüche an jedem Ort frei wählbar. Fenster-, Türausschnitte etc. sind bei der Planung an kein Rastermass gebunden.

Lastabtragung

- Das Dreieck hat den Effekt, dass es nicht so anfällig auf Knicken oder Kippen ist (Bsp. Biege-Druck). Bei den Biegebalken hat man jedoch keine statischen Vorteile. Generell betrachtet hat das Dreieck auf die Statik einen geringen Einfluss. Der Grund ist in der geringen Bauteilabmessung zu suchen. D.h. eine Rippenplatte weist auf Biegung praktisch die gleiche Steifigkeit auf, da ein Ausknicken des Rippe praktisch unmöglich ist.
- Ein Systemvorteil sind die aufgelösten Bretter. D.h. die Trigoelemente haben einen kleineren Achsabstand als beispielsweise die Rippen einer Rippendecke. Dadurch können sie grössere Lasten quer zur Tragrichtung abtragen als Rippendecken. Dieser Effekt wird auch in der Norm SIA 265 mit dem Faktor k_{sys} berücksichtigt.
- Die Lasten aus den oberen Stockwerken werden über den Rücken (Platte) abgetragen. Diese Platten stehen immer direkt aufeinander. Somit ist in der Konstruktion kein Querholz vorhanden. Die Setzmasse werden dadurch minimal. Dies ist vor allem im mehrgeschossigen Holzbau ein grosser Vorteil.

Allgemein

- Das Trigoboard kann als verlorene Schalung eingesetzt werden. So muss die Installationsebene nicht im Voraus geplant werden (Bsp. bei Decken mit Spots). Ein anbringen der Spots kann individuell gemacht werden. Sobald die Installation abgeschlossen ist, wird der Beton eingebracht.
- Für eine Zimmerei, welche keinen Elementbau fertigen können, ist das Produkt besonders interessant. Die Trigoboards ermöglichen einen „Elementbau“ und haben den Vorteil, dass sie durch die geringen Abmessungen leicht transportiert werden können.

6.2.2 Negatives

Allgemein

- Da die Installationsebene normalerweise keine Dämmung aufweist, entstehen dickere Wandaufbauten.
- Durch die nah beieinander stehenden Rippen, wird im Segment des Privatbaus, sehr viel Holz eingesetzt, dass vermutlich keine zusätzlichen statischen Vorteile bringt. Es ist jedoch zu vermerken, dass bei einem grösseren Rippenabstand Vorteile wie eine rasterlose Planung wegfallen können.
- Das führen von Nachweisen kann, aufgrund der komplexen Grundfläche, zu Schwierigkeiten führen. Für den Ingenieur sind deshalb Bemessungstabellen, wie sie in dieser Arbeit erstellt wurden von grosser Bedeutung.

6.2.3 Marketing- und Verkaufsargumente

Schlagwort 1: Freie Planung

Viele Architekten lassen den Holzbau wegen seiner intensiven Planung in der Anfangsphase auf der Seite und berücksichtigen Bausystem aus anderen Materialien wie Beton oder Stahl. Mit dem Trigoboard bricht ein neues Zeitalter an. Dieses Wandsystem ist an keinen Raster gebunden, was eine freie Planung wie bei Beton oder Stahl erlaubt. Der Architekt muss sich keine Gedanken mehr machen, wo er die Tür- oder Fensteröffnung setzen kann.

Beim Architekten fallen dadurch auch keine Mehrkosten infolge einer genau durchdachten Planung an, wie man sie beispielsweise beim Ständerbau kennt.

Schlagwort 2: Kombination beliebiger Bausysteme

Die Geometrie des Trigoboard erlaubt, dank seiner klar getrennten und geradlinig geführten Abschlüsse, eine einfache und problemlose Kombination aller Bausysteme. Ohne jeglichen Mehraufwand können andere Systeme eingebracht werden, welchen in den entsprechenden Fällen ihre Berechtigungen haben.

So werden Kosten eingespart und ein unnötiger zusätzlicher Aufwand (bei Planung oder Errichtung des Gebäudes) fällt weg.

Schlagwort 3: Freie Installation

Anschlüsse (Steckdosen, Wasser, etc.) müssen bei der Planung nicht berücksichtigt werden. Sie können nach Errichtung des Gebäudes an jedem beliebigen Ort eingebaut werden

Bauherrschaften können sich auf Plänen oftmals schlecht vorstellen, wo sie Steckdosen oder auch Wasseranschlüsse haben wollen. Mit dem Trigoboard kann dies nach Fertigstellung des Rohbaus gemacht werden.

Für den Architekten und Holzbauer fallen aufwändige Arbeiten weg. Gleichzeitig fällt das Risiko, dass Anschlüsse am falschen Ort eingebaut oder gar vergessen werden, vollständig weg.

Schlagwort 4: Kein Querholz

Das System Trigoboard verlangt nach einer mehrgeschossigen Bauweise. Der vertikale Kraftfluss wird über die Plattenrücken gemacht. Da diese direkt aufeinander stehen und die Holzfasern in Richtung des Kraftflusses verlaufen, hat man kein Querholz in der Konstruktion. Das Gebäude weist somit ein minimiertes Schwund- oder Quellmass auf.

7. Schlussfolgerungen

7.1 Nutzen der Arbeit

Die Arbeit liefert eine Grundlage zur Bemessung von Trigoboard-Wandelementen. Diese Bemessungswerte in Tabellenform oder mit Nachweisen erleichtern dem bearbeitenden Ingenieur die Planung. Damit keine Missverständnisse auftreten, wurden Bemessungsbeispiele aufgeführt. Daneben sind einige Überlegungen zu weiterführende Versuche entstanden. Weiter können die Optimierungsvorschläge bei den zwei untersuchten Beanspruchungen direkt in die Produktion der Trigoboardelemente einfließen.

Neben der Untersuchung der Tragfähigkeit, ist das System auf seine Stärken und Schwächen durchleuchtet worden. Das Ergebnis sind Schlagwörter, welche bei Marketing und Verkauf das System Trigoboard von anderen abheben und seine Vorteile aufzeigen soll.

7.2 Rückblick und Ausblick

Die gesteckten Ziele wurden praktisch vollständig erreicht. Der Weg zu den Zielen war jedoch sehr steinig.

Angefangen hatte alles mit der kurzen Lieferzeit, welche die Produzenten einhalten mussten. Die Studenten und ihre Betreuer hatten zu wenig Zeit, den Versuchsaufbau für den Schub als auch fürs Knicken durchzudenken. Dadurch konnten wichtige Fragen, wie das Anbringen der Zuglasche beim Schubflussversuch, nicht vollständig geklärt werden, was spätere Auswirkungen auf die Versuche hatte.

Bei weiteren Untersuchungen der Tragwiderstände auf Schub und Knicken ist darauf zu achten, dass der Versuchsaufbau genau durchdacht wird. Beim Schub stellt sich generell das Problem, dass die vorhandenen Prüfvorrichtungen, für das Durchführen von Schubversuchen nicht geeignet sind. Für eine exakte Untersuchung, müssten neben der horizontalen Einwirkung (Wind, Stabilisierungskräfte, etc.), auch vertikale Lasten (aus den oberen Stockwerken) simuliert werden. Diese vertikalen Lasten geben der Wand einen zusätzlichen Widerstand gegen das Stabilitätsproblem.

Das Knicken im Allgemeinen ist sehr schwierig praxisgerecht zu simulieren. Der Grund ist bei der Anordnung der beiden Kräfte (Auflast aus Decke, Normalkräfte aus oberen Etagen) zu suchen. Diese liegen sehr nahe beieinander, weshalb nur mit einem Zylinder gearbeitet werden konnte. Ein weiteres Problem stellte der obere Punkt bei der Prüfung dar. Durch den gelenkigen Zylinder konnten die Wandelemente oben nicht gehalten werden. Bei weiteren Versuchen muss zwingend nach einer Lösung gesucht werden, da eine Verschiebung ein zusätzliches Moment auslöst und dieses nur schlecht abschätzbar in Bezug auf die Ergebnisse ist.

Damit die ermittelten Werte auch statistisch ihre Gültigkeit erlangen, müssen noch weitere Versuche mit einer Minimalanzahl von 20 Stück durchgeführt werden.

Dabei sind, wie oben erwähnt, die Schubflussversuche mit den Einwirkung aus den oberen Stockwerken durchzuführen. Die Schritte zur Umsetzung sind oben beschrieben.

Beim Knicken sind die Versuche mit einem Auflager durchzuführen, welches horizontal gehalten ist. Dies würde der Praxis entsprechen, da die Wände meistens durch eine Decke fixiert sind.

8. Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schubflussprobe mit Entlastungsnut	10
Abb. 2: Versuchsaufbau Schubfluss	11
Abb. 3: Ausbildung der Zugverbindung	11
Abb. 4: Versuchsaufbau	11
Abb. 5: Messgerät „Videokamera“	12
Abb. 6: Messpunkte "Videokamera"	12
Abb. 7: Grafik Versuchsaufbau	14
Abb. 8: Steigung w/F	16
Abb. 9: Kraft-Zeit-Diagramm, Schubfluss ohne Nut	17
Abb. 10: Weg-Zeit-Diagramm, Schubfluss ohne Nut	17
Abb. 11: Kraft-Weg-Diagramm, Schubfluss ohne Nut	18
Abb. 12: Kraft-Zeit-Diagramm, Schubfluss mit Nut	19
Abb. 13: Weg-Zeit-Diagramm, Schubfluss mit Nut	20
Abb. 14: Kraft-Weg-Diagramm, Schubfluss mit Nut	20
Abb. 15: Nr.1 Leimfugenbruch der Platte	22
Abb. 16: Nr.1 Bruch greift in die Platte über	22
Abb. 17: Nr.2 Lage des Versagens	22
Abb. 18: Nr.2, Bruch des Rückens, oberhalb der „Rippe“	23
Abb. 19: Nr.3 Lage des Bruchs	23
Abb. 20: Nr.3 Bruchbild	23
Abb. 21: Nr.3 Schub- Querkzugversagen	23
Abb. 22: Kraftfluss in der Rückenplatte (ohne Entlastungsnut)	23
Abb. 23: Mittelrippe mit Entlastungsnut	24
Abb. 24: Idealisierter Kraftfluss in der Rückenplatte (mit Entlastungsnut)	24
Abb. 25: Nr.4 Rippenbruch auf Schub	25
Abb. 26: Nr.4 Bruchverlauf in der Rippe	25
Abb. 27: Nr.5 Schubbruch in der Rippe	25
Abb. 28: Nr.5 Verschiebung an den Enden der Rippe	25
Abb. 29: Nr.5 Schubbruch	25
Abb. 30: Nr.6 Verlauf des Schubversagens	26
Abb. 31: Nr.6 Schubbruch in Elementmitte	26
Abb. 32: Grundriss Bemessungsbeispiel	26
Abb. 33: Entlastungsfase am Ende anstelle der Entlastungsnut in Elementmitte	27
Abb. 34: Idealer Versuchsaufbau für den Schubfluss	28
Abb. 35: zentrische Krafteinleitung	30
Abb. 36: exzentrische Krafteinleitung	30
Abb. 37: Versuchsaufbau	30
Abb. 38: Knickversuchprobe (Ausgangslage)	31
Abb. 39: Mittelstück mit 2 Rippen	31
Abb. 40: Endstück mit Rippe und Randrippe	31
Abb. 41: Prüfvorrichtung	32
Abb. 42: Kraftaufnahme	32
Abb. 43: Druckbalken mit Stiften	32
Abb. 44: Krafteinleitung	33
Abb. 45: zwei Kräfte mit Abstand	33
Abb. 46: Aufbau Bodensystem	33

Abb. 47: Aufzeichnung der Verschiebung.....	35
Abb. 48 Versuchswerte Abschlusselemente.....	37
Abb. 49 Knicklinie bei Bruchlasten	39
Abb. 50 Versuchsablauf zentrisch	39
Abb. 51 Knicklinie bei Bruchlasten	40
Abb. 52 Weg in Funktion der Kraft (zentrisch).....	40
Abb. 53: Versuchsablauf exzentrisch	41
Abb. 54: Knickkurven bei Bruchlast	42
Abb. 55 Weg in Funktion der Kraft (exzentrisch)	42
Abb. 56 Versagen von Nr. 20	43
Abb. 57 Eindruck in Schwelle (Nr. 20)	43
Abb. 58 Versagen Nr. 22	44
Abb. 59 Probekörper Nr. 22.....	44
Abb. 60: Bruchbild von Nr. 23.....	44
Abb. 61: unkorrigierte Knicklinie bei Bruch (Nr.23)	45
Abb. 63: Bruch Nummer 27	46
Abb. 62: Äste und Bruch in den Jahrringen (Nr. 27)	46
Abb. 64: Gebrochene Rippen (Nr.30)	47
Abb. 65: Eindrücke und Bruch der Schwelle (Nr. 30)	47
Abb. 67 Auswertung 1	49
Abb. 68 Auswertung 2	50
Abb. 69 Auswertung 3	51
Abb. 70: Kraftverlauf nach Modell 1.....	52
Abb. 71: Berechnungsmodelle 2 und 3.....	53
Abb. 72: statisches Modell 3.....	54
Abb. 73: Moment und Kräfte Modell 4	54
Abb. 74: Fachwerkmodell	55
Abb. 75: Bruchwerte für 1 Rippe nach Modell 3+4	55
Abb. 76: Lasteinwirkung	57
Abb. 77: Bemessungswerte basierend auf den Berechnungsmodellen.....	59

8.2 Literaturverzeichnis

- 1) DIN EN 594, Holbauwerke Prüfverfahren; Deutsches Institut für Normung E.V.; Beuth Verlag, Berlin (1995)
- 2) SIA 265; Swisscodes und Sachbearbeiter, SIA Zürich; SIA Zürich, Zürich (2003)
- 3) Trigoboard; Wettstein Stephan, Herzog Marc-André; Hochschule für Architektur Bau und Holz HSB, Biel (2003)
- 4) Dokumentation D0195; Swisscodes und Sachbearbeiter, SIA Zürich; SIA Zürich, Zürich (2003)
- 5) DIN 1052, Holzbau;

9. Zwingende Formen

Wir versichern, dass wir diese Semesterarbeit selbständig und ohne jegliche Hilfe verfasst haben, nicht anderweitig als Semester- oder Diplomarbeit vorliegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemässe Zitate als solche gekennzeichnet haben.

Wir und die Industriepartner haben die Bestimmungen der HSB über Rechte und Pflichten namentlich über Urheber- und Nutzungsrechte, das Genehmigungsverfahren für Publikationen sowie Sperrfristen, zur Kenntnis genommen.

Ort und Datum:

Biel, 20.6.2005

Unterschrift:

Reinhard Markus

Rüdisühli Martin