

Diploma Thesis

Development of a building kits for walls support by structural modelling within RFEM

submitted in satisfaction of the requirements for the degree
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Diplomarbeit

Produktentwicklung einer Holzsystemwand Support durch baustatische Modellierung mittels RFEM

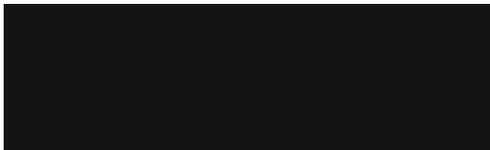
ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Lukas Fink, BSc

Matr.Nr.: 01607481

Betreuung: Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Georg Hochreiner**
Institut für Mechanik und Werkstoffe der Strukturen (IMWS)
Forschungsbereich
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/202, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2023



Abstract

The aim of this work is to simulate a wall construction out of timber which was developed by the *FRITZ EGGER GmbH und Co. OG* company (hereinafter referred to as EGGER) by using an FE model. A general understanding of the entire load-bearing structure and the occurring failure mechanisms is to be obtained. The force flow of the construction is to be understood conceptually and generated load redistributions due to non-linear load-bearing behaviour are to be included in the modelling in order to finally be able to obtain a model that is as close to reality as possible within the framework of a practical construction design.

The structural modelling and realisation is carried out by means of finite elements with the help of the software RFEM of the manufacturer Dlubal in version 5.28. The choice of a commercially used software, which is also often used in the private sector in many engineering offices, was made deliberately in order to be able to establish a certain "connection to practice" right from the beginning.

In order to validate the calculation results, a load test of an exemplary system wall was carried out prior to this work. The destroyed test specimen was cut into parts in order to be able to study the fracture mechanisms that occurred inside.

After the virtual reconstruction of the tests already carried out, a variant study is carried out with the help of numerical calculation models and the model parameters obtained from the validation.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es eine, von der Firma *FRITZ EGGER GmbH und Co. OG* (im weiteren als Firma EGGER bezeichnet) favorisierte Wandkonstruktion in Holzbauweise anhand eines FE Modells zu simulieren. Hierbei soll ein allgemeines Verständnis der gesamten Tragstruktur sowie auftretender Versagensmechanismen erlangt werden. Der Kraftfluss der Konstruktion soll konzeptionell verstanden werden und generierte Lastumlagerungen durch nicht lineares Tragverhalten sollen in die Modellierung mit einfließen um schlussendlich ein möglichst realitätsnahes Modell im Rahmen einer baupraktischen Bemessung erhalten zu können.

Umgesetzt wird die baustatische Modellbildung und Realisierung mittels Finiten Elementen mit Hilfe der Software RFEM des Herstellers Dlubal in der Version 5.28. Die Wahl einer kommerziell genutzten und auch in der Privatwirtschaft in vielen Ingenieurbüros oftmals eingesetzten Software wurde bewusst getroffen, um bereits von Beginn an einen gewissen "Konnex zur Praxis" herstellen zu können.

Zur Validierung der Berechnungsergebnisse wird ein bereits im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführter Belastungsversuch einer exemplarisch hergestellten Systemwand herangezogen. Der dabei zerstörte Probekörper wurde in Teile zerschnitten, um die aufgetretenen Bruchmechanismen im Inneren studieren zu können.

Nach der virtuellen Rekonstruktion der bereits durchgeführten Versuche wird eine Variantenstudie mit Hilfe von numerischen Rechenmodellen und der aus der Validierung erhaltenen Modellparameter durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	7
1.1	Ziele der Produktentwicklung der Firma EGGER	7
1.2	Praxis der Bemessung von Holzkonstruktionen	8
1.3	Wandsysteme in der Baupraxis	9
1.3.1	Holzrahmenwand	9
1.3.2	Holzmassivwand	9
1.4	Vielfalt an Belastungsszenarien	10
1.4.1	Vertikallasten	10
1.4.2	Horizontallasten	10
1.5	Vorstellung der Systemwand	11
1.5.1	Variantenüberlegungen	12
1.6	Vorgaben aus Befundung des Prüfkörpers	13
1.6.1	Versuchskörper	13
1.6.2	Querschnitte und Materialien	15
1.6.3	Belastung Aufbau und Durchführung der Versuche	16
1.6.4	Ergebnisse der Belastungsversuche	17
1.6.5	Versuche zum Einpressverhalten der Lamellen in die Schwellen	23
2	Materialien und Methoden	26
2.1	Spezifikationen der Baumaterialien	26
2.2	Modellbildung mittels RFEM	28
2.2.1	Modellierungsansätze für Bauteile	28
2.2.2	Modellierungsansätze für Klebefugen	30
2.2.3	Modellierungsansätze für nichtlineare Einpressungen	30
2.2.4	Materialmodelle	30
2.2.5	Umgang mit Bauteilstößen	31
3	Ergebnisse und Diskussion	32
3.1	Modellbildung mittels RFEM	32
3.1.1	Bauteile Schwelle bzw. Steher	34
3.1.2	Bauteil innere Lamelle	35
3.1.3	Bauteil äußere Lamelle	37
3.1.4	Bauteil OSB Beplankung	39
3.1.5	Lasteinleitungssituation	41
3.1.6	Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung	43
3.1.7	Klebefuge zwischen äußeren Lamellen und OSB Beplankung	47
3.1.8	Kopplungspunkt Schwelle Lamelle	51
3.1.9	Kopplungspunkt der Lamellen	57
3.1.10	Lagerung	58
3.1.11	Belastung	63

3.2	Validierung der Modellbildung für vertikale Belastung	67
3.2.1	Bereich A - Versagen der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung	68
3.2.2	Bereich B - Einpressung der Lamellen in die obere Schwelle	70
3.2.3	Bereich C - Knickversagen der Innenlamellen	71
3.2.4	Vollflächiges Belastungsszenario für die Systemwand	73
3.3	Variantenstudien weiterer Konstruktionsvarianten	75
3.3.1	Variante mit doppelter Strebendicke	75
3.3.2	Variante mit OSB Platte in Mittelebene	88
3.3.3	Vergleich mit verklebtem Holzrahmenbau	96
3.4	Nachrechnung der Schubversuche mit Öffnung	105
3.4.1	Ergebnisse	107
4	Schlussfolgerungen	109
4.1	Erkenntnisse aus der Variantenstudie	109
4.2	Ausblick auf weitere Forschung	113

Kapitel 1

Motivation

1.1 Ziele der Produktentwicklung der Firma EGGER

Die Firma EGGER möchte mit der in dieser Arbeit vorgestellten Systemwand eine zusätzliche Option einer Holzwandkonstruktion am Markt etablieren. Die dafür zu Grunde liegenden Überlegungen und Ideen sollen in diesem Kapitel beschrieben werden. Der genaue Aufbau der Konstruktion wird in Folge in Kap. 1.5 beschrieben.

Die erwarteten Vorteile werden seitens der Firma EGGER wie folgt beschrieben: [9]

- innovatives Holzbausystem
- optimierter Ressourceneinsatz (75 % Materialersparnis im Vergleich zu Brettsper Holz)
- Standardisierung in der Produktion und in der Vermarktung
- Individualisierung beim Verwender
- höhere Belastbarkeit im Vergleich zu Holzrahmenbau
- keine metallischen Verbindungsmittel
- beliebig lange Wandelemente fertigbar

Diese Arbeit wird vor allem die Tragfähigkeit der Systemwand näher beurteilen und analysieren. Darüber hinaus soll auch ein Vergleich zu aktuell in der Praxis eingesetzten Holzwandkonstruktionen gezogen werden, um die Vergleichbarkeit mit etablierten Konstruktionsprinzipien gewährleisten zu können.

Nach erster Analyse der Systemwand werden in Kap. 3.3 einige Konstruktionsvarianten erarbeitet und analysiert um etwaige Schwächen, welche sich im Zuge der näheren Analyse ergeben, ansprechen und im besten Fall durch Abänderungen der Konstruktion ausmerzen zu können. Die Grundkonstruktion der untersuchten Systemwand basiert auf einer Erfindung von DI Frank Domschat. Es wurde bereits im Vorfeld dieser Arbeit ein Patent dazu erwirkt. Dieses kann unter der Patentnummer: DE102020104929A1 [3] gefunden werden.

1.2 Praxis der Bemessung von Holzkonstruktionen

Bei der Bemessungsstrategie von Bauteilen im Allgemeinen, aber vor allem bei der Bemessungsstrategie von Bauteilen aus dem Material Holz gilt es zunächst folgende grundlegende Entscheidung zu treffen: Soll die Bemessung zufolge aktuell gültiger Normen (in diesem Fall würde das dem Eurocode 5 [8] entsprechen) erfolgen oder, soll eine bautechnische Zulassung für die vorliegende Konstruktion erarbeitet werden? Dieses Kapitel soll die Unterschiede dieser beiden Strategien aufzeigen sowie die angestrebte Lösung der Firma EGGER darstellen.

In der Praxis der Bemessung von Tragwerken im Allgemeinen sind sowohl normative Nachweise als auch bautechnische Zulassungen wichtige Werkzeuge. Normative Nachweise stellen in diesem Zusammenhang anerkannte und allgemein gültige Normen und Standards dar, die im allgemeinen für alle technischen Ausführungen gelten. Diese normativen Nachweise legen dabei die Mindestanforderungen an Bauprodukte und Bauverfahren fest, die durch die Konstruktion bzw. dessen Ausführung erfüllt werden müssen.

Im Gegensatz dazu sind bautechnische Zulassungen eine Art spezieller Genehmigung für innovative Bauprodukte oder Bauverfahren. Diese bautechnischen Zulassungen sollen Regelungen schaffen für Konstruktion, welche nicht oder nicht ausreichend durch normative Nachweise abgedeckt werden. Ein Vorteil einer bautechnischen Zulassung für eine spezifische Konstruktion, wie die Systemwand der Firma EGGER, ist die Möglichkeit der individuellen Anpassung der Regelung auf die speziellen Anforderungen der Konstruktion und somit einer möglichen Optimierung wirtschaftlicher Gesichtspunkte.

Die Strategie der Firma EGGER sieht für die Systemwand eine Erarbeitung einer bautechnischen Zulassung vor. Diese Arbeit soll gemeinsam mit der Arbeit des Kollegen Moritz Steger [11] eine Grundlage für weitere strategische Entscheidungen und in der Folge die Basis für die Erstellung einer bautechnischen Zulassung der Systemwand darstellen.

1.3 Wandsysteme in der Baupraxis

Die dominierenden Konstruktionsprinzipien am Markt für Wände in Holzbauweise sind: [5]

- Holzrahmenwand
- Holzmassivwand

1.3.1 Holzrahmenwand

Das Traggerüst des Holzrahmenbaus wird im wesentlichen über vertikale, stabförmige Bauteile gebildet welche durch Anbringung von scheibenförmigen Bauteilen horizontal ausgesteift werden. Die dabei entstehenden Hohlräume können zum Einbringen von wärmedämmenden Materialien genutzt werden. Die maßgebenden Eigenschaften des Holzrahmenbaus sind: [5]

- schonender Umgang mit Ressourcen
- einfache Konstruktionen
- kurze Fertigungszeiten
- hohe Flexibilität und Gestaltungsfreiheit
- begrenzte Tragfähigkeit

1.3.2 Holzmassivwand

Holzmassivwände werden, wie der Name schon vermuten lässt, aus massiven Holzelementen gefertigt. Dabei zum Einsatz kommt entweder Brettsperr- oder Brettstapelholz. Die maßgebenden Eigenschaften des Holzmassivbaus sind: [5]

- hohe Tragfähigkeiten
- hoher Brandwiderstand
- gute schalldämmende Eigenschaften
- hohe Flexibilität und Gestaltungsfreiheit
- hoher Ressourceneinsatz

1.4 Vielfalt an Belastungsszenarien

Wände im Hochbau dienen im wesentlichen dazu, folgende Lasten abzutragen:

- Vertikallasten aus dem Eigengewicht und der Nutzlast darüberliegender Geschoße
- Horizontallasten aus Wind- und Erdbebenbeanspruchung

Aus verschiedenen Konstruktionsdetails können aufgrund dieser Lasten verschiedene Lasteinleitungssituationen entstehen, welche im Folgenden überblicksmäßig dargestellt werden. Die in dieser Arbeit im weiteren behandelten Lastsituationen können dem Kap. 3.1.5 entnommen werden.

1.4.1 Vertikallasten

Die Einleitung von Vertikallasten kann im wesentlichen durch darüberliegende Wänden, Stützen oder in die Wandkonstruktion einbindende Deckenkonstruktionen erfolgen. Dabei wesentlich ist die genaue konstruktive Durchbildung dieser Detailanschlüsse. Im Falle der Systemwand ergeben sich dadurch folgende Lasteinleitungsszenarien:

- reine vertikale Lastweitergabe über die Schwellen
- kombinierte vertikale Lastweitergabe über die Schwellen und die OSB Beplankung
- einseitige, exzentrische vertikale Lastweitergabe (z.B. über eine Auflagerverdrehung eines Deckenauflegers oder exzentrische Aufstandsflächen am Fußpunkt)

1.4.2 Horizontallasten

Wände dienen neben dem vertikalen Lastabtrag vorallem auch dazu, eine horizontale Aussteifung des gesamten Bauwerks erzielen zu können. Im Falle der Systemwand ergeben sich daher folgende maßgebende Lastweitergabeszenarien:

- reine horizontale Lastweitergabe über die Schwellen
- kombinierte horizontale Lastweitergabe über die Schwellen und die OSB Beplankung
- Lasteinleitung in Form von Plattenbeanspruchung durch aussteifende Deckenscheiben (z.B. bei mehrgeschoßigen Wandscheiben werden eben diese durch die einbindenden Decken als Platte beansprucht)
- Plattenbeanspruchung durch Windbelastung

1.5 Vorstellung der Systemwand

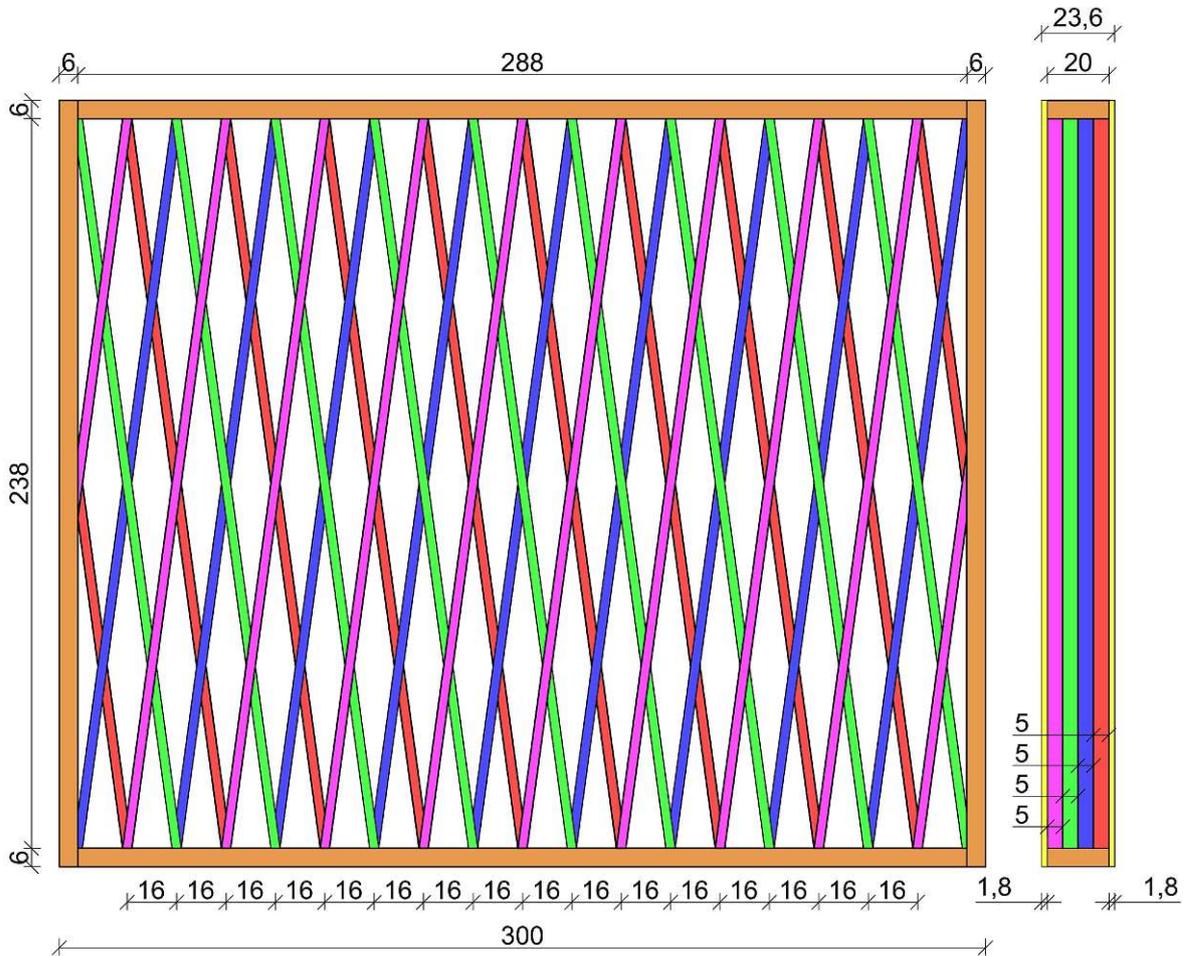


Abb. 1.1: Schema Systemwand [cm] [4]

In diesem Kapitel soll die seitens der Firma EGGER neu entwickelte *Systemwand* vorgestellt werden. Eine schematische Darstellung der Konstruktion findet sich in Abb. 1.1 wieder. Dabei ist zu erwähnen, dass die dargestellte Geometrie dem Versuchskörper aus dem noch folgenden Kapitel 1.6.1 entspricht und dabei eine willkürliche Variante der Systemwand darstellt. Wie bereits im Kap. 1.1 beschrieben, soll die Systemwand praktisch als endlos langes Bauteil produziert werden. Somit entspricht zwar die grundlegende Geometrie aus Abb. 1.1 den Vorstellungen der Firma EGGER, jedoch soll die Länge der Wand variabel anpassbar sein. Die wesentlichen Bauteile der Systemwand sind: Schwellen, Lamellen und die OSB Beplankung.

Die Rahmenhölzer in Form von Schwellen und Stehern sind in Abb. 1.1 "braun" dargestellt. Sie weisen einen Querschnitt von $200 \times 60 \text{ mm}^2$ auf und dienen im Wesentlichen als Begrenzungselemente der Wand, um eine geschlossene, seitliche Oberfläche bieten zu können. Darüber hinaus dienen sie, ähnlich wie im klassischen Holzrahmenbau, als Lasteinleitungsbauteile, um aufgebraachte Lasten auf die leicht geneigten Lamellen verteilen zu können.

Die Lamellen (in Abb. 1.1 dargestellt in magenta, grün, blau und rot) sind mit einem Querschnitt von $50 \times 30 \text{ mm}^2$ eine der beiden wesentlichen Komponenten der Systemwand zur Erzielung ihrer Tragwirkung (vorallem im vertikalen Belastungsfall). Durch die wechselseitige Neigung der einzelnen Lamellenebenen ergibt sich einerseits ein relativ fein strukturiertes Netz an Traggliedern, andererseits werden die inneren Lamellen in den Viertelpunkten der Wandhöhe mit

den äußeren Lamellen verklebt und somit gehalten. Die inneren Lamellen liegen grundsätzlich frei und logischerweise ohne Verbindung zu den äußeren OSB Platten. Die feine Gliederung der Systemwand soll eine möglichst homogene Tragwirkung der Struktur und somit auch ein Einbringen von Öffnungen ohne signifikanter Störung dieser ermöglichen.

An die beiden Außenseiten wird mittels Verklebung sowohl an die Schwellen, die seitlichen Steher als auch an die äußeren Lamellen eine OSB Platte aufgeklebt, welche sowohl als flächiger Abschluss der Wand aber auch als tragendes Element in Bezug auf vertikale, aber vor allem auch horizontal abzutragende Kräfte, genutzt werden soll. An den Kontaktpunkten zwischen Schwellen und Lamellen werden die Schwellen punktuell eingefräst, um ein horizontales Abgleiten der Lamellen verhindern zu können. Auf metallische Verbindungsmittel wird bewusst verzichtet, um einer Forderung nach Zertrennbarkeit an beliebiger Stelle mittels einer Säge folge zu leisten.

1.5.1 Variantenüberlegungen

In weiterer Folge werden einige Abwandlungen bzw. Varianten der Konstruktion der Systemwand vorgestellt, um Auswirkungen von grundlegenden Änderungen der Tragstruktur bei gleichzeitigem beibehalten der gesetzten Ziele gemäß Kap. 1.1 beurteilen zu können. Das Traglastverhalten der vorgestellten Varianten wird in weiterer Folge in Kap. 3.3 näher betrachtet.

Bei erster Begutachtung des Konstruktionsprinzips der Systemwand sowie aus den Ergebnissen der Versuche gemäß Kap. 1.6 können die frei verlaufenden Innenlamellen welche in Teilbereichen nicht gegen Ausknicken gesichert sind, als eine der potentiell maßgeblichen Schwachstellen erkannt werden. Um dieses Versagen zu verhindern, werden in weiterer Folge zwei Konstruktionsvarianten (siehe auch Kap. 3.3) betrachtet:

- Variante mit doppelter Strebendicke
- Variante mit Mittelebene

In beiden Varianten soll eine Knicksicherung der inneren Lamellen gewährleistet werden. Im Fall der Variante mit doppelter Strebendicke werden die inneren Lamellen ersetzt durch eine Aufdopplung der Dicke der äußeren Lamellen. Dadurch liegen nur noch zwei Lamellenebenen vor, welche beide mit der OSB Beplankung verklebt sind und so gegen Ausknicken gesichert werden. In der Variante mit Mittelebene wird in der Mitte des Querschnitts, zwischen den beiden inneren Lamellen eine zusätzliche OSB Platte eingebaut, welche wiederum mit den inneren Lamellen verklebt wird. Somit besitzt jede Lamelle eine Verklebung mit einer OSB Platte und kann somit gegen Ausknicken gesichert werden. Die Ergebnisse dieser Variantenüberlegungen kann dem Kap. 3.3 entnommen werden.

1.6 Vorgaben aus Befundung des Prüfkörpers

Grundlage zur Validierung von Berechnungsmodellen und um prognostizierte Ergebnisse mit realem Tragverhalten vergleichen zu können, bieten einige Belastungsversuche, welche bereits vor dem Entstehen dieser Arbeit von der Firma *EGGER* in Auftrag gegeben wurden. Ausgeführt wurden die Belastungsversuche in der *Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine* von der amtlichen Materialprüfungsanstalt des *Karlsruher Institutes für Technologie (KIT)*. Hergestellt wurde der im Folgenden beschriebene Prüfkörper von der Firma *Leisinger*. Der Testbericht datiert mit 22.02.2022. Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesem Bericht sowie aus einer Begutachtung der geprüften Wand nach dem Versuch werden jedoch zur besseren Übersicht in diesem Kapitel dokumentiert und zusammengefasst.

1.6.1 Versuchskörper

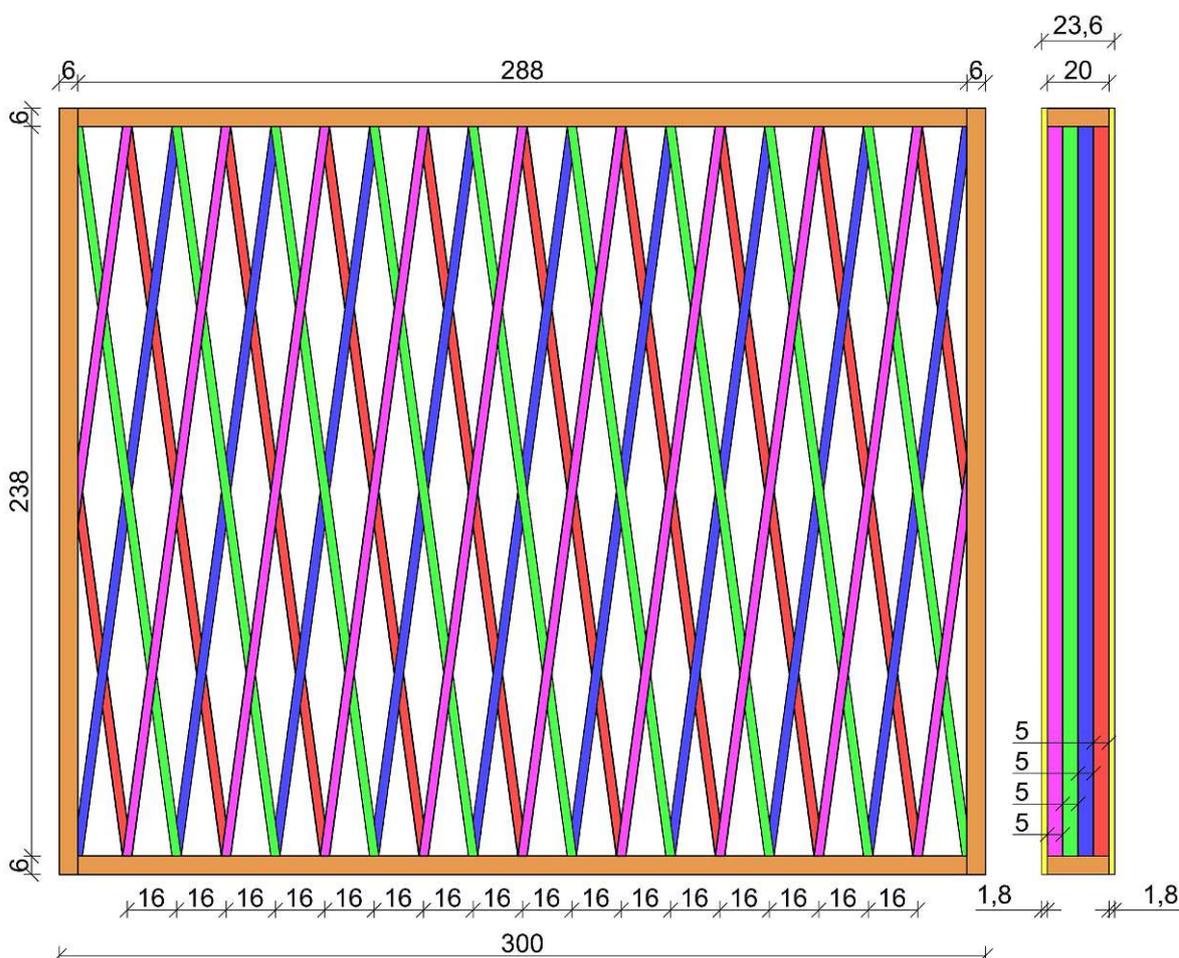


Abb. 1.2: Schemadarstellung Prüfkörper [cm]

Die Abb. 1.2 zeigt eine schematische Darstellung des Prüfkörpers. Die geprüfte Wand weist eine Länge von 3,0 m und eine Höhe von 2,50 m auf. Die Gesamtdicke der Wand beträgt 236 mm (inklusive beidseitiger OSB Beplankung mit einer jeweiligen Dicke von 18 mm).

Die Neigung der Lamellen zur Vertikalen (α) wird durch den abgebildeten Raster vorgegeben und ermittelt sich folgendermaßen:

$$\alpha = \arctan \frac{32\text{cm}}{238\text{cm}} \approx 7,7^\circ \quad (1.1)$$

Zusätzliche Bauteile der Versuchskonfiguration

In diesem Abschnitt werden die weiteren Bauteile, welche neben den zentralen Bauteilen (Lamellen, Schwellen und OSB Beplankungen) zur gewünschten Lasteinleitung bei den verschiedenen Versuchskonfigurationen (siehe Kapitel 1.6) erforderlich sind, angeführt.

1. Bei den horizontalen Belastungsversuchen wurde auf die obere Schwelle eine zusätzliche Bohle mit einem Querschnitt von $200 \times 50 \text{ mm}^2$ geschraubt (in Abb. 1.3 braun dargestellt), um eine kontinuierliche horizontale Lasteinleitung in den Prüfkörper gewährleisten zu können.
2. Bei den vertikalen Belastungsversuchen wurde unter die untere Schwelle ein zusätzliches Kantholz mit einem Querschnitt von $200 \times 20 \text{ mm}^2$ geschraubt, um ein etwaiges Aufsetzen der OSB Platte und somit eine ungewollte Lagersituation dieser zu vermeiden. Weiters wurde die auf der oberen Schwelle zusätzliche verbaute Bohle mit einem Querschnitt von $200 \times 50 \text{ mm}^2$ beidseitig um 60 mm verkürzt. Die Länge dieser Bohle wurde deshalb so gewählt, damit die Lasteinleitung nicht in die vertikalen Schwellen erfolgt, da diese Schwellen zum gesamten vertikalen Lastabtrag keinen Beitrag leisten sollen. Auf diese zusätzliche Bohle wurde im weiteren beim vertikalen Belastungsversuch der Prüfstempel, in Form eines quasi starren, liegenden C-Profiles aus Stahl, aufgesetzt (siehe Abb. 1.3).

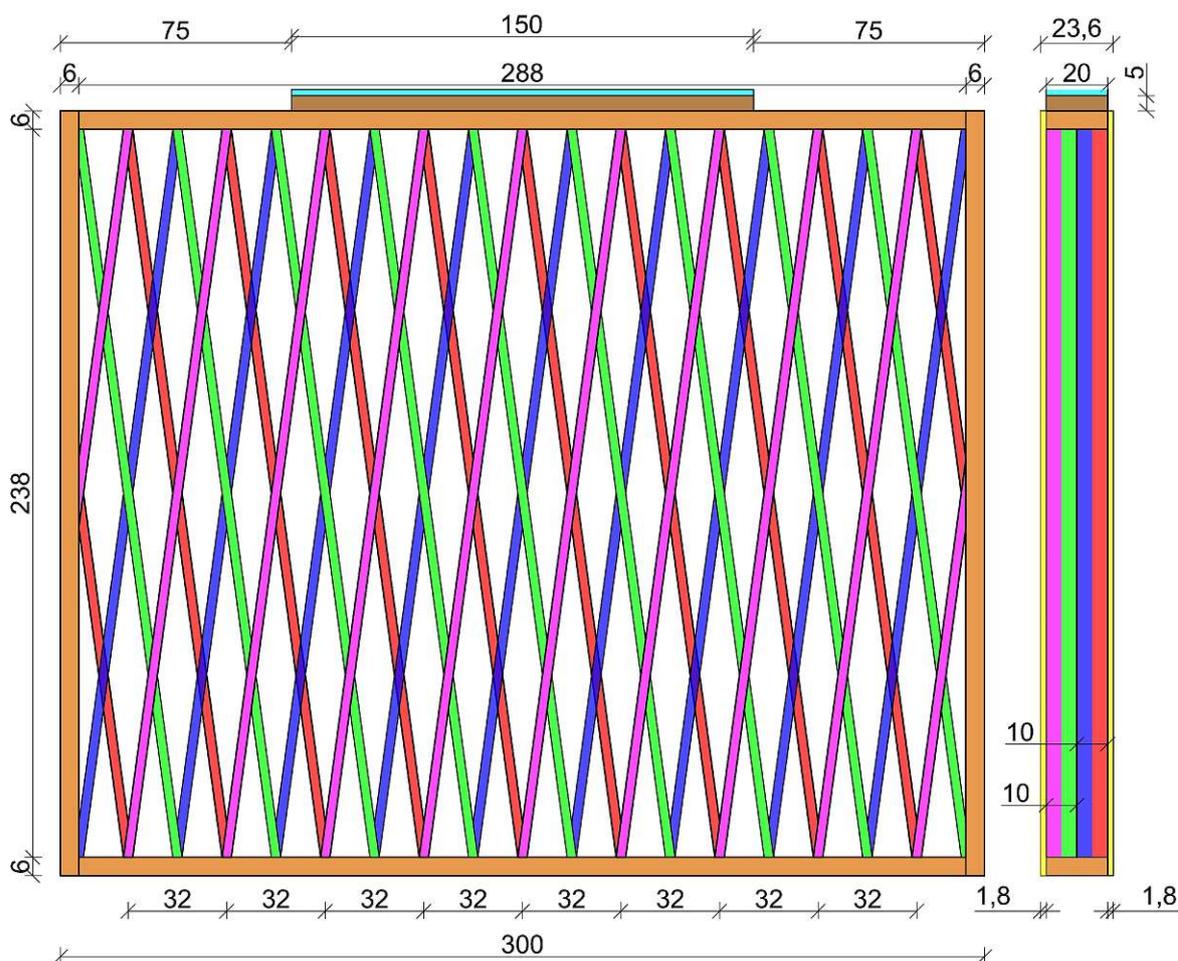


Abb. 1.3: Übersicht geprüfter Versuchskörper inkl. zusätzlicher Bauteile [cm]

1.6.2 Querschnitte und Materialien

Die genauen geometrischen Gegebenheiten der Systemwand wurde bereits in Kap. 1.5 dargestellt. In diesem Kapitel sollen die eingesetzten Materialien und Querschnitte übersichtlich dargestellt werden.

Tab. 1.1: Übersicht der Querschnitte und Materialien des Versuchskörpers [4]

Bauteil	Querschnitt	Material
Schwellen	200 x 60 mm ²	C20
Lamellen	50 x 30 mm ²	C27
OSB	d = 18 mm	OSB/3

1.6.3 Belastung Aufbau und Durchführung der Versuche

Zum Einsatz bei den Versuchen kam eine elektromechanische Universalprüfmaschine der Klasse 1 nach DIN EN ISO 7500-1 mit einer kontinuierlichen Messrate von 5 Hz. Die dabei eingesetzte Belastungsart bzw. Belastungsgeschwindigkeit kann aus der Tab. 1.2 entnommen werden [7]. Die im weiteren beschriebenen Versagenszustände bzw. die maximale Prüflast wurden nach 600 bis 900 Sekunden erreicht.

Tab. 1.2: Belastungsart und Belastungsgeschwindigkeit Versuche [4]

Belastungsrichtung	Art der Belastung	Geschwindigkeit
vertikal	weggesteuert	2 mm/min
horizontal	weggesteuert	5 mm/min

Die Tab. 1.3 bietet eine Übersicht über die durchgeführten Belastungsversuche. Die Abb. 1.4, 1.5 und 1.6 stellen eine Übersicht über die Versuchsaufbauten der jeweiligen Belastungsversuche dar.

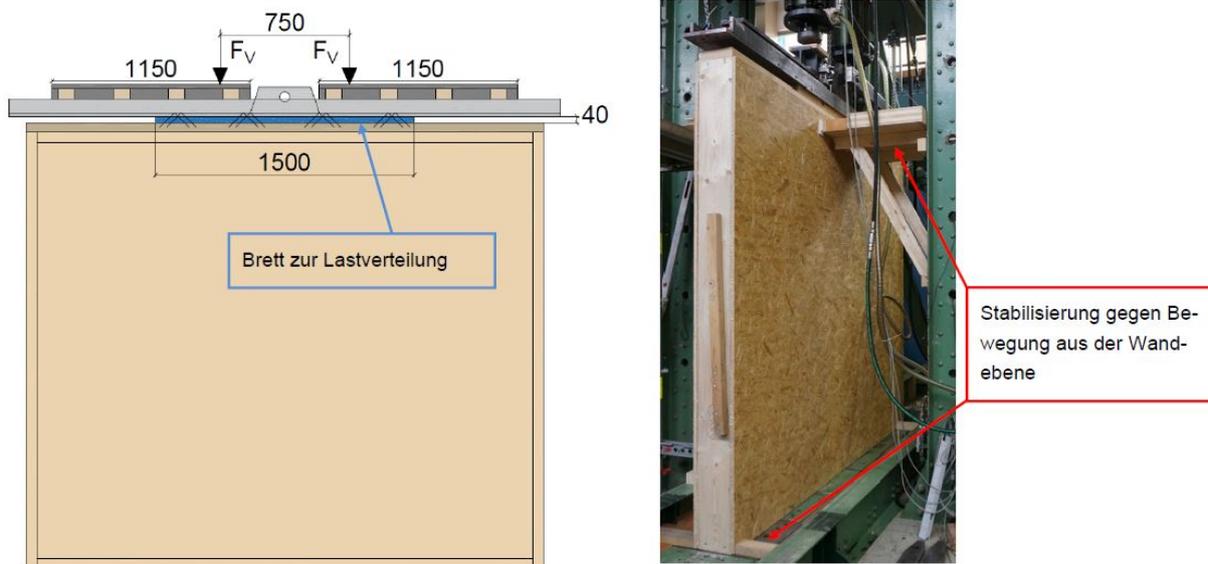


Abb. 1.4: Versuchsaufbau V1.1 [4]

Tab. 1.3: durchgeführte Versuche [4]

V	Belastung	Aufbau	Anzahl	Prüfkörper
1.1	nur vertikal	ohne Öffnung	1	W3
2.1	nur horizontal	ohne Öffnung	1	W2
2.2	nur horizontal	mit Öffnung	1	W2
3.2	horizontal mit Auflast (10 kN/m)	mit Öffnung	1	W1

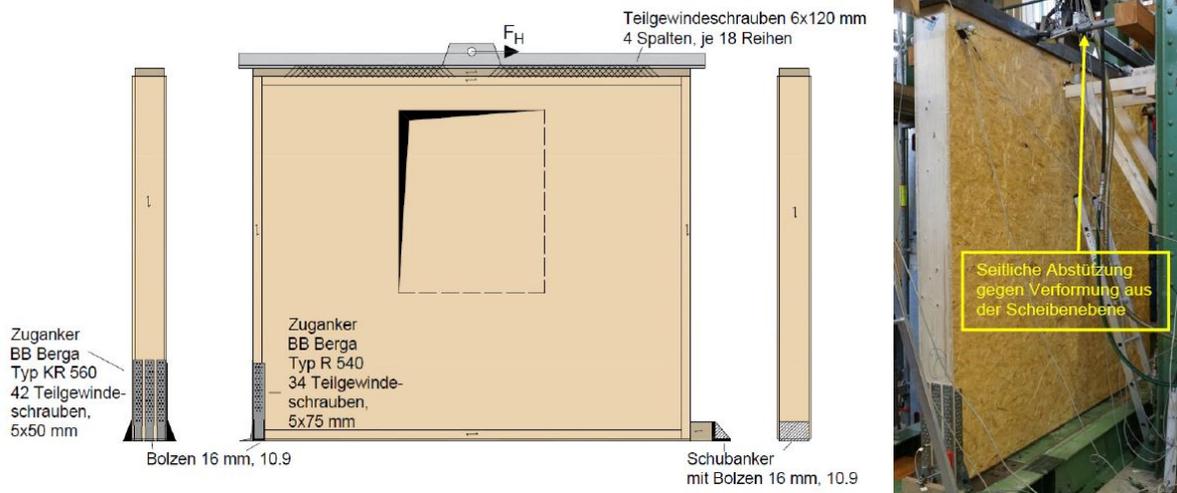


Abb. 1.5: Versuchsaufbau V2.1 V2.2 [4]

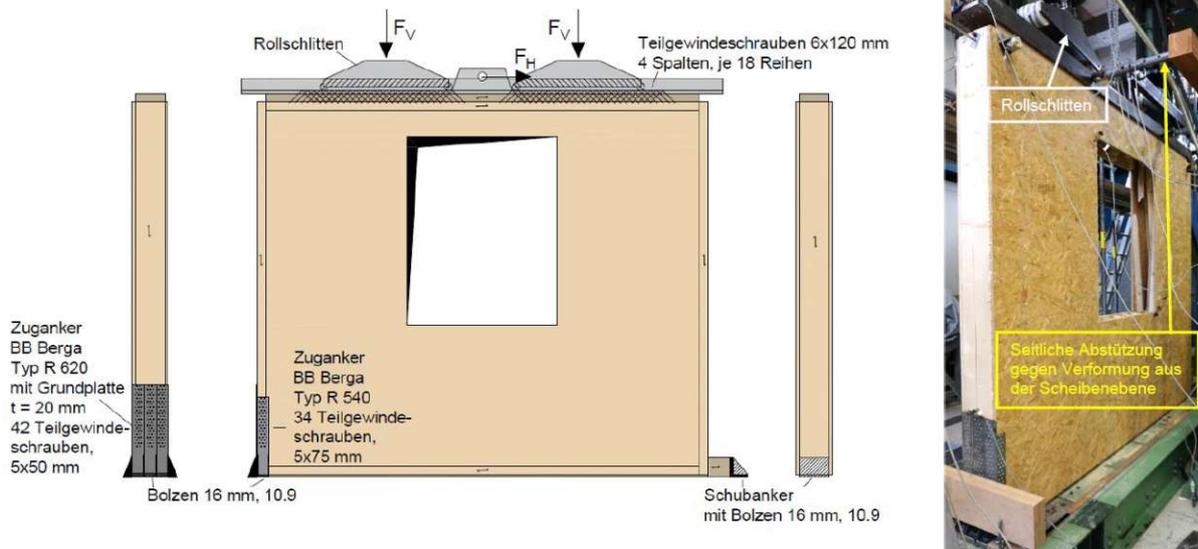


Abb. 1.6: Versuchsaufbau V3.2 [4]

1.6.4 Ergebnisse der Belastungsversuche

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der Versuche des vorhergehenden Kap. 1.6.3 angeführt. Hierbei wird konkret auf die Ergebnisse der Belastungsversuche V1.1 bzw. V2.2 gemäß Tab. 1.3 eingegangen, welche den Versuchskonfigurationen *Vertikalbelastung ohne Öffnung* und *Horizontalbelastung mit Öffnung und ohne Auflast* entsprechen.

Im Wesentlichen werden hierbei zwei aussagekräftige Informationen herangezogen. Zum einen wird die jeweilige Last-Verformungskurve des einzelnen Belastungsversuchs als Systemantwort betrachtet und diskutiert. Ergänzend dazu wird auf Basis einer Fotodokumentation der geprüften Wand versucht, die verschiedenen Bereiche der Last-Verformungskurve etwaigen Versagensmechanismen zuzuordnen bzw. allgemeiner zu beschreiben, Änderungen der Tragstruktur zuzuweisen. Diese Ergebnisse bilden im Weiteren die Grundlage für die Modellbildung der Systemwand.

1.6.4.1 Ergebnisse aus Belastungsversuch V1.1 (vertikale Belastung)

Abb. 1.7 zeigt die gemessene Last-Verformungskurve des Belastungsversuchs V1.1. Auf der horizontalen Achse wird hierbei die gemessene vertikale Verformung des Prüfstempels aufgetragen. Auf der vertikalen Achse wird die dabei aufgebrachte vertikale Gesamtlast dargestellt. Die dabei gemessene Höchstlast von 577 kN bei einer gleichzeitig auftretenden vertikalen Verschiebung von 28,4 mm wird in Tab. 1.4 dokumentiert. Die Höchstlast von 577 kN entspricht hierbei der maximalen Traglast der geprüften Systemwand im vertikalen Belastungsfall.

Tab. 1.4: maximal aufgenommene Vertikallast bei Versuchskonfiguration V1.1 [4]

V	Höchstlast	vertikale Verschiebung
1.1	577 kN	28,4 mm

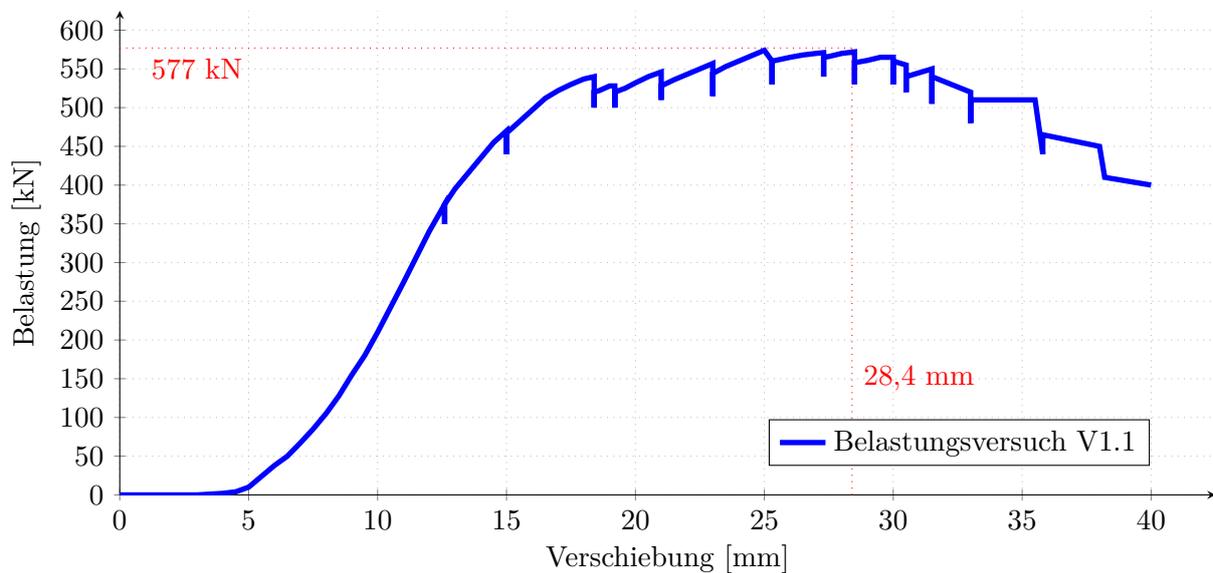


Abb. 1.7: Last-Verformungsdiagramm Belastungsversuch V1.1 [4]

Aus der Begutachtung der geprüften Wand bzw. aus der vom Prüfobjekt erstellten Fotoserie können die nachfolgenden Erkenntnisse abgeleitet werden. Hierzu wurde die geprüfte Wand mittig mittels Bandsäge aufgetrennt, um das Innenleben, sprich eine Lage der inneren sowie eine Lage der äußeren Lamellen inklusive der OSB Beplankung, begutachten zu können.

In Abb. 1.8 ist die halbe Wand (bezogen auf die Wanddicke) abgebildet. Die Lasteinleitung erfolgte hierbei am Foto orientiert von oben. Hierbei konnten folgende Beobachtungen angestellt werden:

1. Auf den ersten Blick erkennbar ist hierbei ein augenscheinliches Stabilitätsversagen der Innenlamellen im oberen Drittel der Wand, direkt unter dem Bereich der Lasteinleitung (siehe Abb.1.8). Dies betrifft allerdings nur die innenliegenden Lamellen, da die außenliegenden Lamellen durch die Verklebung mit der OSB Beplankung gegen Knickversagen gesichert sind. Dieses Phänomen des Ausknickens der Innenlamellen begründet mit Sicherheit einen Knick in der Last-Verformungskurve und führt daraus folgend auf ein nicht lineares Tragverhalten der Gesamtstruktur.

2. Ein zweites nicht lineares Verhalten lässt sich auf Basis der Abb. 1.9 ableiten. Auf jenem Foto ist augenscheinlich zu sehen, dass durch die hohen einzuleitenden Druck-Normalkräfte der Lamelle in die Fußschwelle ein Querzugversagen dieser in Verbindung mit hohen Einpressungen und Spannbändeffekten in den auf Querdruck belasteten Deckfasern auftritt. Die zugehörige Last-Verformungskurve des Gesamtsystems weist auch in diesem Fall zumindest einen Knick auf und führt wiederum zu einem nicht linearen Tragverhalten. Zum besseren Verständnis dieses Phänomens wurde seitens der Firma *EGGER* (intern abgewickelt durch Herrn DI Raimund Mauritz) eine Prüferie durchgeführt, auf welche im Kap. 1.6.5 näher eingegangen wird.
3. Eine weitere Beobachtung am Prüfkörper war das Versagen der Klebefuge zwischen oberer Lamelle und OSB Beplankung vor allem im Lasteinleitungsbereich. Das bedeutet, dass ab einem gewissen Zeitpunkt des Belastungsszenarios die OSB Platte nur noch durch die Verklebung mit den äußeren Lamellen mitbelastet wurde. Weiters ist anzumerken, dass die Differenz zwischen den relativen vertikalen Verschiebungen der Schwelle bzw. der OSB Beplankung im Lasteinleitungsbereich rein aus geometrischen Überlegungen nahezu dem Weg der Einpressung der Lamellen in die Schwelle betragen muss. Die Thematik der Einpressung wurde bereits angesprochen und wird, wie bereits erwähnt, im Kap. 1.6.5 näher beschrieben.

Die daraus resultierenden Erkenntnisse (zum nicht linearem Tragverhalten), welche in weiterer Folge für die Modellierung der Systemwand eine wesentliche Rolle spielen werden, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Knickversagen der Innenlamellen im oberen Drittel der Systemwand
- Einpressverhalten der Lamellen in die Schwellen
- Versagen der Klebefuge zwischen der Schwelle und der OSB Beplankung

Diese Versagensszenarien werden in weiterer Folge in Kap. 3.1 aufgegriffen und mit der dort beschriebenen Methodik in das Rechenmodell aufgenommen.



Abb. 1.8: Knickversagen Innenlamellen



Abb. 1.9: Quersugversagen Schwelle

1.6.4.2 Ergebnisse aus Belastungsversuch V2.2 (horizontale Belastung mit Loch)

Abb. 1.11 zeigt zwei Lastverformungskurven für den Belastungsversuch V2.2. Kopfverschiebung bedeutet in dieser Darstellung die relative horizontale Verschiebung zwischen den Punkten WA1 und WA2 gemäß Abb. 1.10. Die betroffene Diagonale, welche zur Messung der Längenänderung herangezogen wurde, ist jene, welche in Abb. 1.10 mit *SWA AUS* bezeichnet wird.

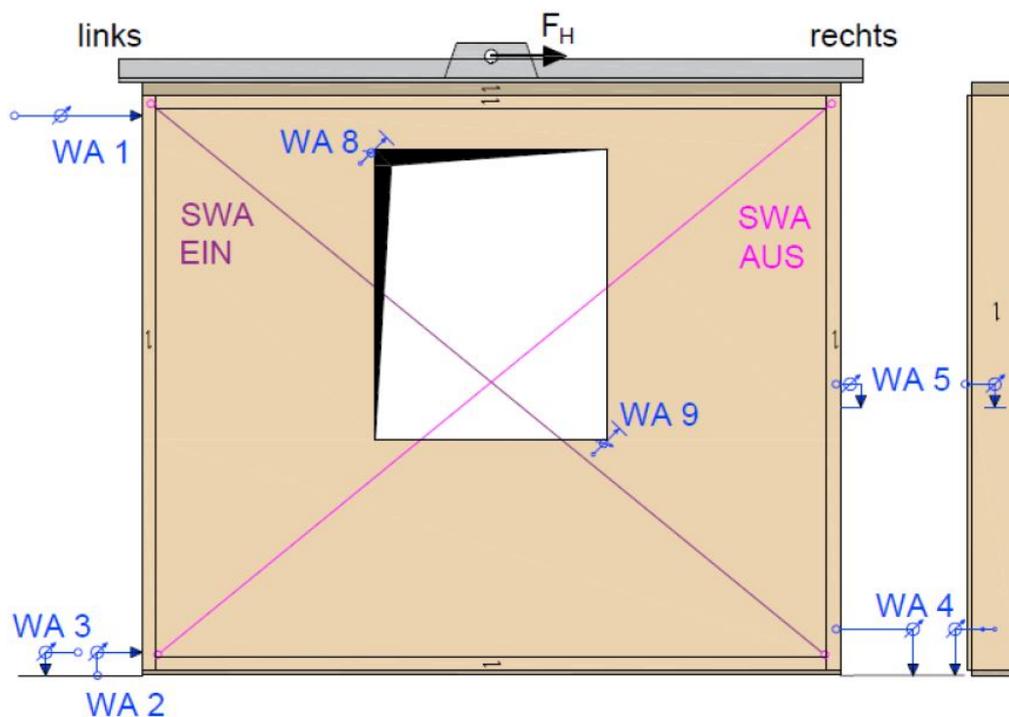


Abb. 1.10: Messpunkte Belastungsversuch V2.2 [4]

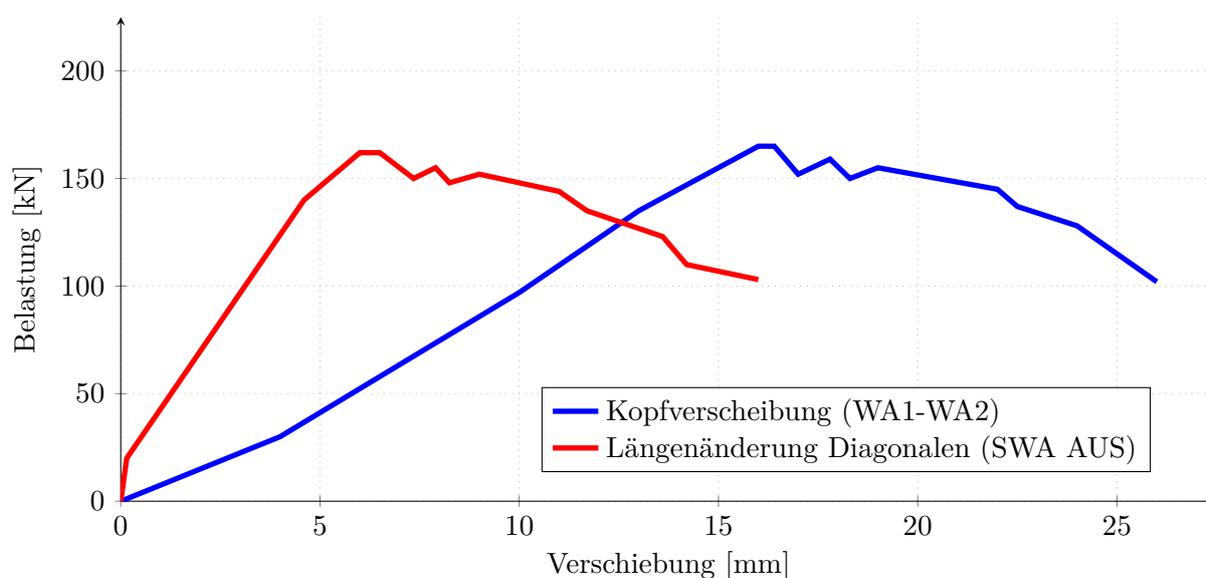


Abb. 1.11: Last-Verformungsdiagramm Belastungsversuch V2.2 [4]

In Abb. 1.11 ist zu erkennen, dass bei einem Lastniveau von in etwa 160 kN die Belastung nicht weiter zunimmt und somit eine maximale Traglast erreicht wird. Die Begründung dafür liegt zum einen im Aufreißen der OSB Platten im Eckbereich der Öffnung (siehe Abb. 1.12). Der wesentliche Grund für das vorliegende Versagen ist jedoch im Ablösen des Rähms (siehe Abb. 1.13) von der restlichen Konstruktion zu finden (siehe Abb. 1.13). Durch diesen Umstand wird die Lasteinleitung maßgeblich gestört und eine weitere Steigerung der einzuleitenden Last behindert.



Abb. 1.12: Risse in OSB Beplankung im Belastungsversuch V2.2 [4]



Abb. 1.13: Ablösen des Rähms im Belastungsversuch V2.2 [4]

1.6.5 Versuche zum Einpressverhalten der Lamellen in die Schwellen

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln erwähnt, hat sich aus der Analyse der durchgeführten Belastungsversuche gezeigt, dass die Lasteinleitung der Lamellen in die Schwellen zu Einpressungen in diese und somit zu nicht linearem Systemverhalten führt. Um dieses Systemverhalten möglichst realistisch mittels Federelementen modellieren zu können, wurden seitens der Firma EGGER diverse Einpressversuche angestellt [6]. Die Tab. 1.5 sowie die Abb. 1.14, 1.15 und 1.16 zeigen die dabei angewandten Prüfsituationen bzw. Prüfgeometrien.

Tab. 1.5: Prüfkörpervarianten [6]

Nuttiefe	A	B
5 mm	50-5	150-5
15 mm	50-15	150-15

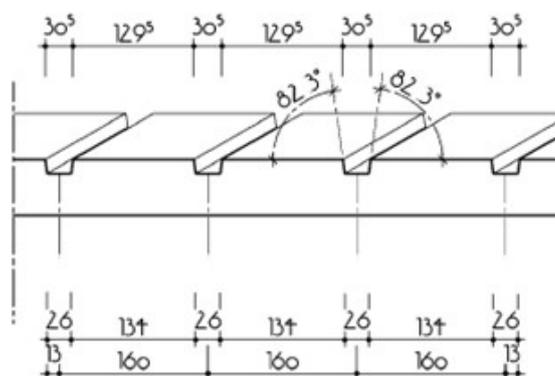


Abb. 1.14: Prüfkörpergeometrien der Schwelleneinpressversuche [mm] [6]

Tab. 1.5 in Kombination mit Abb. 1.14 sind so zu verstehen, dass auch bei einer Überbreite der Einfräsung nur ein Teilbereich von eben zum Beispiel 50 mm (laut Tab. 1.5) belastet wurden.

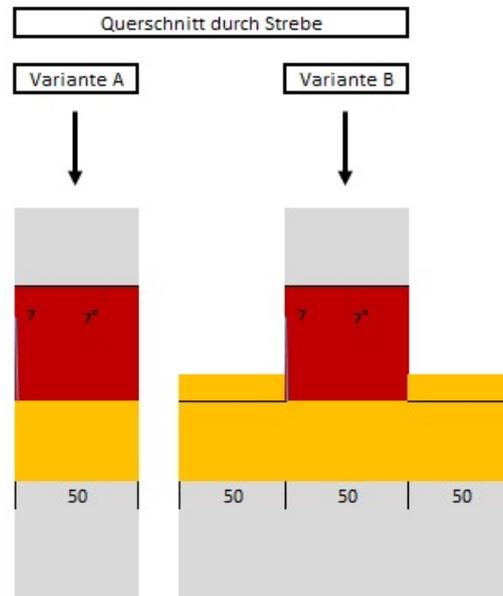


Abb. 1.15: Prüfanordnung – Schnitt durch Streben schematisch [mm] [6]

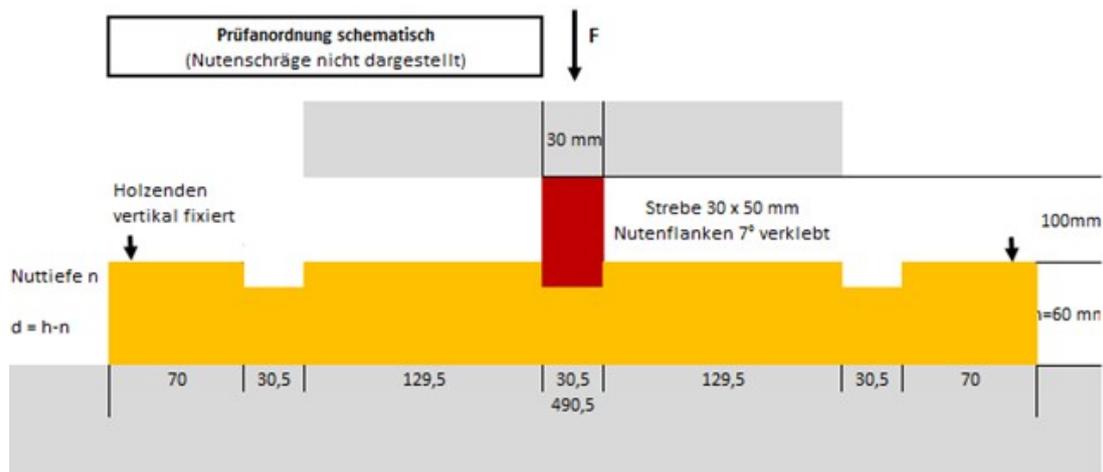


Abb. 1.16: Schema der Prüfanordnungen der Schwelleneinpressungsversuche [mm] [6]

Bei den Einpressversuchen wurden für vier unterschiedliche Situationen Last-Verformungskurven ermittelt. Die Unterscheidungen der einzelnen Situationen bezog sich einerseits auf die Nuttiefe (5 und 15 mm) und andererseits auf die Schwellenbreite (Schwellenbreite gleich Strebenbreite oder Schwellenbreite gleich drei mal der Strebenbreite). Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abb. 1.17 dargestellt.[6]

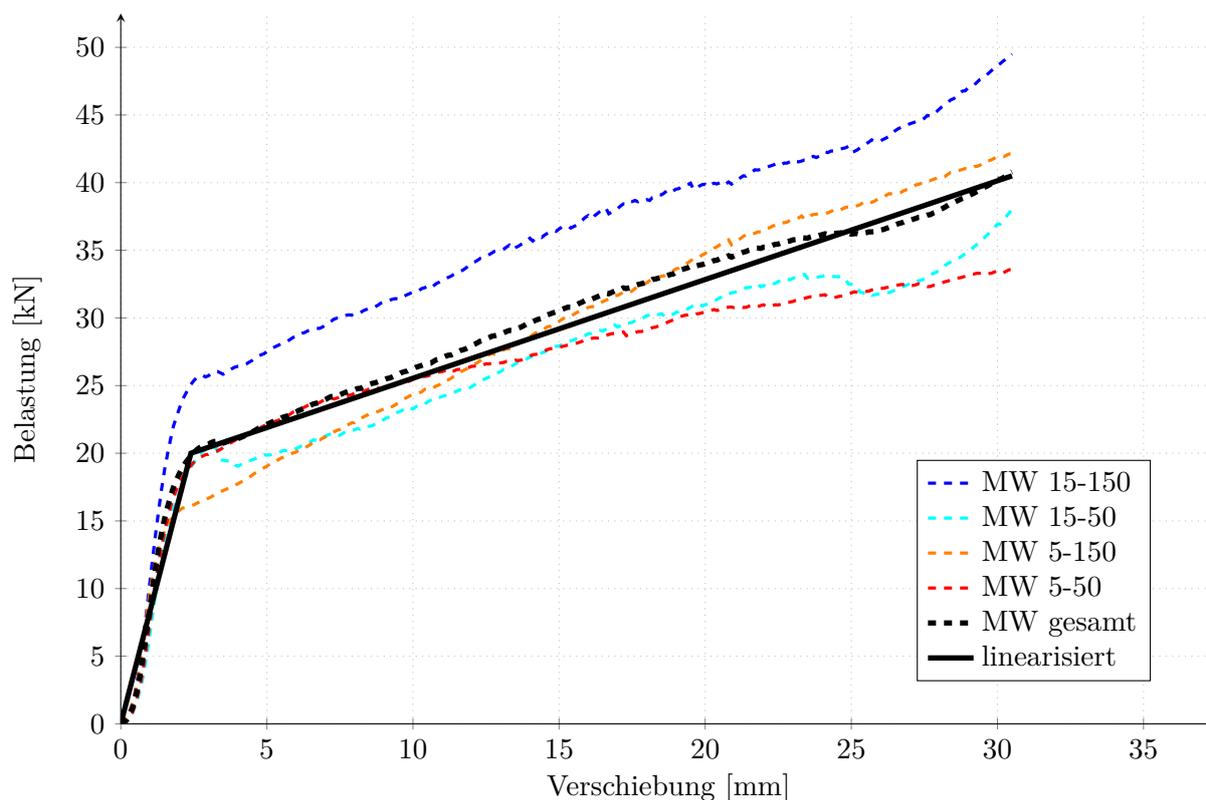


Abb. 1.17: Last-Verformungsdiagramm Schwelleneinpressversuche [6]

Die blaue Kurve in Abb. 1.17 zeigt im Vergleich zu den anderen Lastverformungskurven markant andere Ergebnisse. Nach genauerer Betrachtung der Versuchskörper kann dieser Ausreißer auf im Probekörper befindliche Äste zurückgeführt werden.

Für die weitere Modellierung wird der Mittelwert aus allen Versuchen vereinfacht bilinear angenommen. Dies entspricht der schwarzen durchgezogenen Linie in Abb. 1.17. Diese Vereinfachung stellt eine ausreichend hohe Genauigkeit dar, lässt jedoch zugleich zu, dass die Rechenzeiten der FE-Modelle drastisch optimiert werden. Die Parameter für die bilineare Lastverformungskurve der Schwelleneinpressung werden in Tab. 1.6 angeführt.

Tab. 1.6: Parameter der vereinfachten, bilinearen Lastverformungskurve der Schwelleneinpressversuche

Kraft	Verschiebung
0 kN	0 mm
20 kN	2,4 mm
40,5 kN	30,5 mm

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird auf die grundsätzlichen Möglichkeiten der Modellbildung mittels RFEM eingegangen (siehe Kap. 2.2). In Kap. 3.1 werden die tatsächlich modellierten Bauteile und Kopplungen dargestellt und erläutert. In den Kap. 3.2, 3.3 und 3.4 werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Modellbildung angeführt und eingehend diskutiert.

Kapitel 2

Materialien und Methoden

2.1 Spezifikationen der Baumaterialien

Die genauen Materialparameter der im Weiteren angesprochenen und eingesetzten Materialien werden in den Tab. 2.1, 2.2 und 2.3 angeführt. Diese Materialeigenschaften wurden aus der Bemessungssoftware ausgelesen und entsprechen aktuellen, genormten Kennwerten. Als Grundlage der Berechnung werden die charakteristischen Materialparameter herangezogen. Sämtliche Sicherheitsbetrachtungen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt da in erster Linie eine möglichst realitätsbezogene Analyse der mechanischen Zusammenhänge betrachtet werden soll.

Tab. 2.1: Materialeigenschaften der Lamellen (C27) [8]

Charakteristische Festigkeiten			
Charakteristische Festigkeit bei Biegung	$f_{m,k}$	27.0	N/mm^2
Charakteristische Festigkeit bei Zug	$f_{t,0,k}$	16.5	N/mm^2
Charakteristische Festigkeit bei Zug rechtwinklig	$f_{t,90,k}$	0.4	N/mm^2
Charakteristische Festigkeit bei Druck	$f_{c,0,k}$	22.0	N/mm^2
Charakteristische Festigkeit bei Druck rechtwinklig	$f_{c,90,k}$	2.5	N/mm^2
Charakteristische Festigkeit bei Schub/Torsion	$f_{v,k}$	4.0	N/mm^2
Rollschubfestigkeit	$f_{R,k}$	0.8	N/mm^2
Allgemeine Kennwerte			
Elastizitätsmodul parallel	$E_{0,mean}$	11500.0	N/mm^2
Elastizitätsmodul rechtwinklig	$E_{90,mean}$	380.0	N/mm^2
Schubmodul	G_{mean}	720.0	N/mm^2
Elastizitätsmodul parallel	$E_{0,05}$	7700.0	N/mm^2
Elastizitätsmodul rechtwinklig	$E_{90,05}$	254.6	N/mm^2
Schubmodul	G_{05}	482.1	N/mm^2
Rohdichte	ρ,k	360.00	kg/m^3
Mittelwert der Rohdichte	$\rho,mean$	430.00	kg/m^3

Tab. 2.2: Materialeigenschaften der Schwellen (C20) [8]

Charakteristische Festigkeiten			
Charakteristische Festigkeit bei Biegung	$f_{m,k}$	20.0	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Zug	$f_{t,0,k}$	11.5	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Zug rechtwinklig	$f_{t,90,k}$	0.4	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Druck	$f_{c,0,k}$	19.0	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Druck rechtwinklig	$f_{c,90,k}$	2.3	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Schub/Torsion	$f_{v,k}$	3.6	N/mm ²
Rollschubfestigkeit	$f_{R,k}$	0.8	N/mm ²
Allgemeine Kennwerte			
Elastizitätsmodul parallel	$E_{0,mean}$	9500.0	N/mm ²
Elastizitätsmodul rechtwinklig	$E_{90,mean}$	320.0	N/mm ²
Schubmodul	G_{mean}	590.0	N/mm ²
Elastizitätsmodul parallel	$E_{0,05}$	6400.0	N/mm ²
Elastizitätsmodul rechtwinklig	$E_{90,05}$	214.4	N/mm ²
Schubmodul	G_{05}	397.5	N/mm ²
Rohdichte	ρ,k	330.00	kg/m ³
Mittelwert der Rohdichte	$\rho,mean$	400.00	kg/m ³

Tab. 2.3: Materialeigenschaften der Beplankung (OSB/3) [8]

Charakteristische Festigkeiten			
Charakteristische Festigkeit bei Biegung	$f_{m,k}$	16.0	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Zug	$f_{t,0,k}$	8.5	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Zug rechtwinklig	$f_{t,90,k}$	0.4	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Druck	$f_{c,0,k}$	17.0	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Druck rechtwinklig	$f_{c,90,k}$	2.2	N/mm ²
Charakteristische Festigkeit bei Schub/Torsion	$f_{v,k}$	3.2	N/mm ²
Rollschubfestigkeit	$f_{R,k}$	1.0	N/mm ²
Allgemeine Kennwerte			
Elastizitätsmodul parallel (Scheibe)	$E_{0,mean}$	3800	N/mm ²
Elastizitätsmodul rechtwinklig (Scheibe)	$E_{90,mean}$	3000	N/mm ²
Elastizitätsmodul parallel (Platte)	$E_{0,mean}$	4930	N/mm ²
Elastizitätsmodul rechtwinklig (Platte)	$E_{90,mean}$	1980	N/mm ²
Schubmodul	G_{mean}	1080	N/mm ²
Rohdichte	ρ,k	310.00	kg/m ³
Mittelwert der Rohdichte	$\rho,mean$	370.00	kg/m ³

2.2 Modellbildung mittels RFEM

Die Analyse der Versuchsobjekte gemäß Kapitel 1.6 hat gezeigt, dass komplexe mechanische und zum Teil auch nichtlineare mechanische Prozesse das Tragverhalten der Systemwand prägen. Deshalb werden in diesem Kapitel die grundlegenden Möglichkeiten der Modellbildung hinsichtlich der einzelnen Bauteile sowie dessen Verbindungen diskutiert und vorgestellt, um diese komplexen mechanischen Zusammenhänge abbilden zu können. Darüber hinaus sollen die verschiedenen Materialmodelle, welche in weiterer Folge zum Einsatz kommen, vorgestellt werden. Die in Folge angewandten Modellierungsstrategien werden in Kap. 3.1 näher beschreiben.

2.2.1 Modellierungsansätze für Bauteile

Grundsätzlich kann die Systemwand z.B. als äquivalentes Flächenmodell mit entsprechenden Systemsteifigkeiten dargestellt werden. Diese Form der Modellierung wäre jedoch ein zu ungenauer Ansatz und könnte z.B. nicht die komplexen mechanischen Prozesse der Einpressungen der Lamellen in die Schwelle abbilden.

Eine andere Herangehensweise wäre, das Modell als reales Volumenmodell zu generieren. Diese Form der Modellbildung wäre zwar in der Lage, auch komplexe mechanische Prozesse abbilden zu können, würde jedoch die geforderte Rechenkapazität erheblich steigern.

Eine dritte Variante wäre es, die einzelnen Bauteile als Stäbe oder Flächen zu modellieren und je nach Anforderung zu entscheiden, welche Form der Modellierung die optimale wäre. In dieser Arbeit wurde der dritte Ansatz der Modellierungsstrategien gewählt, um das Optimum zwischen geforderter Genauigkeit, optimierter Rechenzeit, aber auch nicht zu komplexer Modellierung zu erreichen.

In RFEM sowie in den meisten anderen FE-Berechnungsprogrammen werden grundsätzlich drei Arten von anzuwendenden Bauteilen unterschieden:

- stabförmige Bauteile
- flächige Bauteile
- voluminöse Bauteile

In weitere Folge wird näher auf die verschiedenen Modellierungsvarianten eingegangen.

2.2.1.1 Stabförmige Bauteile

Stabförmige Bauteile werden grundsätzlich anhand ihrer Stabachse definiert. Sämtliche Eigenschaften werden eben über diese Stabachse zugeordnet. Beim Generieren des FE-Netzes werden für Stäbe eindimensionale finite Elemente erzeugt. Eine Übersicht einiger, im Kontext dieser Arbeit wesentlichen Stabtypen kann der Tab. 2.4 entnommen werden. [10]

Tab. 2.4: Übersicht relevanter Stabtypen in RFEM [10]

Stabtyp	Kurzbeschreibung
Balkenstab	Biegesteifer Stab, der alle Schnittgrößen übertragen kann
Starrstab	Kopplungsstab mit starrer Steifigkeit

Da Stäbe nur über ihre Achse definiert sind, können auch Lasten nur über die Stabachse definiert werden. Um eine exzentrische Klebefuge modellieren zu können, müsste der Stab in Form einer Rippe modelliert werden. Da aber bei der Systemwand sowohl eine exzentrische Lastenleitung in Form der Klebefuge als auch eine zentrische Lastenleitung durch die Schwellen vorliegt, wurde die Modellierung als Stab nicht angedacht.

2.2.1.2 Flächige Bauteile

Flächen beschreiben einerseits die Geometrie des Bauteils, andererseits werden über die Fläche selbst auch Steifigkeiten abgebildet. Eine Fläche wird über eine Ebene sowie dessen Dicke spezifiziert. Für die Bildung des FE-Netzes werden bei Flächen zweidimensionale finite Elemente erzeugt. Eine Übersicht verschiedener Flächentypen findet sich in Tab. 2.5. Eine Übersicht der verschiedenen Steifigkeitstypen ist in Tab. 2.6 angeführt. [10]

Tab. 2.5: Relevanter Flächentyp in RFEM [10]

Flächentyp	Kurzbeschreibung
ebene Fläche	Fläche ohne Krümmung

Tab. 2.6: Übersicht relevanter Steifigkeitstypen für Flächen in RFEM [10]

Steifigkeitstyp	Kurzbeschreibung
Standard	homogen & isotrop, Fläche überträgt Momente und Membrankräfte
Orthotrop	unterschiedliche Steifigkeiten in die jeweiligen Flächenrichtungen
Starrfläche	Fläche mit starrer Steifigkeit in beide Flächenrichtungen

2.2.1.3 Voluminöse Bauteile

Volumenkörper werden grundsätzlich über ein geometrisches Volumen definiert. Bei ihnen kann für jede Raumrichtung eine separate Steifigkeit angesetzt werden. Die Zuteilung der Steifigkeiten erfolgt über die Materialparameter. [10]

2.2.2 Modellierungsansätze für Klebefugen

Um die Steifigkeit und vor allem die Traglast von Bauteilkopplungen in Form von Verklebungen abschätzen zu können, werden die charakteristischen Materialfestigkeiten der anliegenden Bauteile herangezogen. Die maßgebende (also geringste) charakteristische Festigkeit wird für die Modellierung einer Linienfreigabe herangezogen. Die Bestimmung der Versagenslast der Klebefuge wird im weiteren wie folgt bestimmt:

$$F_{R,k} = f_{R,k} * b * 1,0 \text{ m} \quad (2.1)$$

$F_{R,k}$... Widerstandskraft der Klebefuge pro Meter

$f_{R,k}$... maßgebende charakteristische Festigkeit

b ... Breite der Kontaktfläche der Klebefuge

Auf die Berücksichtigung einer Momentenfreigabe auf Basis der exzentrischen Lasteinleitung in die Klebefuge wird aufgrund des geringen zu erwarteten Einflusses auf die Tragfähigkeit verzichtet. Weiters kann aufgrund der Tatsache, dass in der Berechnungssoftware keine Interaktionen zwischen den verschiedenen Richtungen innerhalb einer Linienfreigabe vorgesehen ist, eine solche auch nicht für die weiteren Berechnungen berücksichtigt werden. Die numerische Bestimmung der Versagenslasten der verschiedenen Klebefugen wird in den Kap. 3.1.6 sowie 3.1.7 angeführt.

2.2.3 Modellierungsansätze für nichtlineare Einpressungen

Im Bereich der Kopplungspunkte zwischen den Lamellen und den Schwellen sind aufgrund der hohen einzuleitenden Kräfte große, nicht lineare Einpressungen zu erwarten. Um diese nicht linearen Mechanismen realitätsgetreu darstellen zu können, wird ein Kopplungsstab mit einem Normalkraftgelenk (welches einer Feder entspricht) zwischen den beiden Bauteilen ergänzt. Die Steifigkeit dieser Feder kann in Bezug auf Größe und Verlauf der Lastverformungskurve frei definiert werden. Mit dieser Strategie kann die komplexe Handhabung von großen Dehnungen vermieden werden. Um diesen Mechanismus darstellen zu können wurden Einpressversuche ange stellt, welche im Kap. 1.6.5 näher beschrieben werden. Auf die Implementierung im Rechenmodell wird in Kap. 2.2 eingegangen.

2.2.4 Materialmodelle

Die verschiedenen Materialmodelle liefern, für die verschiedenen Bauteile, die jeweiligen Steifigkeitswerte. Eine Übersicht der relevanten Materialmodelle kann der Tab. 2.7 entnommen werden. [10]

Tab. 2.7: Übersicht verschiedener Materialmodelle in RFEM [10]

Materialmodell	Kurzbeschreibung
isotrop linear elastisch	linear, richtungsunabhängige Steifigkeit
orthotrop elastisch	linear, richtungsabhängige Steifigkeit

Die Zuordnung der jeweiligen Materialmodelle zu den einzelnen Bauteilen erfolgt in Kap. 3.1.

2.2.5 Umgang mit Bauteilstößen

Der Umgang mit Bauteilstößen betrifft aufgrund der auftretenden Längsabmessungen der Bauteile nur die obere bzw. untere Schwelle sowie die OSB Beplankung. Die Schwellen können unter dem Einsatz von Keilzinkung in praktisch unendlicher Länge gefertigt werden. Die OSB Beplankungen können mit einer Fertigungsbreite von maximal 3 m und einer praktisch unendlichen Länge hergestellt werden. Da die Faserorientierung der OSB Beplankung für die Systemwand so gewählt wurde, dass die Höhe der Systemwand der Abmessung in Richtung der begrenzten OSB Breite von 3 m entspricht, müssen sowohl in längs als auch in Querrichtung keine Stöße vorgesehen werden. Ergibt sich aus weiteren Betrachtungen, dass diese Faserorientierung geändert werden soll, ist auf eine Mitbetrachtung der sich ergebenden Plattenstöße hinzuweisen.

Kapitel 3

Ergebnisse und Diskussion

3.1 Modellbildung mittels RFEM

In diesem Kapitel wird die Modellierung aller Bauteile beschrieben, welche in der praktischen Ausführung der im Kap. 1.6.1 beschriebenen Belastungsversuche der Systemwand physisch ausgeführt werden bzw. wurden. Darüber hinaus wird die beste Modellierungsstrategie der einzelnen angeführten Komponenten diskutiert. Dies beinhaltet folgende Bauteile:

- obere und untere Schwellen sowie seitliche Steher
- innere und äußere Lamellen
- OSB Beplankung
- zusätzliches Brett zur Lastverteilung
- Lasteinleitungsblech

Neben der Modellierung der Bauteile ergeben sich aus der Befundung der Prüfkörper gemäß Kap. 1.6.1 äußerst relevante Lastübergabepunkte, welche für das Verständnis der gesamten Tragstruktur der Systemwand und dem Verständnis etwaiger Versagensmechanismen relevant sind. Diese können wie folgt zusammengefasst werden:

- Lasteinleitungsbereich (definiert durch die Prüfmaschine)
- Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung
- Klebefuge zwischen oberen äußeren Lamellen und OSB Beplankung
- Kopplungspunkt Schwelle Lamelle
- Kreuzungspunkt Lamelle außen - innen
- Kreuzungspunkt Lamelle innen - innen

Auf dessen Modellierung wird weiterer Folge in den Kap. 3.1.5, 3.1.6, 3.1.7, 3.1.8 sowie 3.1.9 näher eingegangen. Eine Übersicht dieser wesentlichen Lastübergabepunkte findet sich in Abb. 3.1.

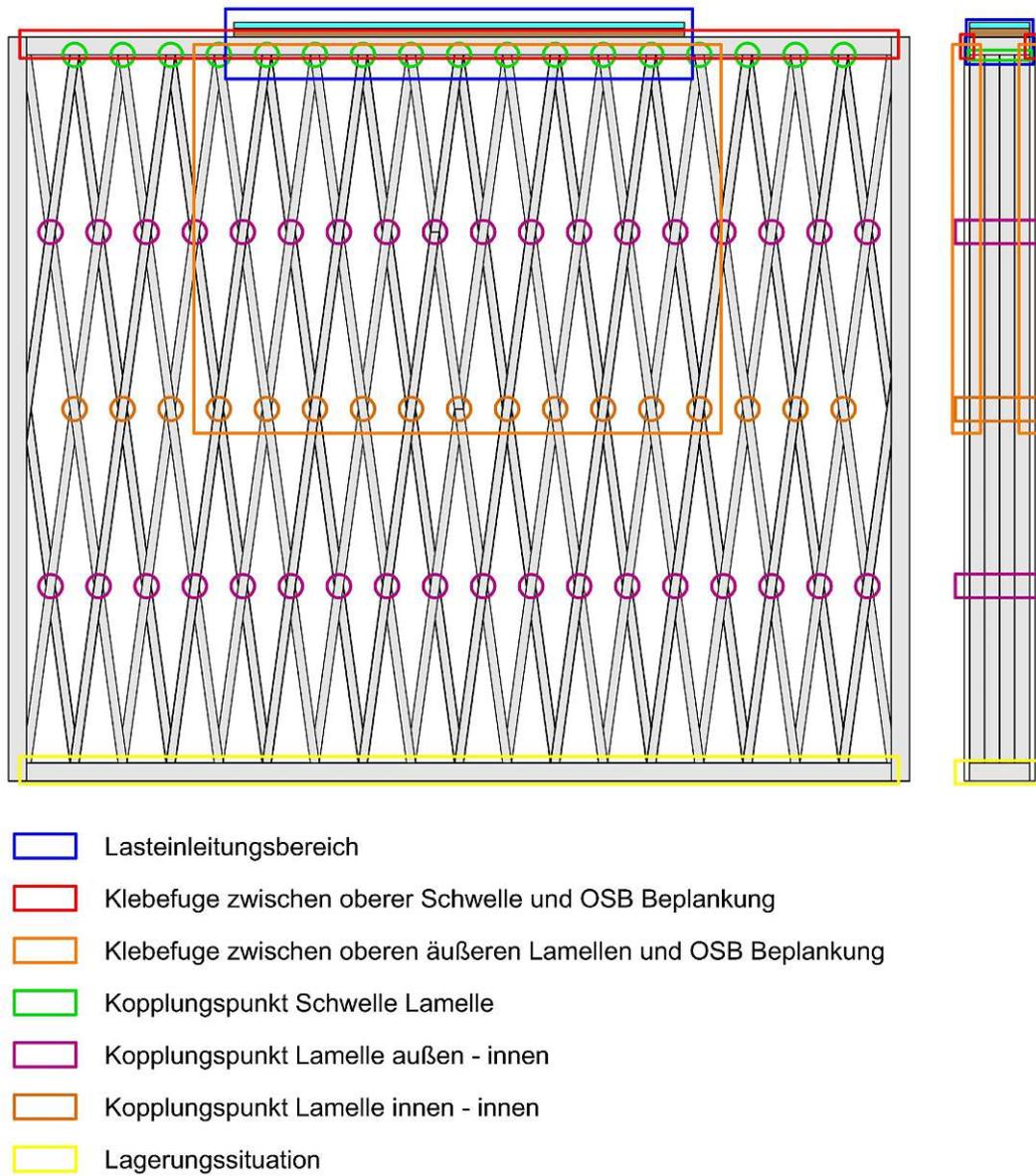


Abb. 3.1: Übersicht wichtiger Knotenpunkte

3.1.1 Bauteile Schwelle bzw. Steher

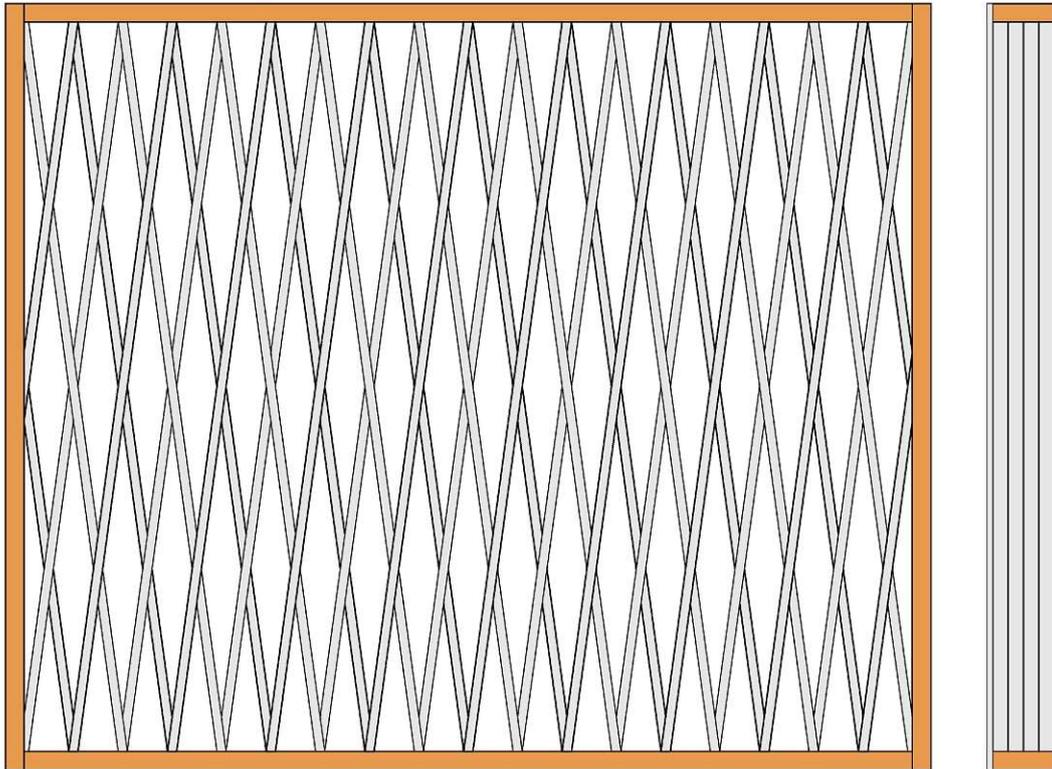


Abb. 3.2: Übersicht Schwellen bzw. Steher

Die wesentliche Aufgabe der Rahmenhölzer in Form von Schwellen und seitlichen Stehern ist der konstruktive Abschluss der Systemwand nach oben und unten bzw. zu den beiden Seiten hin. Die seitlichen Stehe sollen im Allgemeinen keinen wesentlichen Beitrag zum Lastabtrag der Konstruktion liefern. Die obere bzw. untere Schwelle dienen aus statischer Sicht dazu, aufgebrauchte Lasten auf die Lamellen bzw. die OSB Beplankung zu verteilen. Die Modellierung der Schwellen und seitlichen Steher erfolgt als Fläche. Dies ist notwendig, um die punktuellen Lasteinleitungspunkte zufolge der einzelnen Lamellen realistisch abbilden zu können. Durch eine Modellierung der Schwellen als Stab wäre es nicht möglich gewesen, die Auswirkungen des Lasteintrages der Lamellen in die Schwelle zu beurteilen. Eine Übersicht zu den angesetzten Material- und Querschnittseigenschaften sowie eine schematische Darstellung kann den Tab. 3.1 und 1.1 bzw. der Abb. 3.2 entnommen werden.

Tab. 3.1: Materialeigenschaften und Querschnitt der Außenlamellen

Material	Materialmodell	Flächentyp	Flächendicke
C20	orthotrop elastisch 2D	orthotrop	60 mm

3.1.2 Bauteil innere Lamelle

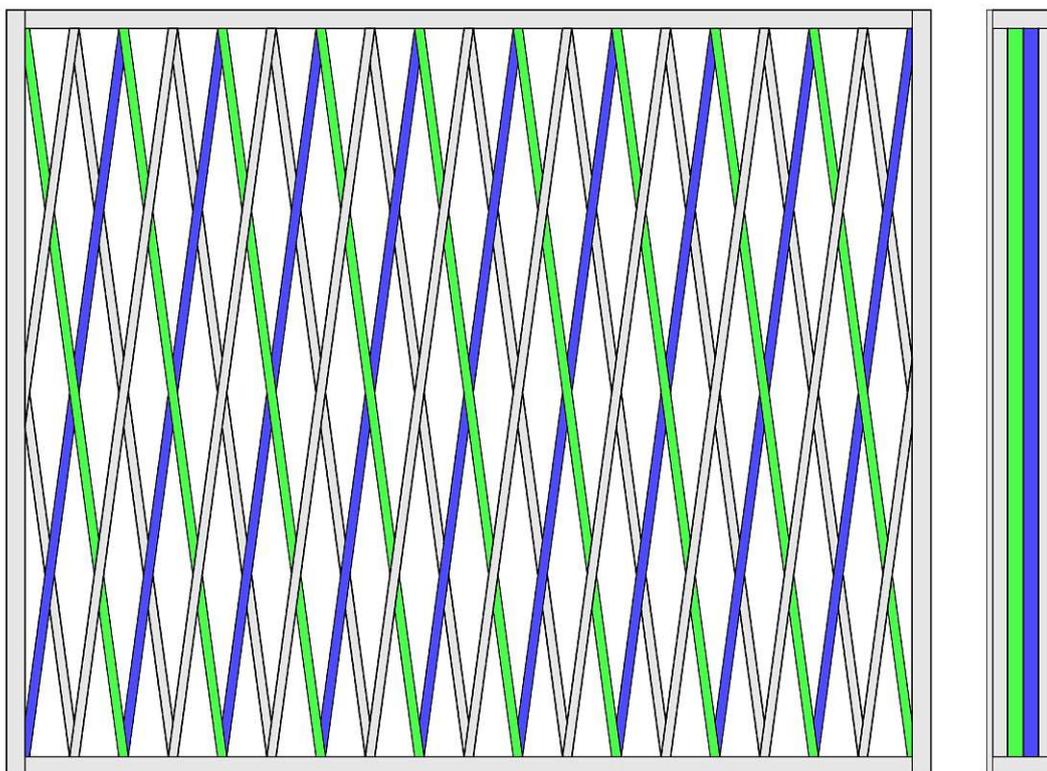


Abb. 3.3: Übersicht Innenlamellen

In Abb. 3.3 werden zur besseren Übersicht lediglich die Innenlamellen farblich dargestellt. Sämtliche anderen Bauteile werden ausgegraut. Die FE-Modellierung der Innenlamellen wird in Form von Stäben realisiert. Diese Entscheidung lässt sich durch die vorwiegend zu erwartende Normkraftbelastung (im vertikalen Belastungsfall) begründen. Da vor allem die Normkrafttragfähigkeit und in Einklang mit dieser das Stabilitätsversagen in Form von Knicken maßgebend für die innenliegenden Lamellen sein wird, ist eine Modellierung als Stab als ausreichend genau zu bewerten.

Eigenschaften zu den angesetzten Materialparametern sowie zu den modellierten Querschnitten der Innenlamellen können den Tab. 3.2 bzw. 2.1 entnommen werden. Eine schematische Darstellung des Rechenmodells ist in der Abb. 3.4 dargestellt.

Tab. 3.2: Materialeigenschaften und Querschnitt der Innenlamellen

Material	Materialmodell	Stabtyp	Querschnitt
C27	isotrop linear elastisch	Balkenstab	50/30 mm

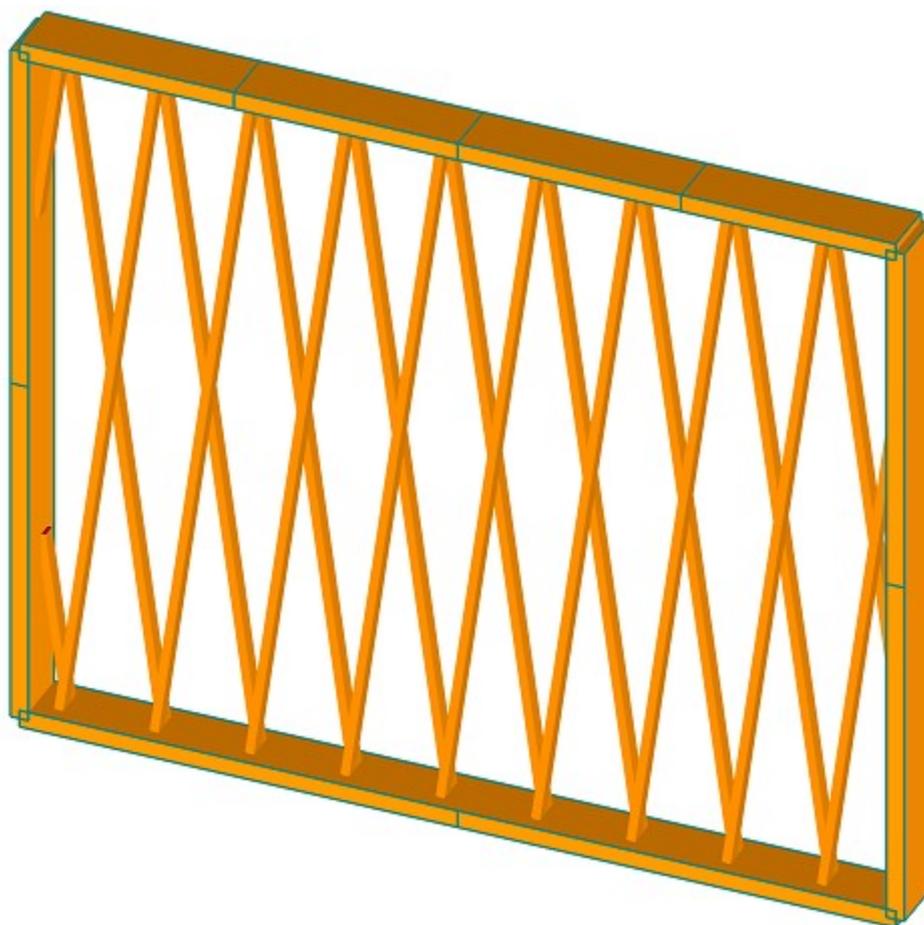


Abb. 3.4: Darstellung Rechenmodell Innenlamellen

3.1.3 Bauteil äußere Lamelle

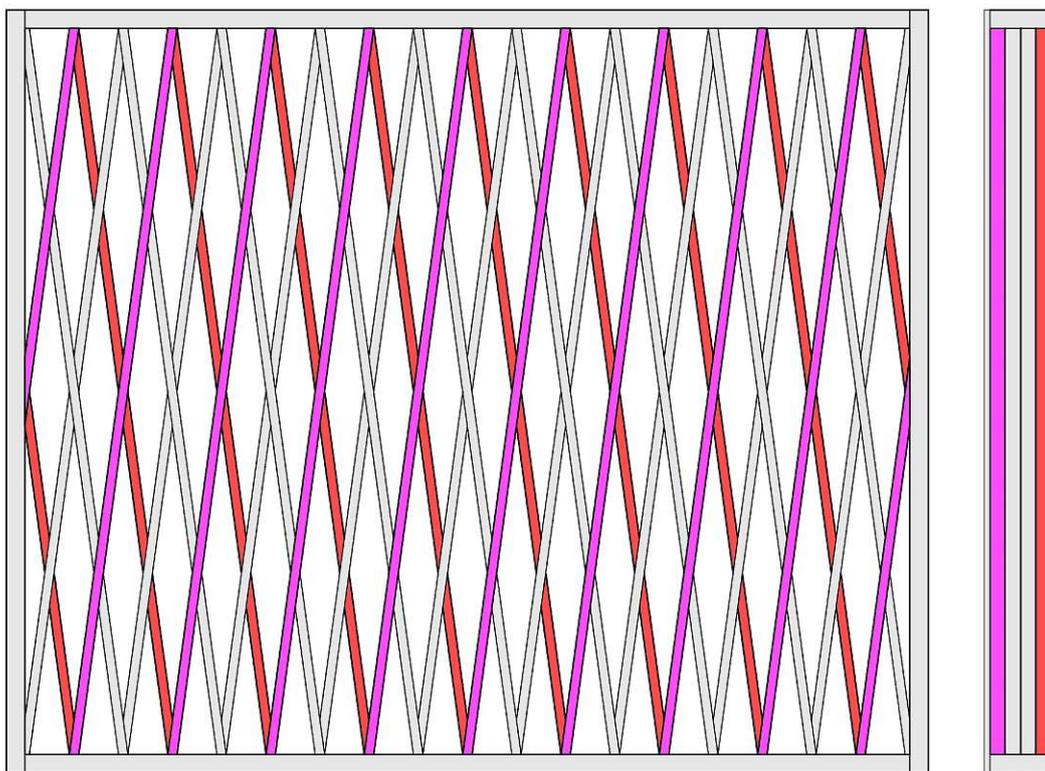


Abb. 3.5: Übersicht Außenlamellen

Anders als bei den innenliegenden Lamellen ist zu erwarten, dass eine Modellierung der außenliegenden Lamellen in Form von Stäben keine zufriedenstellende Genauigkeit der Ergebnisse liefert. Dies wird durch den Umstand begründet, dass die äußeren Lamellen vollflächig mit der OSB Beplankung verklebt werden. Diese Verklebung hat zur Folge, dass eine kontinuierliche exzentrische Lasteinleitung bzw. Lastübergabe über diese Klebefuge erfolgt. Weiters werden die äußeren Lamellen jedoch zentrisch durch die Schwellen belastet. Da diese Mischformen der Belastung nicht ausreichend genau durch einen Stab dargestellt werden kann, werden die äußeren Lamellen als Flächen modelliert.

Eine isometrische Darstellung der außenliegenden Lamellen kann der Abb. 3.5 entnommen werden. Das eingesetzte Material sowie der modellierte Querschnitt der außenliegenden Lamellen kann den Tab. 3.3 bzw. 2.1 entnommen werden. Eine Darstellung des Rechenmodells findet sich in Abb. 3.6.

Tab. 3.3: Materialeigenschaften und Querschnitt der Außenlamellen

Material	Modell	Flächentyp	Querschnittsdicke
C27	orthotrop elastisch 2D	orthotrop	30 mm

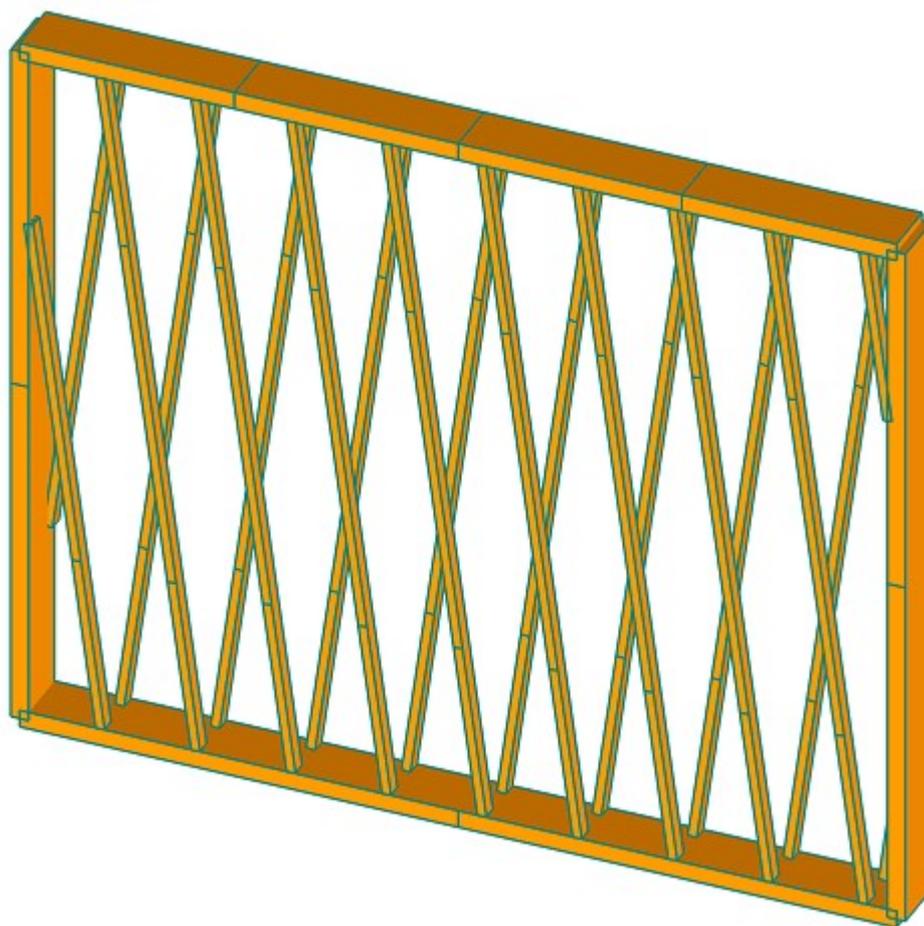


Abb. 3.6: Darstellung Rechenmodell Außenlamellen

3.1.4 Bauteil OSB Beplankung

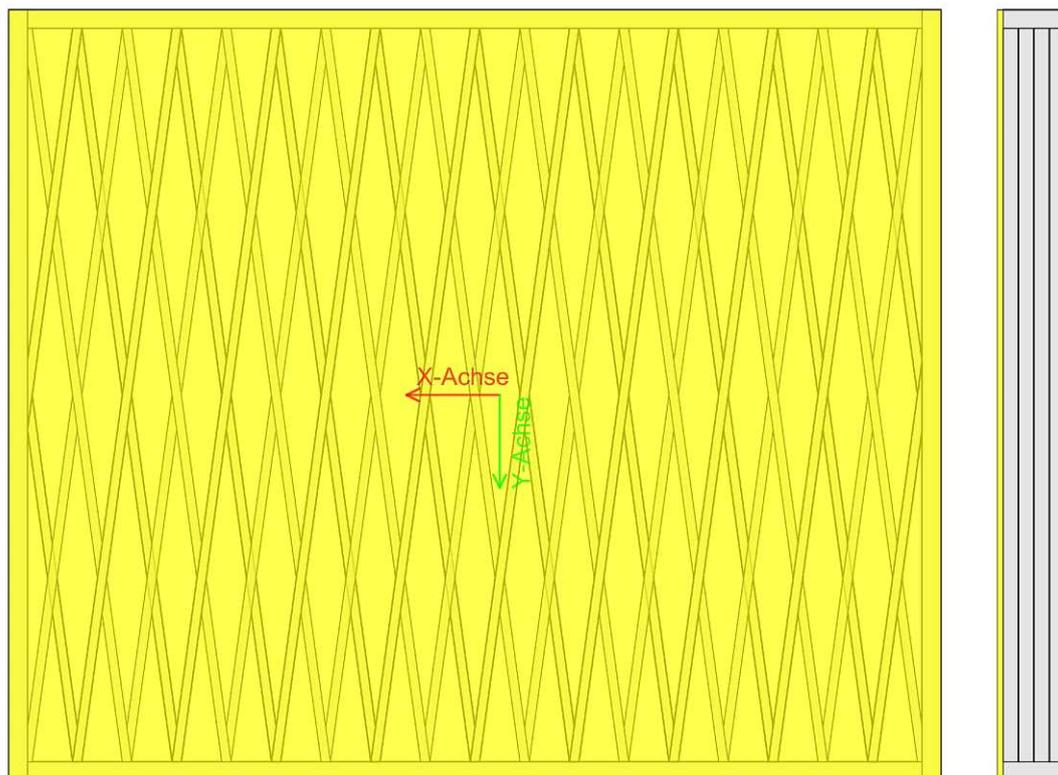


Abb. 3.7: Übersicht OSB Beplankung

Die OSB Beplankung wird, wie in Abb. 3.7 dargestellt, beidseitig und vollflächig, bündig mit den Außenkanten der Schwellen auf die Systemwand aufgeklebt. Hierbei entsteht einerseits eine Klebefuge zwischen der OSB Beplankung und der Schwellen und andererseits eine Klebefuge zwischen der OSB Beplankung und der äußeren Lamellen. Auf die Modellbildung dieser Klebefugen wird im Weiteren noch in Kap. 3.1.6 bzw. 3.1.7 eingegangen.

Die Modellierung der OSB Beplankung an sich wird als Flächenmodell realisiert. Die Materialeigenschaften können den Tab. 2.3 sowie 3.4 entnommen werden. Die Ausrichtung des lokalen Koordinatensystems der OSB Platte auf welche sich die Materialeigenschaften aus Tab. 2.3 beziehen, wird in Abb. 3.7 sowie Abb. 3.8 dargestellt.

Tab. 3.4: Materialeigenschaften und Querschnitt der OSB Beplankung

Material	Materialmodell	Flächentyp	Plattendicke
OSB/3	orthotrop elastisch 2D	orthotrop	18 mm

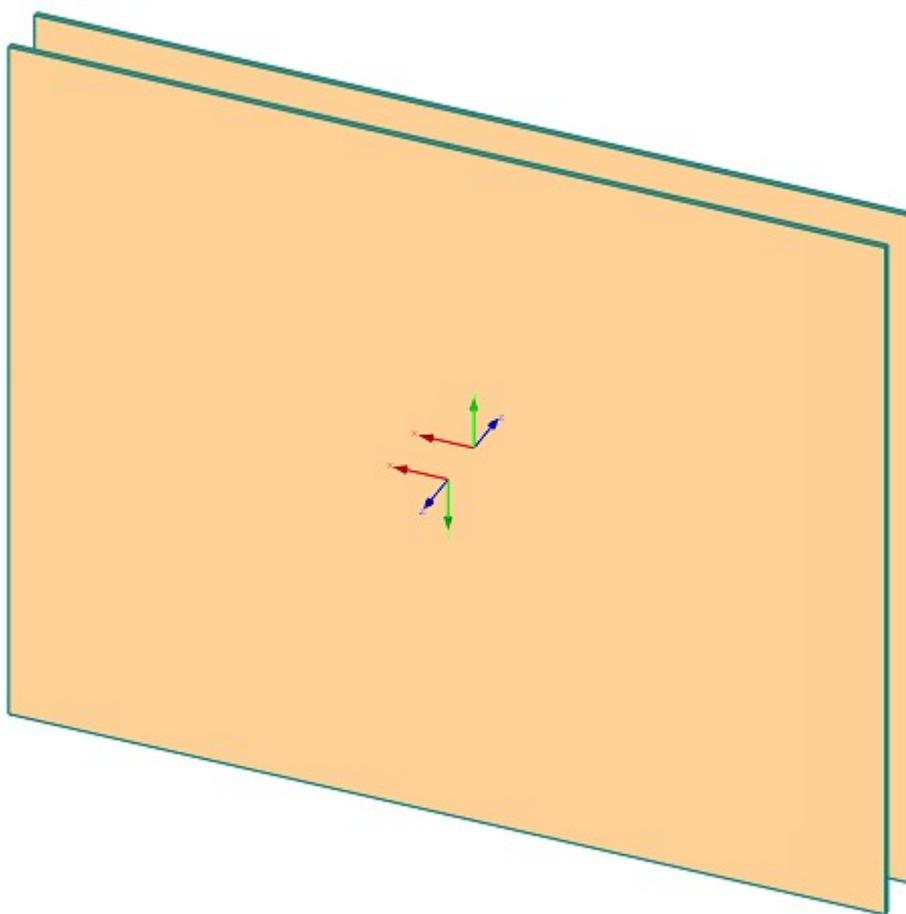


Abb. 3.8: Darstellung Rechenmodell der OSB Beplankung

3.1.5 Lasteinleitungssituation

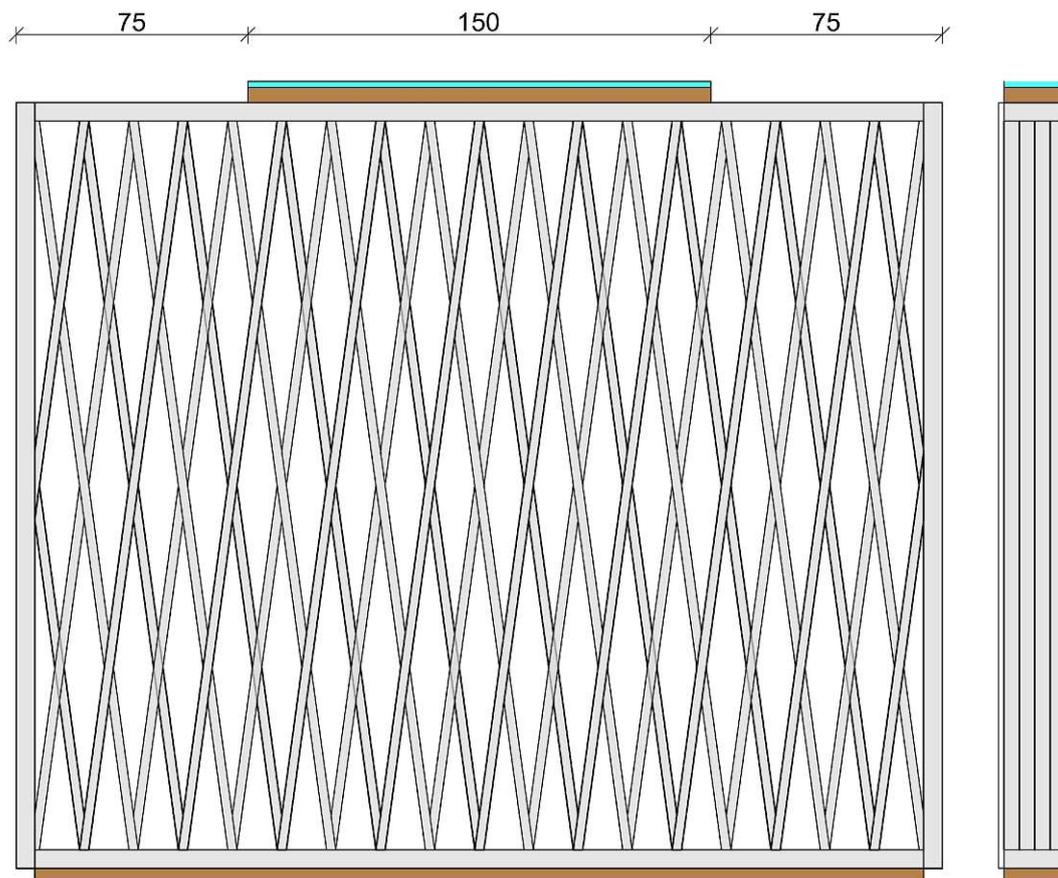


Abb. 3.9: Übersicht der zusätzlichen Bauteile zur Modellierung der Lasteinleitung

In diesem Abschnitt wird dokumentiert, wie die Lastaufbringung der bereits im Vorfeld dieser Arbeit erstellten Belastungsversuche (Versuchsaufbauten werden in Kap. 1.6.1 beschrieben) in den diversen Rechenmodellen modelliert wird. Hierbei werden zwei Belastungsszenarien unterschieden. Einerseits ein vertikales, andererseits ein horizontales Belastungsszenario. Die für die praktische Ausführung dieser Belastungsszenarien notwendigen Bauteile sind in Abb. 3.9 dargestellt.

Wie in Abb. 3.9 ersichtlich, wurde zur Aufbringung der Lasten ein zusätzliches Brett (dargestellt in dunkelbraun) mit der selben Breite wie die Schwelle (20 cm) eingebaut. Dieses sollte sicherstellen, dass die Belastung rein nur auf die Schwelle trifft und keine direkte Lasteinleitung in die OSB Beplankung vorliegt. Der Prüfstempel (in Abb. 3.9 türkis dargestellt) wird hierbei als Starrfläche modelliert. Das zusätzliche Brett wird im Rechenmodell als Volumenmodell realisiert, um die Verbindung zwischen Prüfstempel und Schwelle, in Form eines Kontaktvolumens, möglichst gut abbilden zu können. Da die für die Tragstruktur wesentlichen Bauteile in erster Linie nicht die Schwellen sondern die Lamellen sein sollen, wird die Modellierung der Lastweiterleitung von der Starrfläche zu den Lamellen, wie in Abb. 3.11 ersichtlich, modelliert.

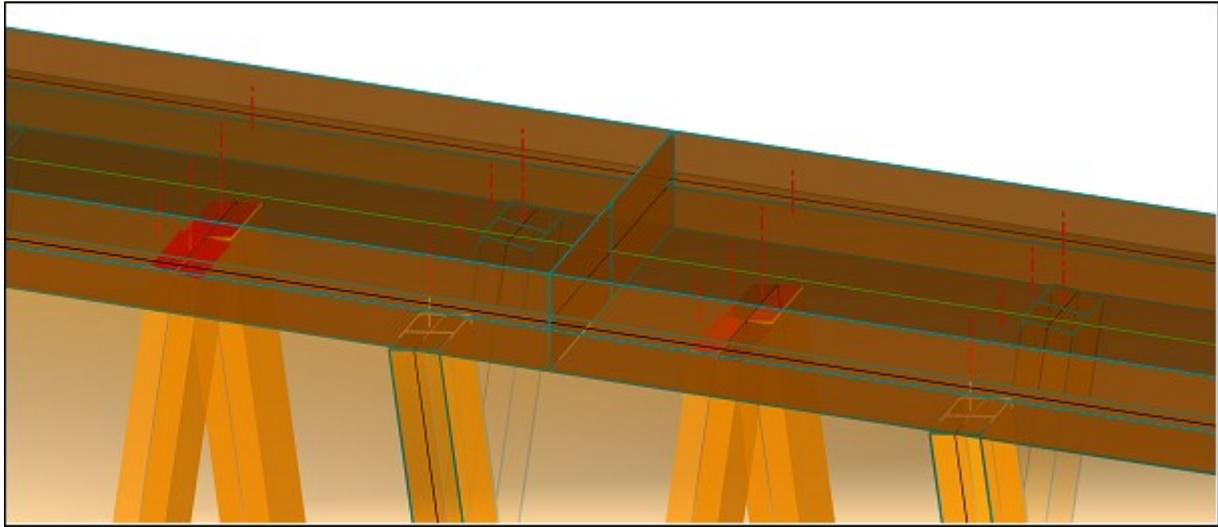


Abb. 3.10: Darstellung des Ausschnittes der Lasteinleitungssituation im Rechenmodell (Darstellung im Renderingmodus)

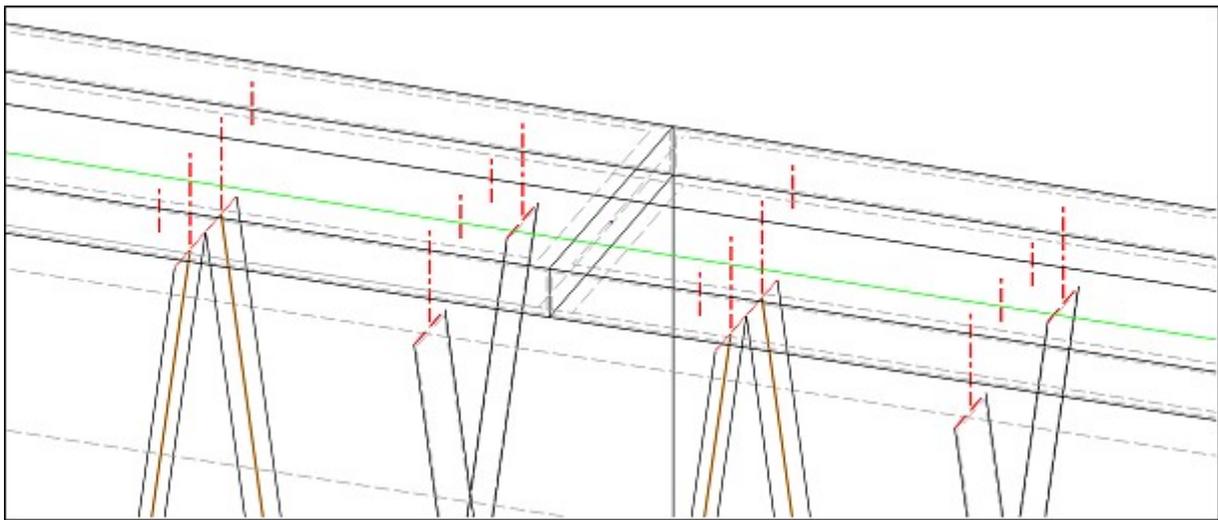


Abb. 3.11: Darstellung des Ausschnittes der Lasteinleitungssituation im Rechenmodell (Darstellung im Stabachsenmodus)

Die Abb. 3.10 sowie 3.11 zeigen einen Ausschnitt des Rechenmodells im Bereich der Lasteinleitung. Einmal dargestellt als Volumenmodell (Abb. 3.10) und ein weiteres mal dargestellt als Stabachsenmodell (Abb. 3.11). Die obere der beiden dargestellten Flächen entspricht dem Laststempel in Form einer Starrplatte welcher zur Lastaufbringung gemäß Kap. 1.6.2 dient. Die untere Fläche in den Abb. 3.10 bzw. 3.11 stellt die obere Schwelle der Systemwand dar. Erkennbar ist in beiden Darstellungen, dass die Mittelfläche zur Lastaufbringung mittels Starrstäben mit der Mittelfläche der Schwelle verbunden ist. Dabei wird die Situierung dieser Starrstäbe an den Lamellenraster (alle 32 cm eine Lamelle) angepasst. Durch diese Stäbe kann einerseits die direkte Lastweitergabe von der Starrfläche auf die Lamellen modelliert werden, andererseits kann in weiterer Folge die in die jeweiligen Lamellen eingeleitete Last einfach anhand der Stabschnittgrößen abgelesen werden. Das Stabendgelenk am Berührungspunkt zwischen Lamelle und Starrstab wird in weiterer Folge das Einpressverhalten der Lamellen in die Schwellen als Summeneffekt

abbilden. Weiters wird ein zusätzlicher Starrstab am Ende der Außenlamellen über die gesamte Breite dieser eingefügt. Dieser soll gewährleisten, dass die eingeleitete Last kontinuierlich in die äußeren Lamellen eingeleitet werden kann.

Auf die Detailmodellierung dieses Zusammenhangs wird in Kap. 3.1.8 eingegangen. Die Material- sowie Querschnittseigenschaften des zusätzlichen Brettes können den Tab. 2.2 und 3.5 entnommen werden.

Tab. 3.5: Materialeigenschaften und Querschnitt des zusätzlichen Bretts

Material	Materialmodell	Volumentyp
C20	orthotrop elastisch 3D	orthotrop

3.1.6 Klebfuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung

Die Analyse des Prüfkörpers, welche bereits eingehend in Kap. 1.6.4 beschrieben wurde, ergab ein Versagen der Klebfuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung im Verlauf der steigenden vertikalen Belastungssituation. Um diesen Versagensmechanismus im Modell abbilden zu können, wird an dieser Stelle eine Linienfreigabe eingefügt. Diese erlaubt ein lastabhängiges Aufgehen dieser Fuge. In Abb. 3.12 ist das Modell inklusive der angesprochenen Linienfreigabe dargestellt. Weiters kann das lokale Achssystem der Linienfreigabe der Abb. 3.12 entnommen werden. Dabei wird die X-Richtung in rot, die Y-Richtung in grün und die Z-Richtung in blau dargestellt.

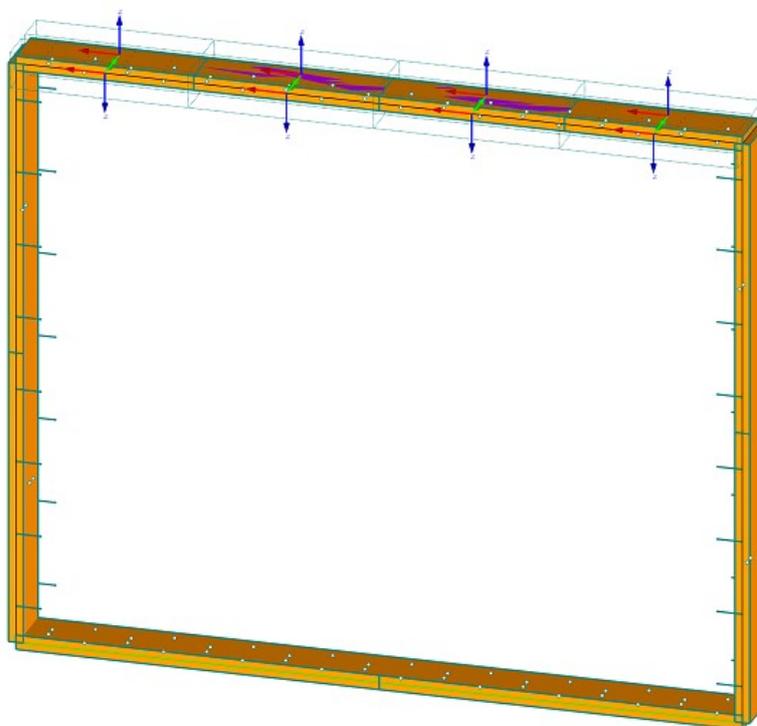


Abb. 3.12: Linienfreigabe zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung inklusive des dazugehörigen lokalen Koordinatensystem

Zur Modellierung des Versagensmechanismus der Klebefuge werden die charakteristischen Festigkeiten der Schwelle sowie der OSB Beplankung, welche der Tab. 2.2 sowie der Tab. 2.3 entnommen werden können, herangezogen. Die Idee ist, das Versagen der Fuge an sich durch die bemessungsrelevanten Festigkeiten der Schwelle bzw. der OSB Beplankung zu modellieren.

Die maßgebende, charakteristische Festigkeit in X-Richtung ist dabei Rollschub in der OSB Beplankung $f_{R,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2$. Die maßgebende charakteristische Festigkeit in Z-Richtung ist dabei der Rollschub in der Schwelle $f_{R,k} = 0,8 \text{ N/mm}^2$. Sowohl für die X als auch die Z-Richtung gelten diese beiden Festigkeiten in die positive als auch in die negative Achsorientierung. In die negative Y-Richtung drückt sich die Schwelle gegen die OSB Beplankung. Die maßgebende Festigkeit ist somit Druck quer zur Faser der Schwelle $f_{c,90,k} = 2,3 \text{ N/mm}^2$. In die positive Y-Richtung erfährt die Schwelle Zug quer zur Faser $f_{t,90,k} = 0,4 \text{ N/mm}^2$. Aus dieser Überlegung ergibt sich eine Unterscheidung in der Definition der Linienfreigabe zwischen der positiven und der negativen Y-Richtung. Zur Definition der Linienfreigabe ist eine Grenzlast in kN/m erforderlich. Um diese Last zu erhalten, muss die Klebefläche je Längeneinheit (bei der Schwellendicke von 6 cm) mit der Festigkeit wie folgt multipliziert werden.

$$X - \text{Richtung}(+/-) : f_{R,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_X = 1,0 * 10^{-1} * 6 * 100 = 60 \text{ kN/m} \quad (3.1)$$

$$Y - \text{Richtung}(+) : f_{t,90,k} = 0,4 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_Y = 0,4 * 10^{-1} * 6 * 100 = 24 \text{ kN/m} \quad (3.2)$$

$$Y - \text{Richtung}(-) : f_{c,90,k} = 2,3 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_Y = 2,3 * 10^{-1} * 6 * 100 = 138 \text{ kN/m} \quad (3.3)$$

$$Z - \text{Richtung}(+/-) : f_{R,k} = 0,8 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_Z = 0,8 * 10^{-1} * 6 * 100 = 48 \text{ kN/m} \quad (3.4)$$

Die dazugehörigen Lastverformungskurven in die einzelnen Achsrichtungen, welche der Berechnungssoftware als Berechnungsbasis zugrunde liegen, können den Abb. 3.13, 3.14 und 3.15 entnommen werden. Hierbei werden die berechneten Grenzlasten, welche durch die Verklebung übertragen werden können, als Grenzlasten der Linienfreigabe angesetzt. Dabei wird, zur Optimierung der Rechenzeit, eine theoretische Relativverschiebung von 0,01 mm bei Weiterleitung der maximal übertragbaren Last angesetzt. Diese Maßnahme hat auf die Ergebnisse keinen merkbareren Einfluss, trägt jedoch stark zu einem stabileren und schnelleren Rechenprozess der Modelle bei.

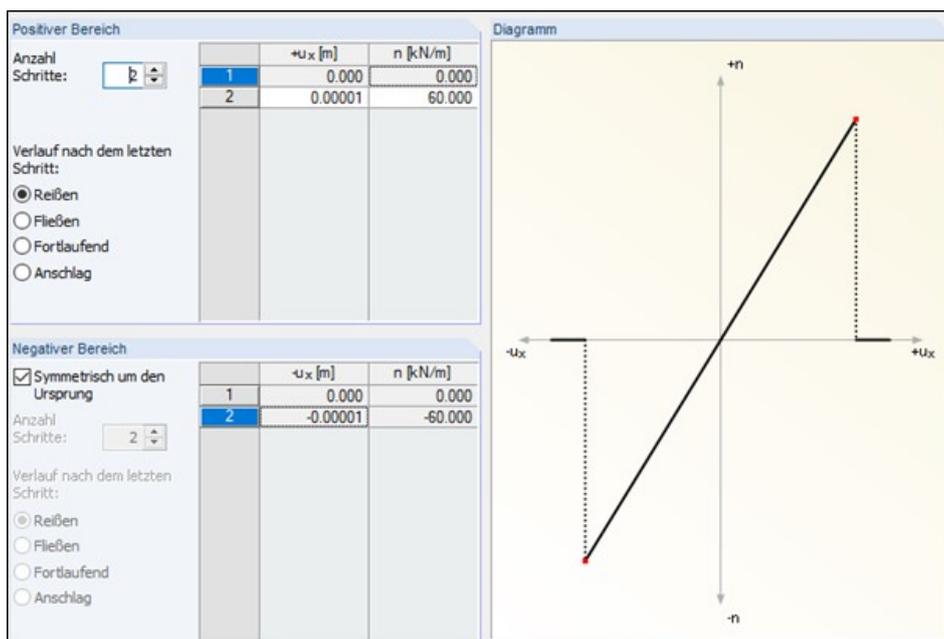


Abb. 3.13: Lastverformungskurve des Linienfreigabetyps zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung in X-Richtung (Abscheren längs zur Schwelle)

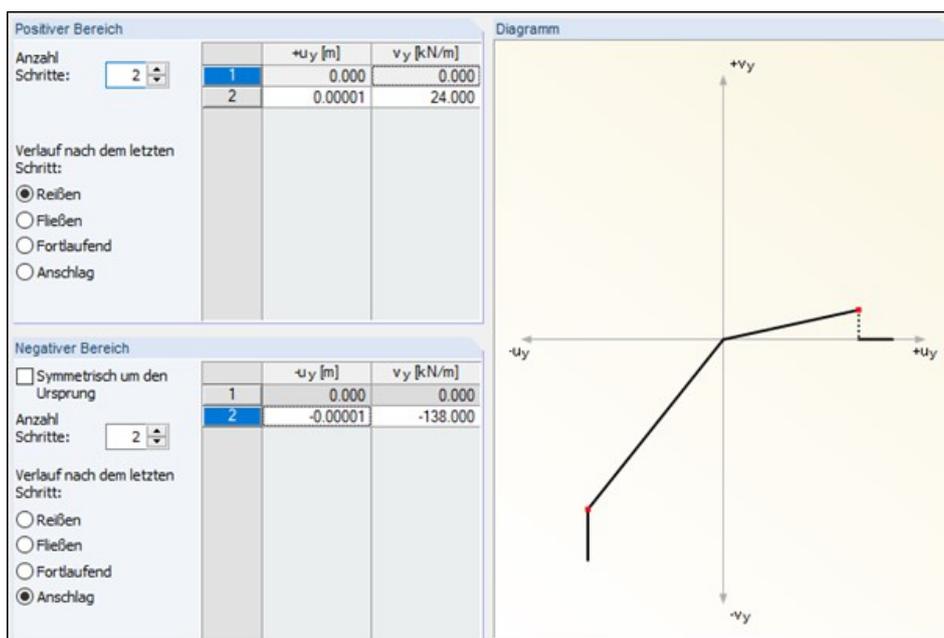


Abb. 3.14: Lastverformungskurve des Linienfreigabetyps zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung in Y-Richtung (Abheben orthogonal zur OSB Ebene)

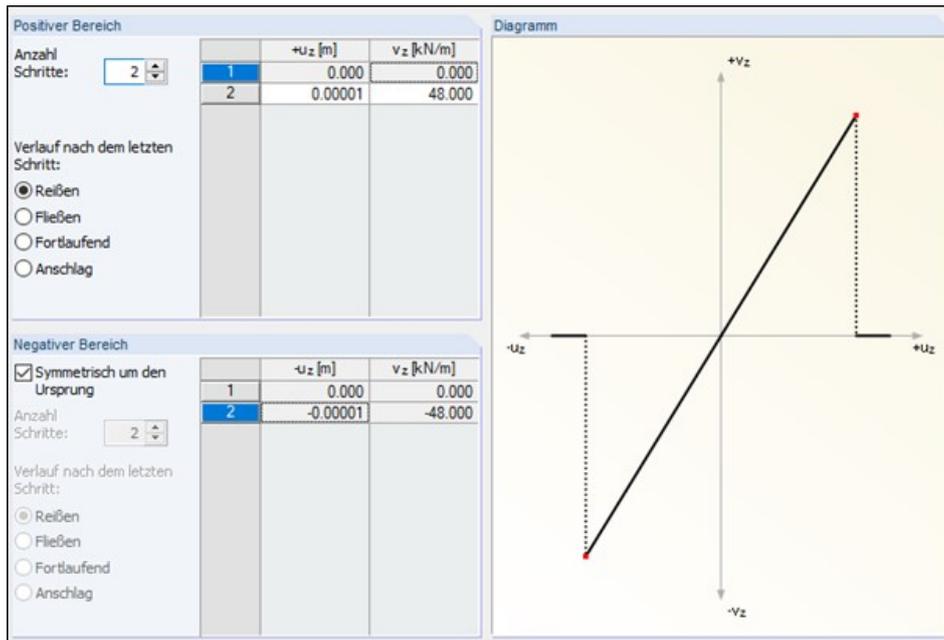


Abb. 3.15: Lastverformungskurve des Linienfreigabetyps zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung in Z-Richtung (Abscheren quer zur Schwellen)

Die Diagramme in den Abb. 3.13, 3.14 sowie 3.15 werden als gekoppelte Diagramme modelliert. Das hat zur Folge, dass aus einem Versagen der Linienfreigabe aufgrund einer Belastung in X-Richtung auch ein Versagen in die beiden anderen Richtungen resultiert.

Anmerkung: Eine Interaktion von Grenzlaster auf der Ebene von Spannungen z.B. zwischen Quer- und Schubspannungen ist in RFEM noch nicht möglich.

3.1.7 Klebefuge zwischen äußeren Lamellen und OSB Beplankung

Die Analyse der Belastungsversuche gemäß Kap. 1.6.4 ergab, ähnlich zum Versagen der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung gemäß Kap. 3.1.6, ein Versagen der Klebefuge zwischen äußeren Lamellen und der OSB Beplankung, vor allem im oberen Drittel der Konstruktion und im unmittelbaren Bereich der Lasteinleitung. Auch hier wird (ähnlich zu Kap. 3.1.6) das Versagen der Klebefuge durch eine Linienfreigabe modelliert. Eine Darstellung des Modells inklusive dieser Linienfreigabe zuzüglich dessen lokalen Achsrichtungen (X-Richtung in rot dargestellt, Y-Richtung in grün dargestellt und Z-Richtung in blau dargestellt) findet sich in den Abbildungen 3.16 sowie 3.17.

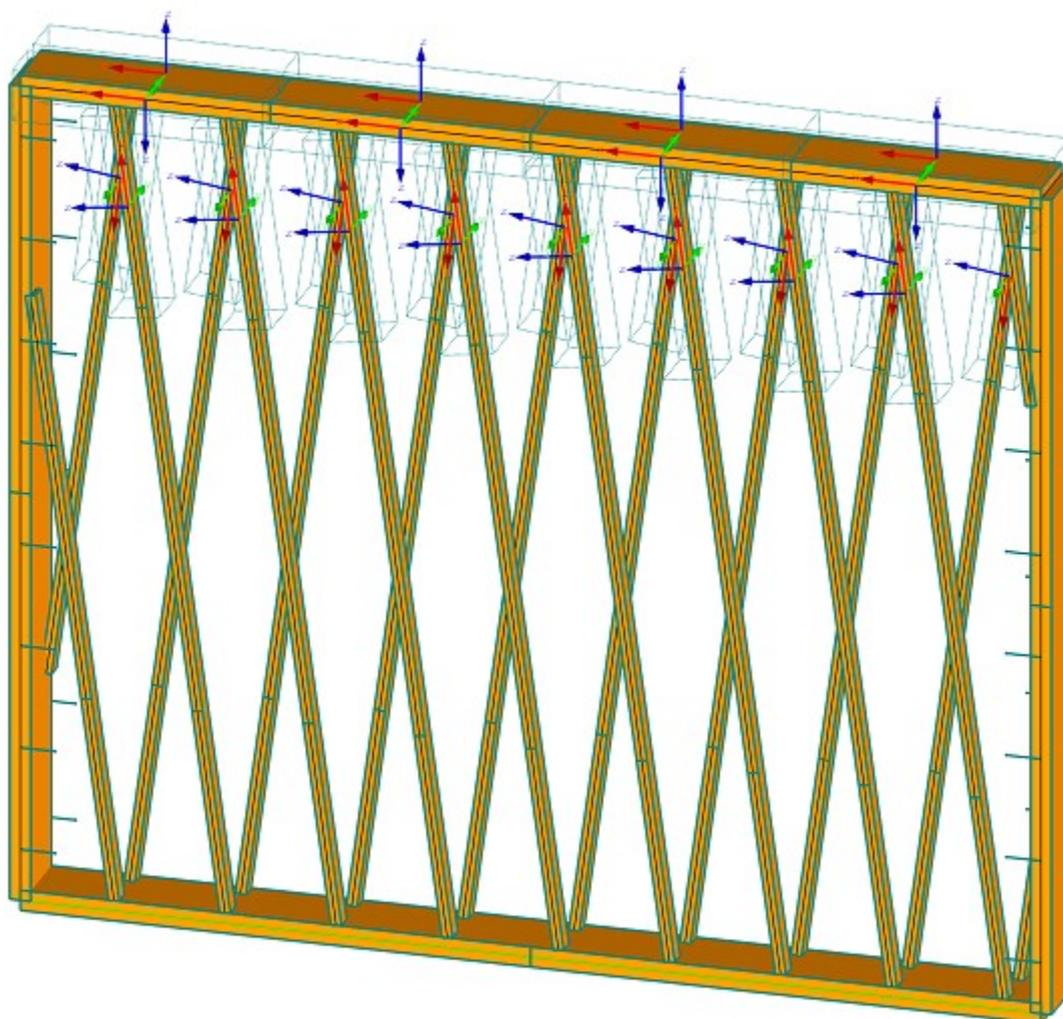


Abb. 3.16: Linienfreigabe zwischen äußeren Lamellen und OSB Beplankung inklusive des dazugehörigen lokalen Koordinatensystems

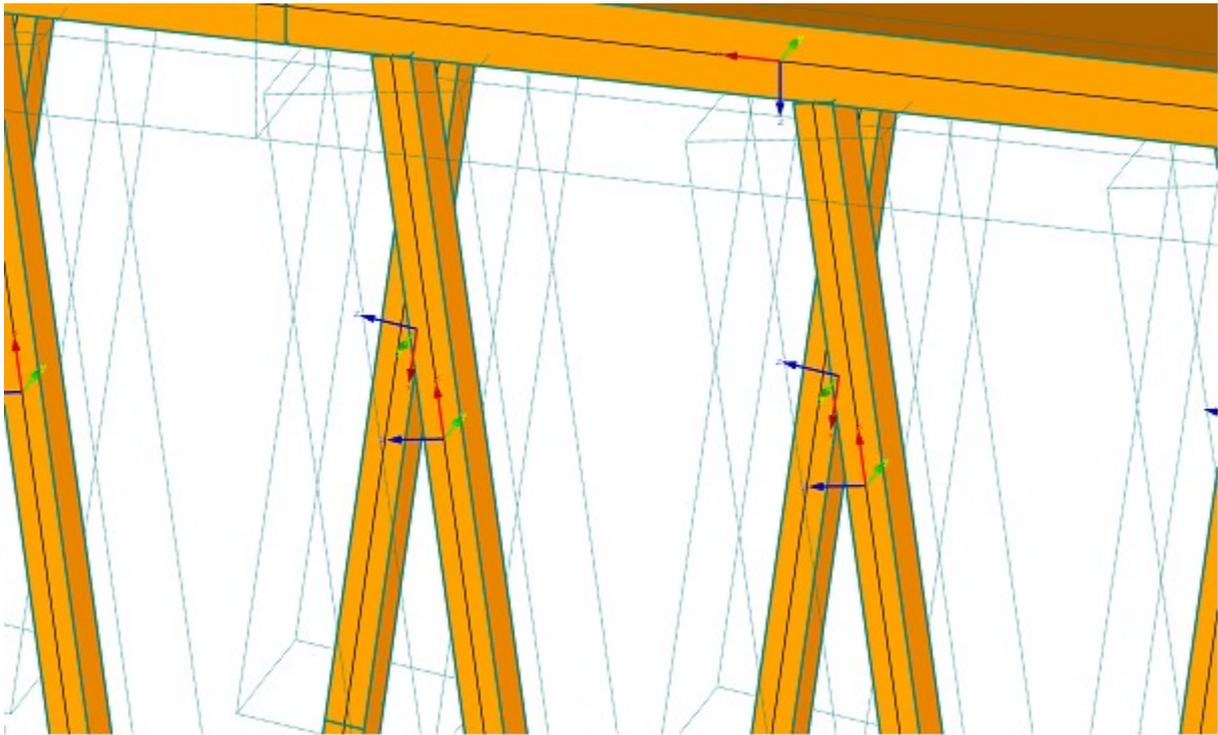


Abb. 3.17: Linienfreigabe zwischen äußeren Lamellen und OSB Beplankung inklusive des dazugehörigen lokalen Koordinatensystems (gezoomt in den oberen Bereich der Systemwand)

Zur Ermittlung der übertragbaren Last werden grundsätzlich dieselben Festigkeiten wie in Kap. 3.1.6 angesetzt. Theoretisch sind in diesem Zusammenhang andere Materialfestigkeiten einzusetzen, da die Schwelle eine Materialgüte von C20 und die Lamellen eine Materialgüte von C27 aufweist. Da diese Herangehensweise der Modellierung der Klebefugen jedoch ohnehin nur eine Näherung darstellt, wird der gewählte Ansatz als ausreichend genau bewertet. In den jeweiligen Achsrichtungen ergeben sich die Grenzlasten für die Klebefuge zwischen äußeren Lamellen und OSB Beplankung folgendermaßen.

$$X - \text{Richtung}(+/-) : f_{R,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_X = 1,0 * 10^{-1} * 3 * 100 = 30 \text{ kN/m} \quad (3.5)$$

$$Y - \text{Richtung}(+) : f_{t,90,k} = 0,4 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_Y = 0,4 * 10^{-1} * 3 * 100 = 12 \text{ kN/m} \quad (3.6)$$

$$Y - \text{Richtung}(-) : f_{c,90,k} = 2,3 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_Y = 2,3 * 10^{-1} * 3 * 100 = 69 \text{ kN/m} \quad (3.7)$$

$$Z - \text{Richtung}(+/-) : f_{R,k} = 0,8 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_Z = 0,8 * 10^{-1} * 3 * 100 = 24 \text{ kN/m} \quad (3.8)$$

Die im Modell als Berechnungsgrundlage dienenden Lastverformungskurven für die Klebfuge zwischen äußeren Lamellen und OSB Beplankung sind in den Abb.en 3.18, 3.19 sowie 3.20 dargestellt.

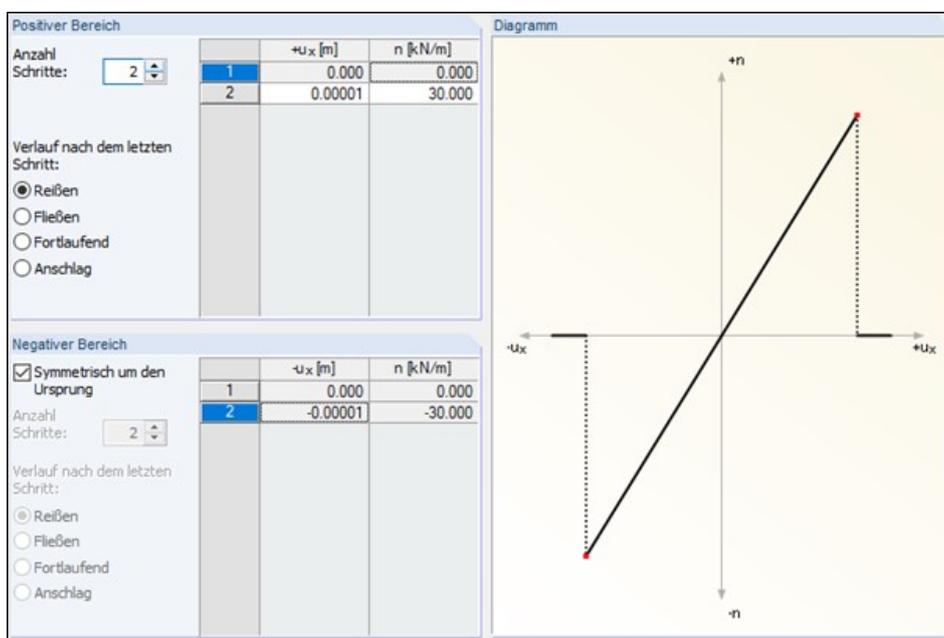


Abb. 3.18: Lastverformungskurve des Linienfreigabetyps zwischen den äußeren Lamellen und der OSB Beplankung in X-Richtung (Abscheren längs zur Lamelle)

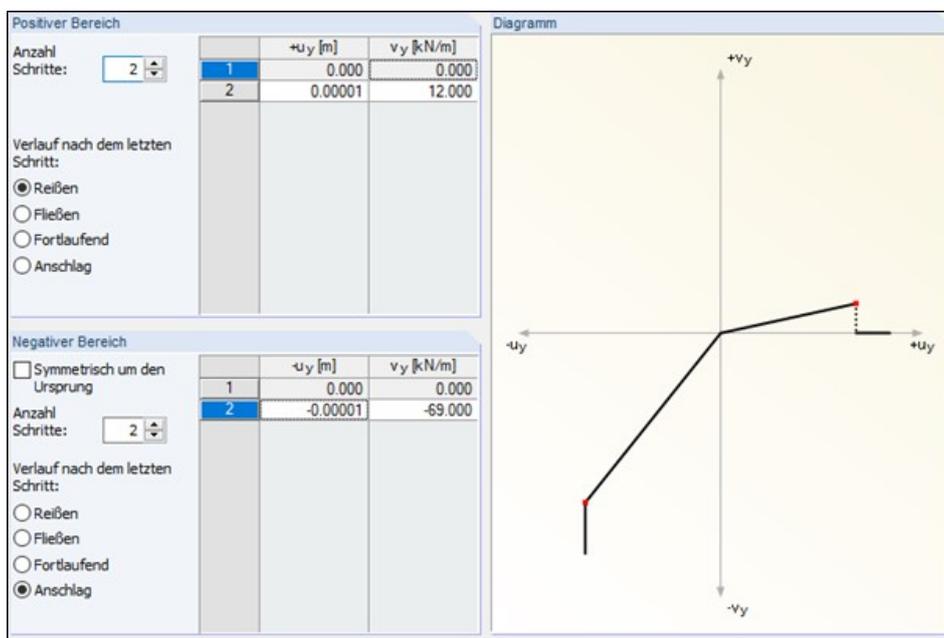


Abb. 3.19: Lastverformungskurve des Linienfreigabetyps zwischen den äußeren Lamellen und der OSB Beplankung in Y-Richtung (Abheben orthogonal zur OSB Ebene)

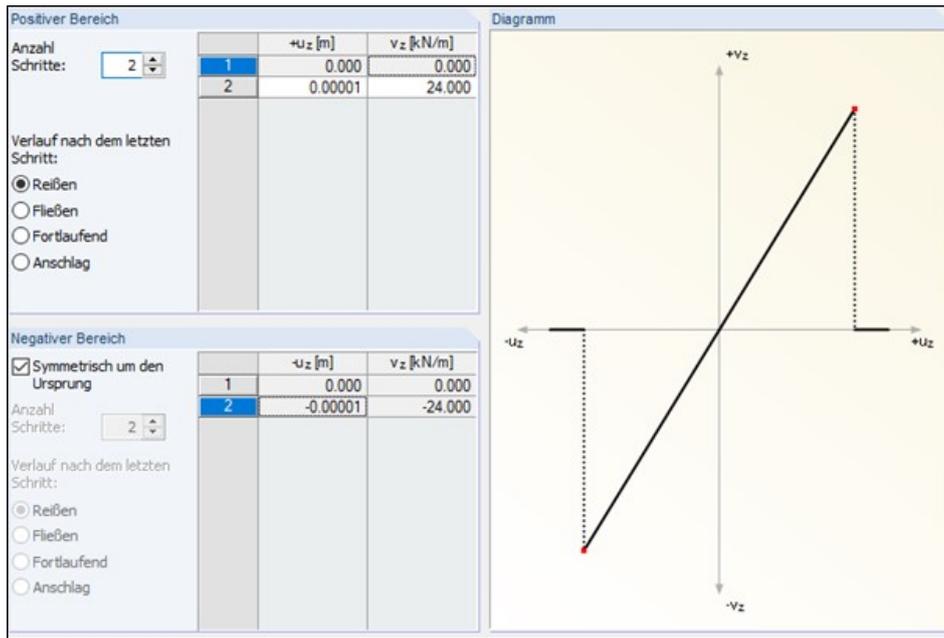


Abb. 3.20: Lastverformungskurve des Linienfreigabetyps zwischen den äußeren Lamellen und der OSB Beplankung in Z-Richtung (Abscheren quer zur Lamelle)

Wie bereits in Kap. 2.2.2 beschrieben liegt in Realität eine Interaktion zwischen den einzelnen beschriebenen Versagensmechanismen, in die jeweiligen Raumrichtungen, vor. Da diese Interaktion mit der Bemessungssoftware RFEM leider nicht modelliert werden kann, kann diese im Rechenmodell auch nicht abgebildet werden.

3.1.8 Kopplungspunkt Schwelle Lamelle

Die Analyse der Versuchsobjekte gemäß Kap. 1.6.4 ergab ein nicht lineares Einpressverhalten der Lamellen in die Schwellen. Durch die Durchführung weiterer Versuche der Firma EGGGER (siehe Kap. 1.6.5) konnte ein vereinfachter, bilinearer Zusammenhang dieser Einpressung abgeleitet werden (siehe Abb. 1.17 bzw. Tab. 1.6). Im Modell wird dieser näherungsweise bilineare Zusammenhang über ein Stabendgelenk definiert, welches am Schnittpunkt des Starrstabs (Verbindung zwischen Lamelle und Schwelle, genauere Beschreibung siehe Kap. 3.1.5) und der Lamellen situiert ist. Die Feder in Form des Stabgelenkes beinhaltet dabei sowohl die Einpressung der Lamellen in die Schwellen als auch die Längsstauchung der Lamelle durch ihre Druckbeanspruchung. Dargestellt ist das Modell in Abb. 3.21. Zu erwähnen ist, dass zur Vereinfachung des Modells keine Unterscheidung des Einpressverhaltens der inneren oder äußeren Lamellen vorgesehen wird. Das modellierte Gelenk gemäß Abb. 3.22 stellt keine Einspannung für Momente um die Y als auch die Z-Achse dar. Es wird jedoch angenommen, dass Momente um die X-Achse, die in diesem Fall der Stabachsenrichtung der Lamellen entspricht, durch eine Überdrückung der Fuge zwischen Lamelle und Schwelle sehr wohl übertragen werden können.

Die Stabendgelenke der inneren Lamellen werden jedoch insofern modifiziert, dass das Ausknicken der Innenlamellen durch die Begrenzung der übertragbaren Normalkraft der Stabendgelenke durch die Versagenslast, vereinfacht berechnet nach dem Ersatzstabverfahren, dieser simuliert wird. Auf die Parameter dieser Modellierungsstrategie wird noch genauer in Kap. 3.1.8.1 eingegangen. Die Parameter der Stabendgelenke an den äußeren Lamellen können den Abb. 3.22 sowie 3.23 entnommen werden.

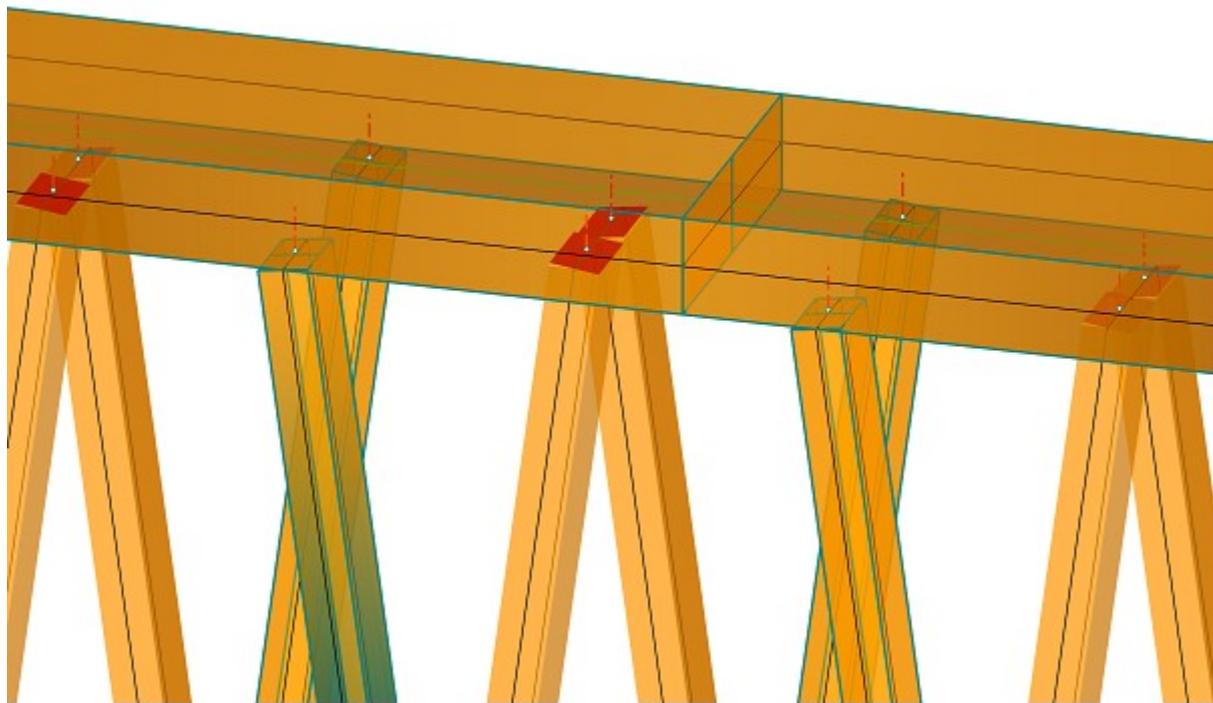


Abb. 3.21: Übersicht Stabendgelenke am Verbindungsstab zwischen Lamelle und Schwelle

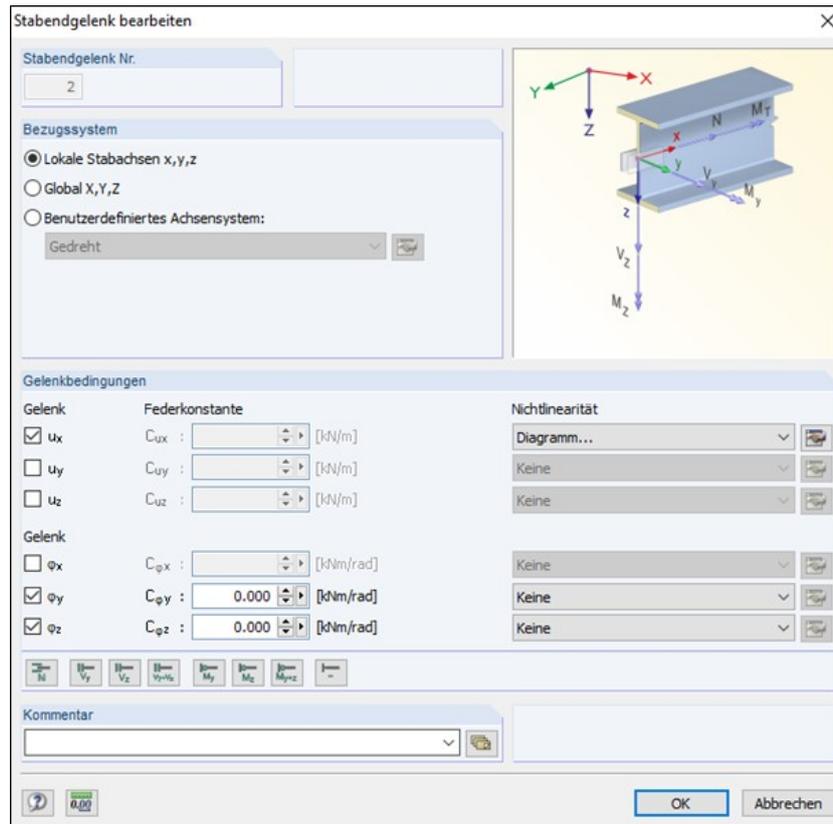


Abb. 3.22: Parameter des Stabengelenks der Verbindung zwischen den äußeren Lamellen und der Schwellen

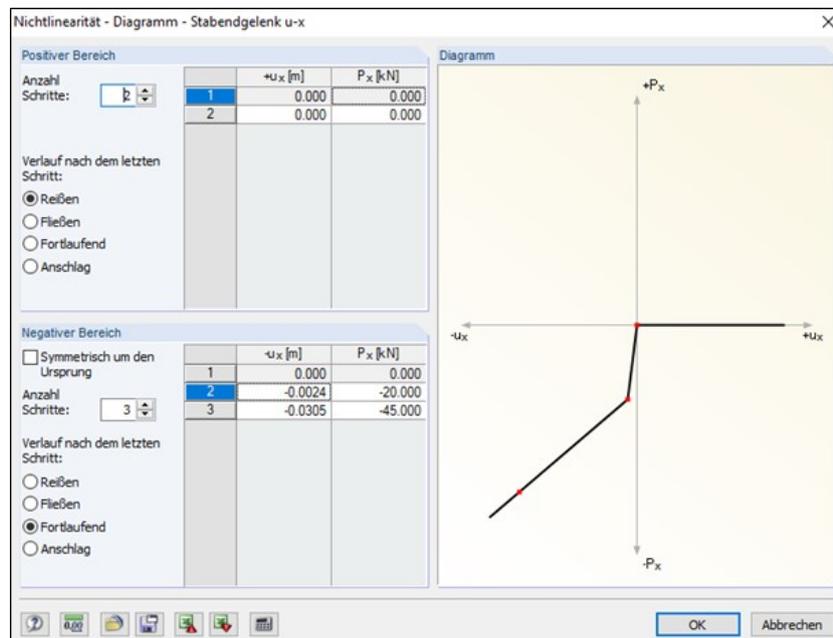


Abb. 3.23: Lastverformungskurve im Rechenmodell zur Simulation der Einpressung der äußeren Lamellen in die Schwellen

3.1.8.1 Knickversagen der Innenlamellen

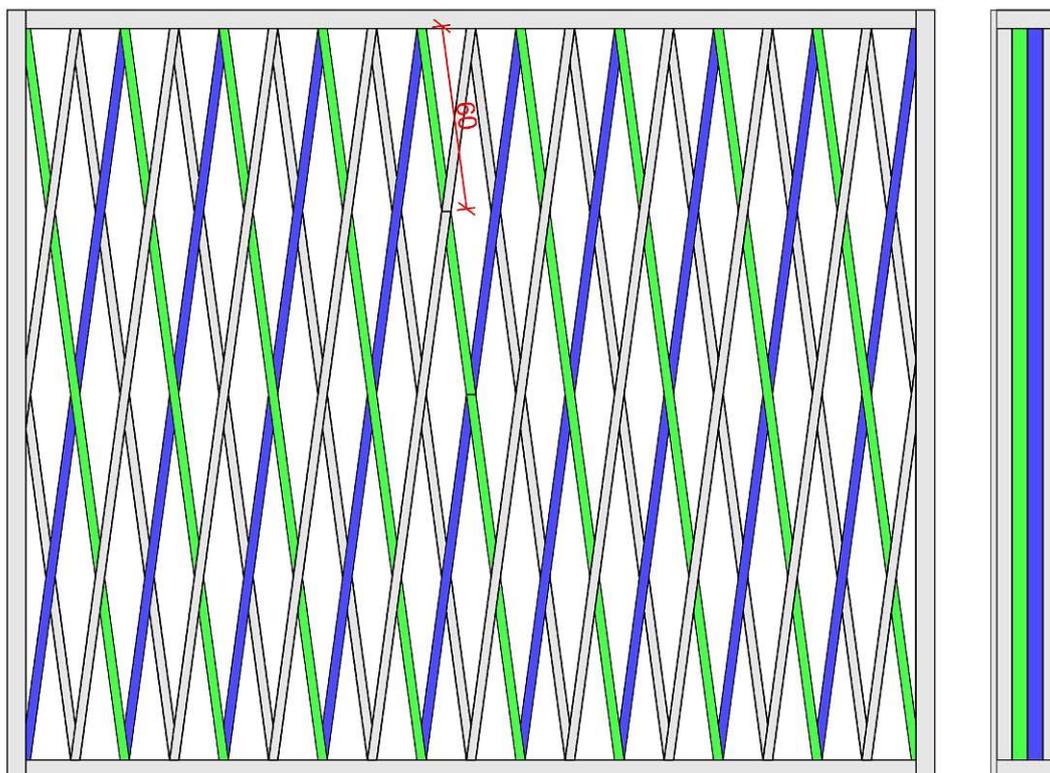


Abb. 3.24: Knicklänge Innenlamellen

Die inneren Lamellen sind zwischen ihren Kreuzungspunkten mit den äußeren und inneren Lamellen, an denen sie miteinander verklebt werden, nicht gehalten. Zwischen diesen Verklebungspunkten können die inneren Lamellen frei ausknicken. Zur Abschätzung der aufnehmbaren Last bis zum Ausknicken dieser Innenlamellen wird der Nachweis gegen Biegeknicken um die schwache Achse der Lamelle gemäß ÖNORM B 1995-1-1 Kap. 6.3.2 [8] herangezogen. Auf die Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten wird sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandseite verzichtet.

Zur Bestimmung der kritischen Versagenslast unter Drucknormalkraft muss die Knicklänge der Innenlamellen bei der vorliegenden Lagerung ermittelt werden. In Abb. 3.25 sind die 4 Eulerfälle dargestellt. Aus einer Grenzwertbetrachtung der Steifigkeit der Verklebung der Lamellen kann argumentiert werden, dass diese im weichsten Steifigkeitsfall einem Gelenk und im Starrsten Steifigkeitsfall einer Einspannung entspricht. Die Knicklänge muss demnach zwischen den folgenden beiden Grenzwerten liegen: [1]

$$l_{krit.,1} = 1,0 * 60 \text{ cm} = 60 \text{ cm} \quad (3.9)$$

$$l_{krit.,2} = 0,5 * 60 \text{ cm} = 30 \text{ cm} \quad (3.10)$$

Die Schlankheit der Innenlamellen um die schwache Achse muss der selben Logik folgend zwischen folgenden Werten liegen: [2]

$$\lambda_1 = \frac{l_{krit.,1}}{i} = \frac{60 \text{ cm}}{0,866 \text{ cm}} = 69,3 \quad (3.11)$$

$$\lambda_2 = \frac{l_{krit.,2}}{i} = \frac{30 \text{ cm}}{0,866 \text{ cm}} = 34,6 \quad (3.12)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{11,25 \text{ cm}^4}{15 \text{ cm}^2}} = 0,866 \text{ cm} \quad (3.13)$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{5 \text{ cm} * (3 \text{ cm})^3}{12} = 11,25 \text{ cm}^4 \quad (3.14)$$

$$A = b * h = 5 \text{ cm} * 3 \text{ cm} = 15 \text{ cm} \quad (3.15)$$

Aus den beiden Grenzwerten der Schlankheit können die beiden Grenzwerte der bezogenen Schlankheit errechnet werden: [8]

$$\lambda_{rel,1} = \frac{\lambda_1}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{69,3}{\pi} * \sqrt{\frac{2,2 \text{ kN/cm}^2}{1150 \text{ kN/cm}^2}} = 0,965 \quad (3.16)$$

$$\lambda_{rel,2} = \frac{\lambda_2}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{34,6}{\pi} * \sqrt{\frac{2,2 \text{ kN/cm}^2}{1150 \text{ kN/cm}^2}} = 0,482 \quad (3.17)$$

Die Grenzwerte der Versagenslasten gemäß EC 5 ergeben sich demnach zu: [8]

$$\frac{\frac{F_{krit,1}}{A}}{k_{c,1} * f_{c,0,k}} = 1 \rightarrow F_{krit,1} = A * k_{c,1} * f_{c,0,k} = 23,6 \text{ kN} \quad (3.18)$$

$$\frac{\frac{F_{krit,2}}{A}}{k_{c,2} * f_{c,0,k}} = 1 \rightarrow F_{krit,2} = A * k_{c,2} * f_{c,0,k} = 31,6 \text{ kN} \quad (3.19)$$

$$k_{c,1} = \frac{1}{k_1 + \sqrt{k_1^2 - \lambda_{rel,1}^2}} = 0,715 \quad (3.20)$$

$$k_{c,2} = \frac{1}{k_2 + \sqrt{k_2^2 - \lambda_{rel,2}^2}} = 0,956 \quad (3.21)$$

$$k_1 = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,1} - 0,3) + \lambda_{rel,1}^2) = 1,032 \quad (3.22)$$

$$k_2 = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,2} - 0,3) + \lambda_{rel,2}^2) = 0,634 \quad (3.23)$$

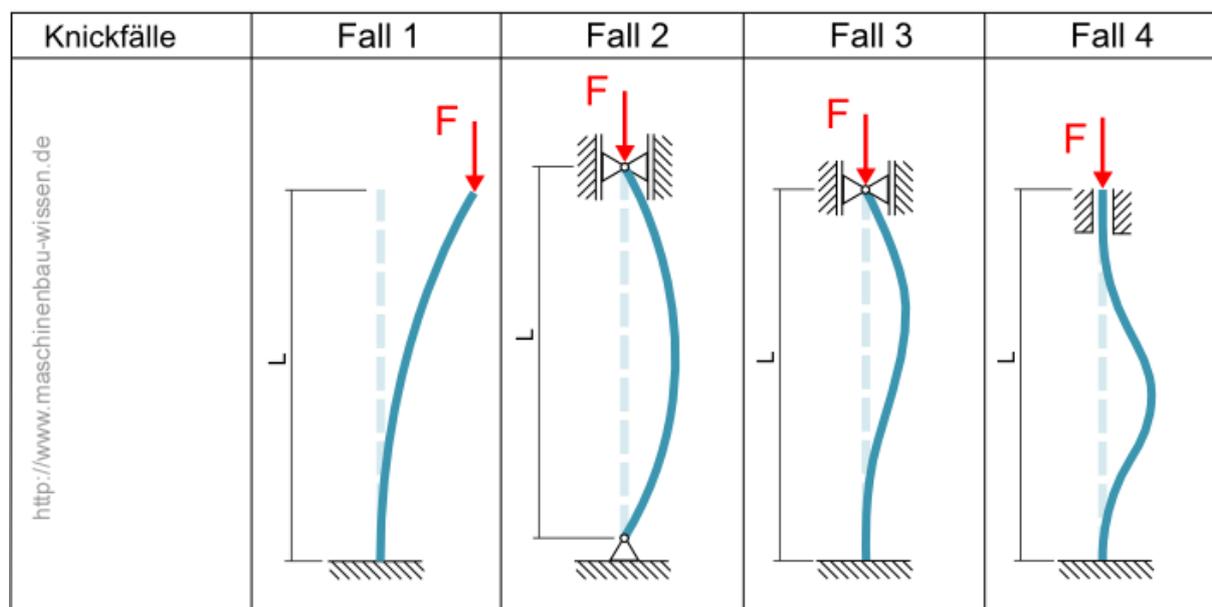
Knickfälle	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
				
Knicklängenbeiwert	$\beta = 2$	$\beta = 1$	$\beta = \frac{1}{2} \sqrt{2} \approx 0,7$	$\beta = 0,5$
Knicklänge s $s = \beta \cdot L$	$s = 2 \cdot L$	$s = L$	$s \approx 0,7 \cdot L$	$s = 0,5 \cdot L$
kritische Knicklast	$F_{\text{krit}} = \frac{\pi^2}{4L^2} EI$	$F_{\text{krit}} = \frac{\pi^2}{L^2} EI$	$F_{\text{krit}} = \frac{2\pi^2}{L^2} EI$	$F_{\text{krit}} = \frac{4\pi^2}{L^2} EI$

Abb. 3.25: Eulerfälle [1]

Da aufgrund der Schrägstellung der Lamellen auch eine gewissen Biegebeanspruchung (welche in der Abschätzung der Knicklast nicht berücksichtigt wurde) vorliegt, wird für die Modellbildung die unter Schranke der ermittelten idealisierten Knicklast in der Höhe von $F_{\text{krit,gew.}} = 23 \text{ kN}$ angesetzt. Diese Grenzlaster wurde in der Lastverformungskurve des Einpressverhaltens der Lamellen in die Schwellen (siehe Abb. 3.23) ergänzt. Konkret wurde die Lastverformungslinie aus Tab. 3.23 bei der Grenzlaster von $F_{\text{krit,gew.}} = 23 \text{ kN}$ gekappt. Das dem Berechnungsmodell zu Grunde liegende Lastverformungsdiagramm für das Einpressen der Innenlamellen in die Schwellen ist in Abb. 3.26 dargestellt.

Alternativ dazu hätte eine Berechnung nach Theorie zweiter Ordnung und eine Implementierung von Imperfektionen auf die Lamellen ein ebenso zufriedenstellendes Ergebnis geliefert. Da aber sowohl der Modellierungs- als auch der Rechenaufwand dieser alternativen Herangehensweise komplexer und aufwändiger gewesen wäre, wurde auf die zuvor aufgezeigte Vereinfachung zurückgegriffen.

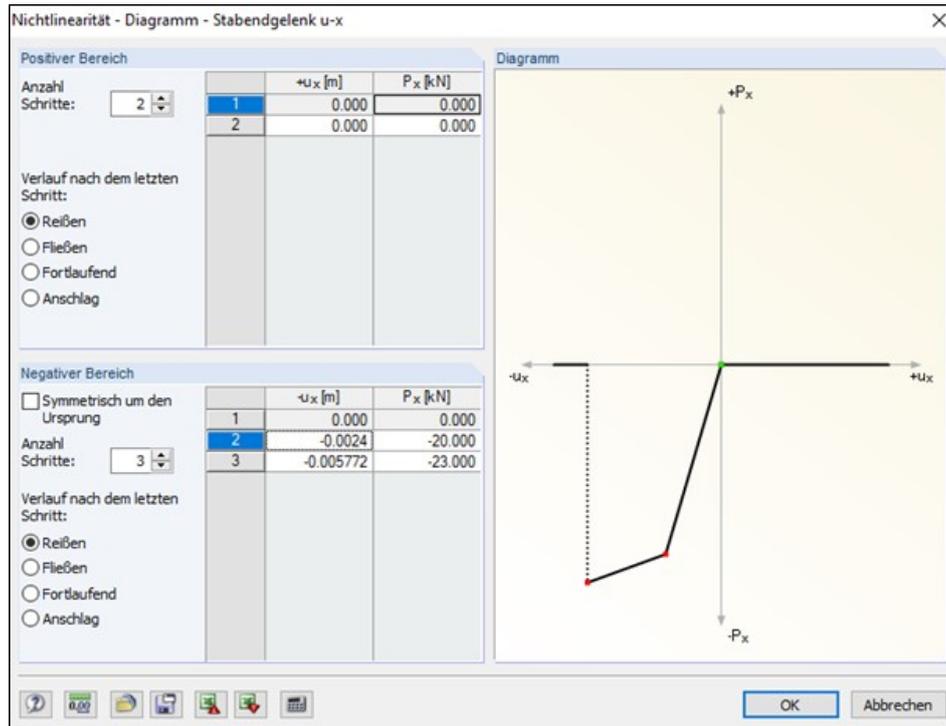


Abb. 3.26: Lastverformungskurve im Rechenmodell zur Simulation der Einpressung der inneren Lamellen in die Schwellen inklusive Limitierung der kritischen Normalkraft-Tragfähigkeit der Innenlamellen ($F_{krit, gew.} = 23 \text{ kN}$)

3.1.9 Kopplungspunkt der Lamellen

Die Lamellen werden in ihren Kopplungspunkten miteinander verklebt. Da ein Versagen dieser Verklebung aus den Belastungsversuchen (Kap. 1.6.4) nicht bzw. erst durch ein Ausknicken der Innenlamellen erkennbar ist, kann angenommen werden, dass die Verklebung bis zum Ende des Belastungszyklus gehalten hat. Besondere Maßnahmen in Bezug auf die Modellierung sind somit sowohl bezüglich den Verbindungspunkten zwischen den Innenlamellen als auch bezüglich den Verbindungspunkten zwischen den Außen- und Innenlamellen nicht zu treffen. Aus modelltechnischer Sicht ergibt sich, dass die Innenlamellen (aufgrund der Modellierung als Stab) keinen Kreuzungspunkt in den real vorhandenen Verbindungspunkten aufweisen. Daher wurde, um eine kraftschlüssige Verbindung an diesen Stellen modellieren zu können, ein Starrstab zwischen den beiden Innenlamellen in den Kreuzungspunkten modelliert (vergrößert dargestellt in Abb. 3.27).

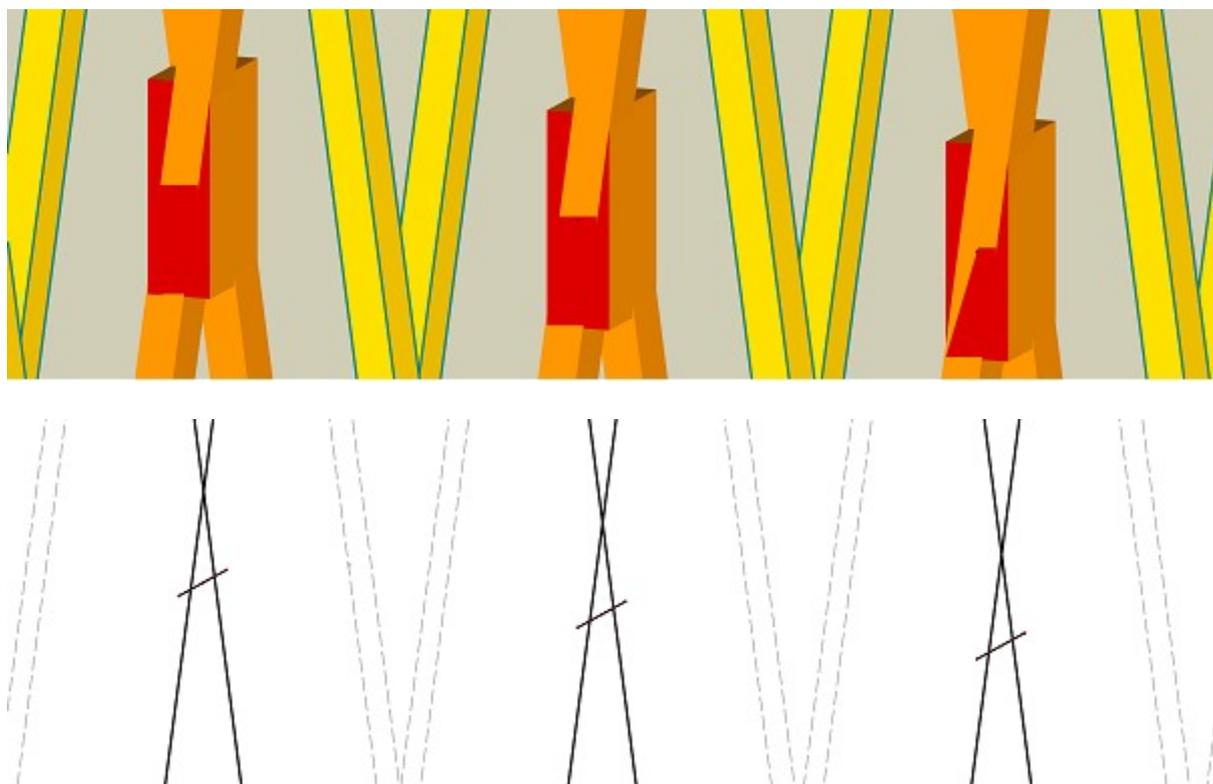


Abb. 3.27: Ausschnitte aus dem Rechenmodell - Kopplungsstäbe der Innenlamellen

Ebenfalls aus der Modellbildung ergibt sich, dass die Außenlamellen und die Innenlamellen an ihren Kreuzungspunkten von Stabachse und flächigem Bauteil keine Kopplung im Modell aufweisen. Aufgrund dessen werden im Modell dieselben Kopplungsstäbe zwischen den Innen- und Außenlamellen wie bei den Kreuzungspunkten der Innenlamellen eingeführt. Diese Kopplungsstäbe werden ohne Torsionsgelenk modelliert was einem biegesteifen Anschluss der Lamellen entspricht.

3.1.10 Lagerung

In diesem Kapitel werden die Lagerungsbedingungen des Rechenmodells dargestellt. Es wird anhand der Lagerung des Versuchskörpers in den Belastungsversuchen [4] die geeignete Lagerung im FE-Modell abgeleitet. Zuzufolge des Prüfberichtes der Belastungsversuche wurde die untere Schwelle der Systemwand vollflächig aufgelagert (zu sehen in Abb. 3.28). Im Gegensatz dazu wurden die beiden seitlich aufgeklebten OSB Platten an der Unterkante der Konstruktion nicht gehalten. Demnach wird im Modell ein Flächenlager nur für die Schwelle vorgesehen. Die Darstellung des Flächenlagers im Modell kann der Abb. 3.30 entnommen werden. In Abb. 3.29 werden die Lagerungsparameter des Flächenlagers abgebildet.



Abb. 3.28: Darstellung der Lagerung der unteren Schwelle im Belastungsversuch [4]

Lagerbedingungen

Lager	Federkonstante	Nichtlinearität
<input type="checkbox"/> u_x	$C_{u,x}$: 0.000 [kN/m ³]	Ausfall falls Kontaktspannung in z negati
<input type="checkbox"/> u_y	$C_{u,y}$: 0.000 [kN/m ³]	
<input checked="" type="checkbox"/> u_z	$C_{u,z}$: [kN/m ³]	
Schub		
<input checked="" type="checkbox"/> v_{xz}	$C_{v,xz}$: [kN/m]	
<input checked="" type="checkbox"/> v_{yz}	$C_{v,yz}$: [kN/m]	

Kommentar

OK Abbrechen

Abb. 3.29: Lagerungsparameter des Flächenlagers der unteren Schwelle

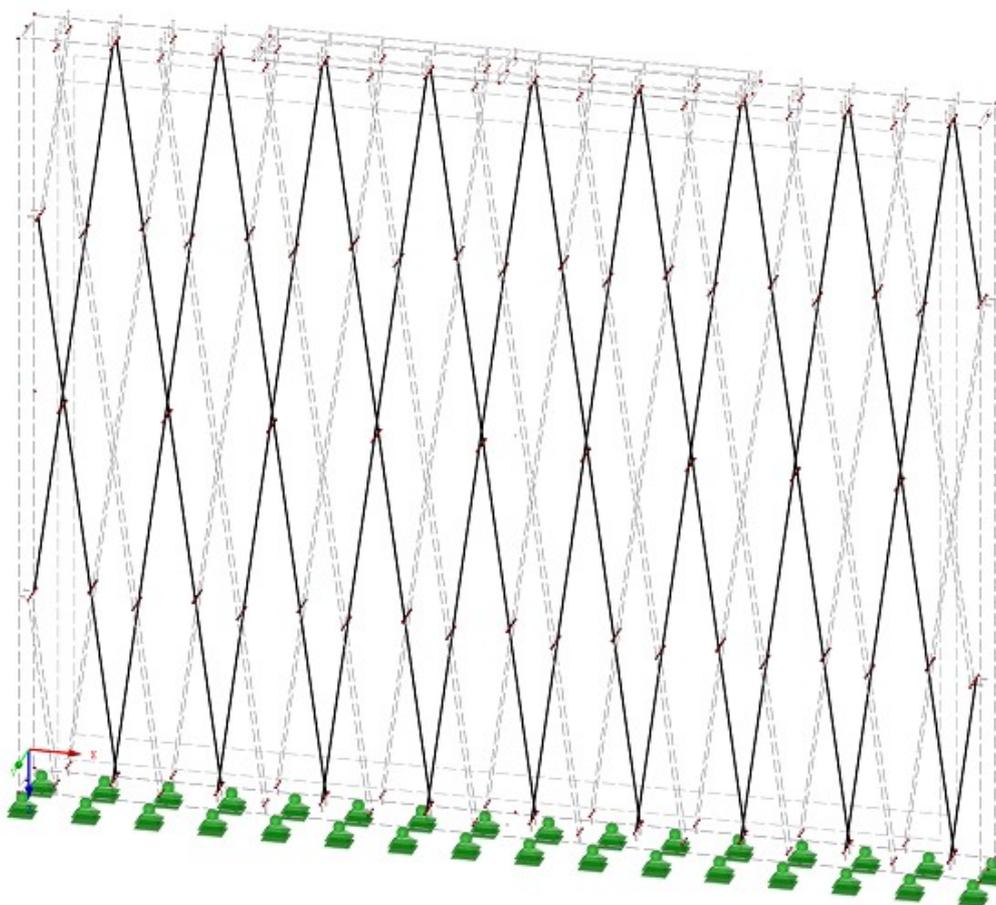


Abb. 3.30: Darstellung der Lagerung der unteren Schwelle im Belastungsversuch

Als zusätzliche vertikale Lagerung werden die einzelnen Lamellen im Rechenmodell an ihren Fußpunkten durch Knotenlager gehalten (dargestellt in Abb. 3.31).

Weiters in Abb. 3.31 dargestellt ist das Knotenlager im Bereich des Lasteinleitungsbleches, welches rein zur Aufbringung der ideal vertikalen bzw. ideal horizontalen Last (in den jeweiligen Belastungsszenarien) dient. Die zusätzlichen Knotenlager an den Fußpunkten der Lamellen im Modell lassen eine einfachere Form der Darstellung der Schnittgrößen in den einzelnen Lamellen zu. Zu erwähnen ist, dass das Einpressen der Lamellen in die Schwellen bereits durch ein Stab-gelenk simuliert wird (siehe Kap. 3.1.8). Daher muss die Kopplung zwischen den Lamellen und der Schwelle nicht mehr direkt aus dem Modell beurteilt werden und es können die einzelnen Lamellen eben punktuell gelagert werden.

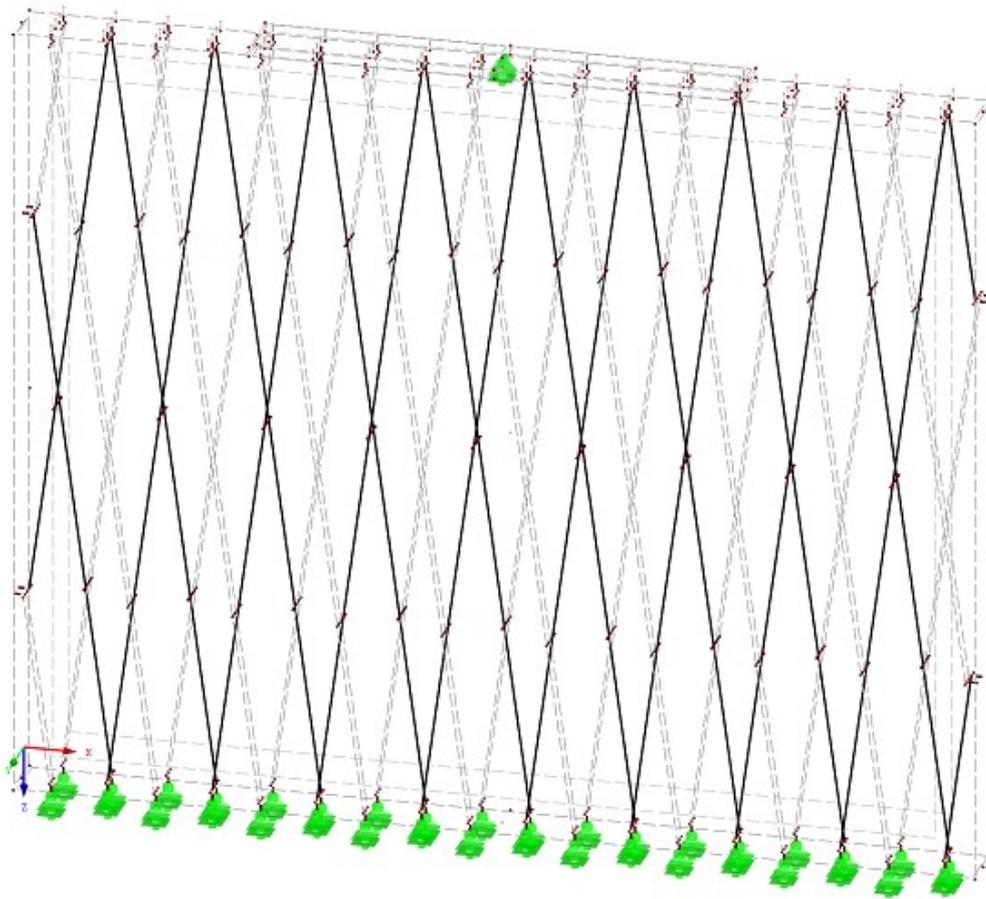


Abb. 3.31: Knotenlager der Lamellen sowie Knotenlager zur Lasteinleitung

Lagerbedingungen		
Lager		
<input type="checkbox"/> u_x :	Federkonstante $C_{u,X}$: 0.000 [kN/m]	Nichtlinearität Keine
<input type="checkbox"/> u_y :	$C_{u,Y}$: 0.000 [kN/m]	Keine
<input checked="" type="checkbox"/> u_z :	$C_{u,Z}$:	Keine
Einspannung		
<input type="checkbox"/> φ_x :	$C_{\varphi,X}$: 0.000 [kNm/rad]	Keine
<input type="checkbox"/> φ_y :	$C_{\varphi,Y}$: 0.000 [kNm/rad]	Keine
<input type="checkbox"/> φ_z :	$C_{\varphi,Z}$: 0.000 [kNm/rad]	Keine
<input type="checkbox"/>		
Kommentar		
<input type="text"/>		
		OK Abbrechen

Abb. 3.32: Lagerungsparameter der Knotenlager der Lamellen

Abb. 3.33: Lagerungsparameter des Knotenlagers für die Lasteinleitung (notwendig zur Einleitung der Zwangsverformung)

Weiters wurde der Versuchskörper gemäß Abb. 3.35 gegen seitliches Ausweichen der Wand gehalten. Realisiert wird diese Lagerung im Modell durch zwei Linienlager entlang der Mittellinie der Schwellen gemäß Abb. 3.36.

Für den Belastungsfall Schub wurde der Versuchskörper einseitig im Bereich der unteren Schwelle mit einer Zugankerkonstruktion und auf der andere Seite mittels Schubankern gemäß Abb. 3.34 gehalten. Diese beiden Lager werden im Rechenmodell durch Linienlager im Bereich der unteren Schwelle realisiert. Die Schubanker stellen eine Halterung in Längsrichtung der Wand dar. Die Zugankerkonstruktion verhindert dabei ein Abheben der Wand im Fußschwellenbereich. Diese Lager werden ebenfalls in Abb. 3.36 dargestellt.

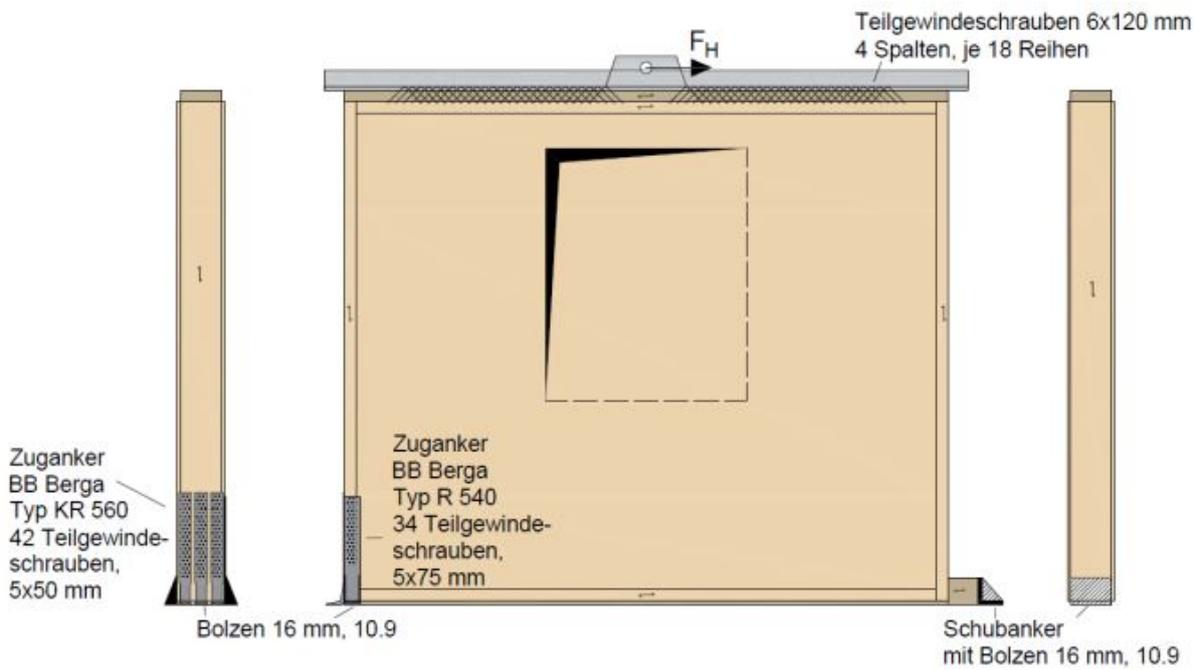


Abb. 3.34: Lagesicherung des Versuchskörpers gegen Schubbelastung [4]



Abb. 3.35: Lagesicherung des Versuchskörpers gegen seitliches Ausweichen [4]

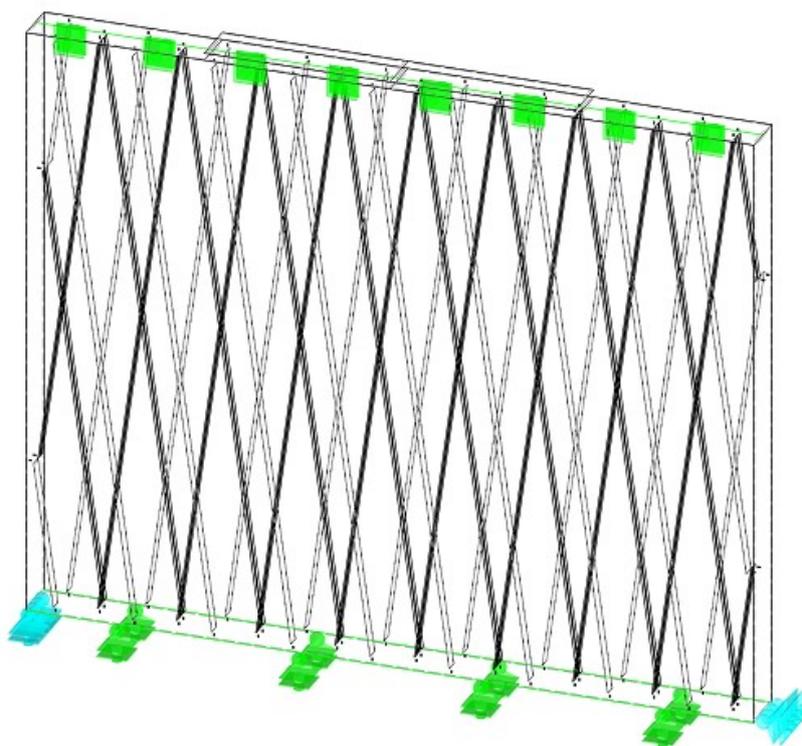


Abb. 3.36: Linienlager gegen seitlichen Ausweichen der Konstruktion sowie Linienlager im Fußpunktbereich zur Lagerung im Belastungsfall Schub

3.1.11 Belastung

Die Belastung wird sowohl im vertikalen als auch im horizontalen Belastungsfall im Sinn einer verformungsgesteuerten Versuchsdurchführung auf das Knotenlager im Bereich des Lasteinleitungsbleches aufgebracht. Die Wahl einer verformungsgesteuerten anstelle einer kraftgesteuerten Belastung ist darauf zurückzuführen, dass nur durch diese Art der Modellierung ein Lastabfall nach Erreichen der aufnehmbaren Maximallast in der Software RFEM abgebildet werden kann. Die Aufbringung der jeweiligen Belastung erfolgt stufenweise, wobei die Ergebnisse jeder Laststufe für weitere Auswertungen gespeichert werden. Im Fall der vertikalen Belastung ist die Basisbelastung eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 1 mm gemäß Abb. 3.38 und 3.37. Der Anfangslastfaktor in Abb. 3.37 beschreibt, dass die Basisbelastung multipliziert mit diesem Faktor den ersten Lastschritt bei stufenweiser Aufbringung der Belastung darstellt. Die Lastfaktorsteigerung multipliziert mit der Basisbelastung beschreibt den Lastzuwachs pro Laststufe.

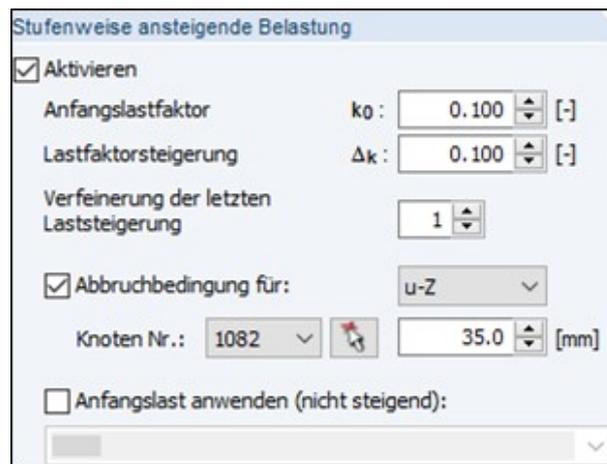
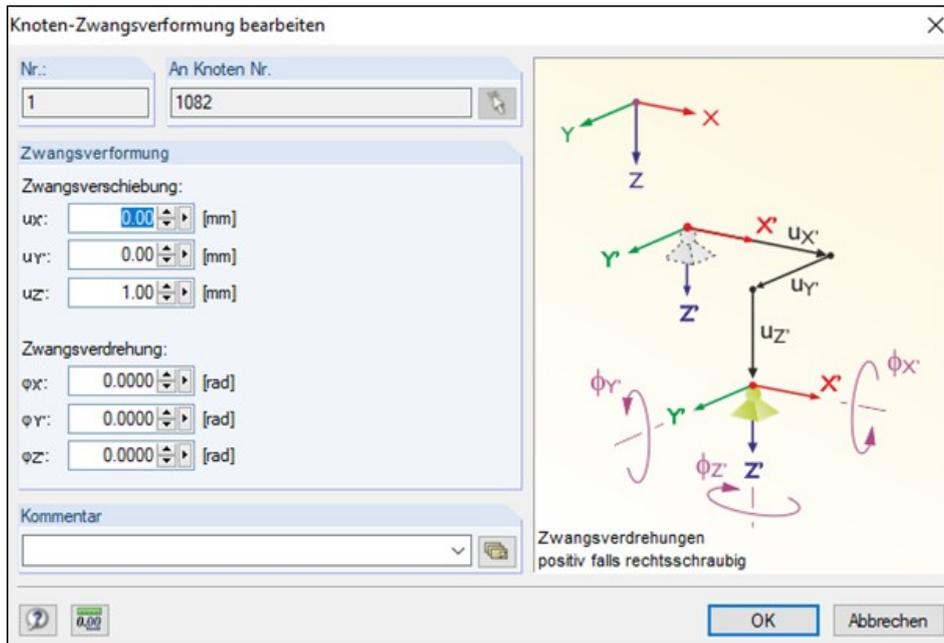


Abb. 3.37: Parameter der vertikalen Belastung

Sichtbarkeitsmodus - Benutzerdefiniert
Belastung [mm]
LF1 : Vertikallast TH 3.O. (nur Schwelle belastet)

Isometrie

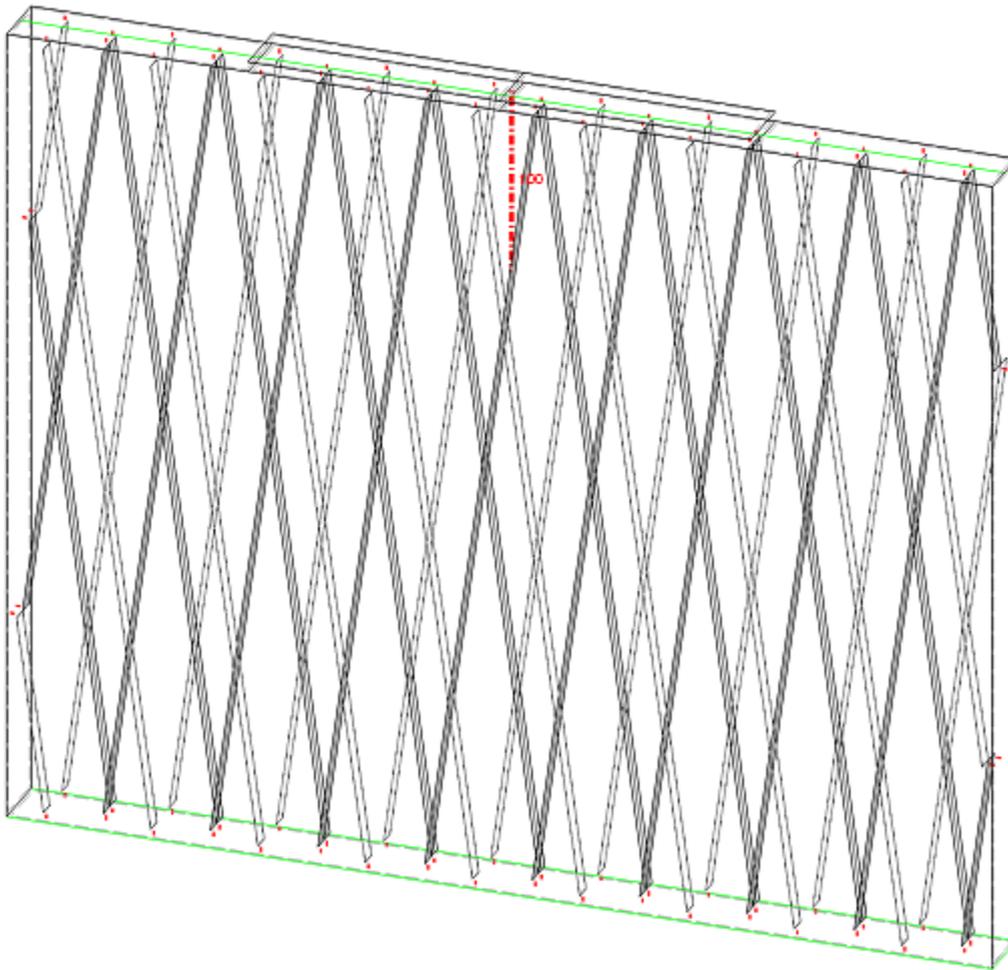


Abb. 3.38: Lastbild vertikale Basisbelastung

Die für den Belastungsfall Schub aufgebrauchte Basisbelastung entspricht einer eingprägten Verschiebung in X-Richtung (entspricht der Wandlängsrichtung). Die Parameter der aufgebrauchten Schubbelastung können der Abb. 3.39 entnommen werden.

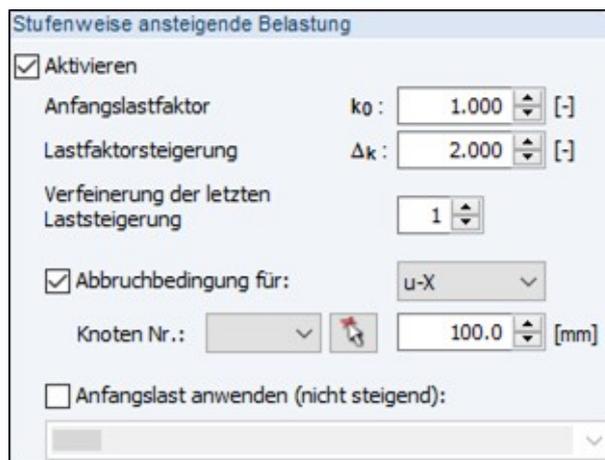
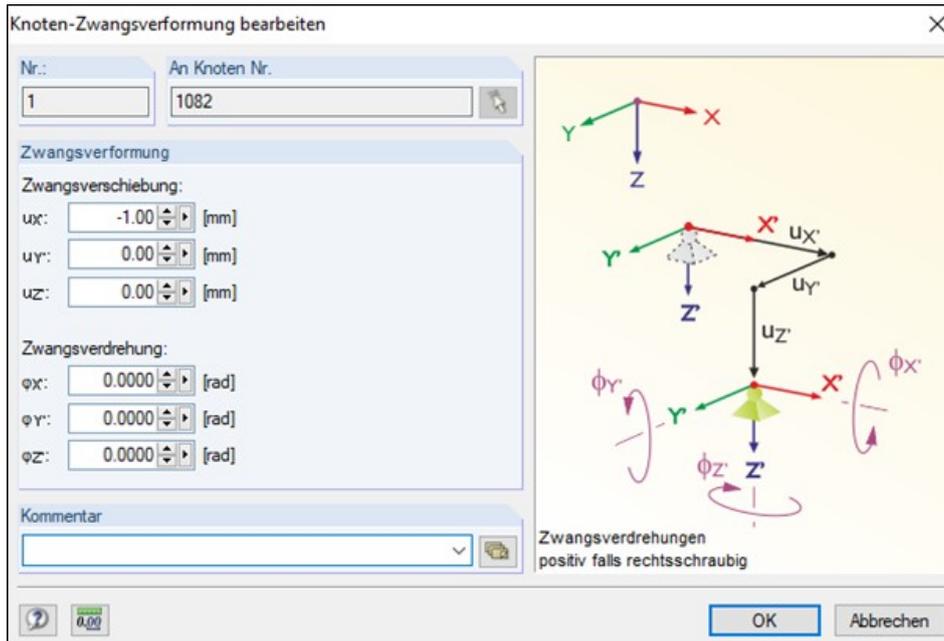


Abb. 3.39: Parameter der Schubbelastung

3.2 Validierung der Modellbildung für vertikale Belastung

Abb. 3.40 stellt die Lastverformungskurve des vertikalen Belastungsversuchs aus Kap. 1.6.4.1 und die Lastverformungskurve des Rechenmodells gegenüber. Die Modellierung des Belastungsversuchs wurde bereits eingehend in Kap. 3.1 beschrieben. Dabei wird die im Versuchsbericht zu den Belastungsversuchen [4] abgebildete Lastverformungskurve des Belastungsversuchs V1.1 mit einer Anfangsverformung von 8 mm abgebildet. Diese Modifizierung ergibt sich aus der Analyse der Rechenmodelle und lässt sich durch ein anfängliches Schließen von etwaigen Fugen bei der Versuchsdurchführung bis zum Erreichen eines kraftschlüssigen Verbundes innerhalb der Konstruktion erklären.

Die markierten Bereiche (A-F) in den Abb. 3.40, 3.54, 3.75 und 3.86 stellen in diesem Zusammenhang markante bzw. besonders relevante Situationen im Traglastverhalten der jeweiligen Konstruktion dar. In weiterer Folge werden die mechanischen Zusammenhänge dieser markanten Bereiche im Lastverformungsdiagramm anhand der Analyse der Ergebnisse der Rechenmodelle näher beschrieben bzw. erläutert.

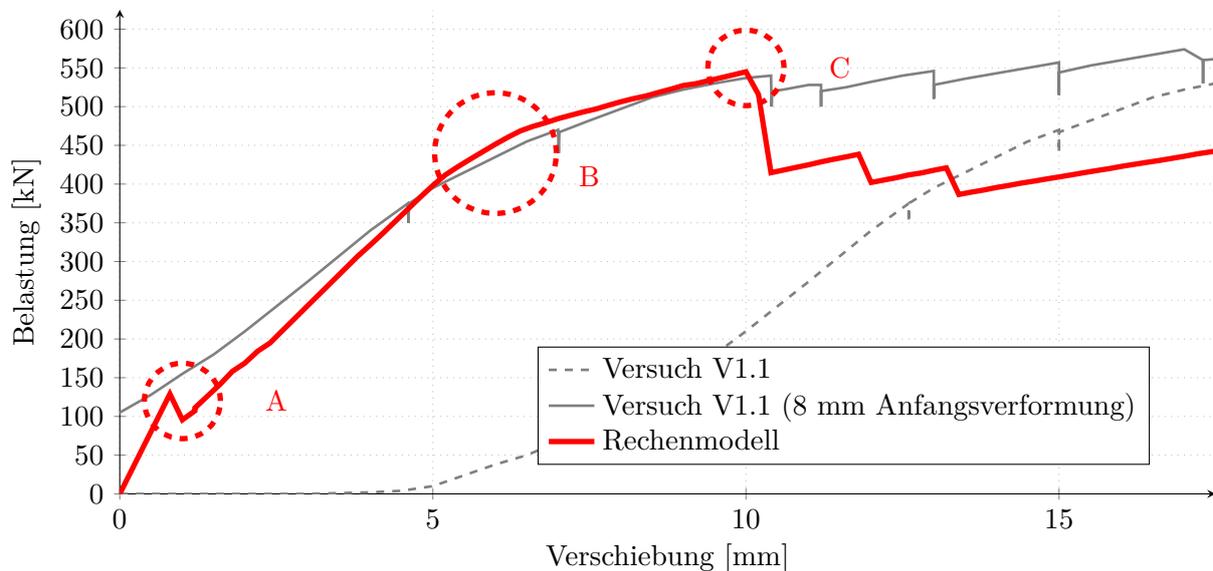


Abb. 3.40: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms des *Belastungsversuchs* und des *Rechenmodells* der Systemwand

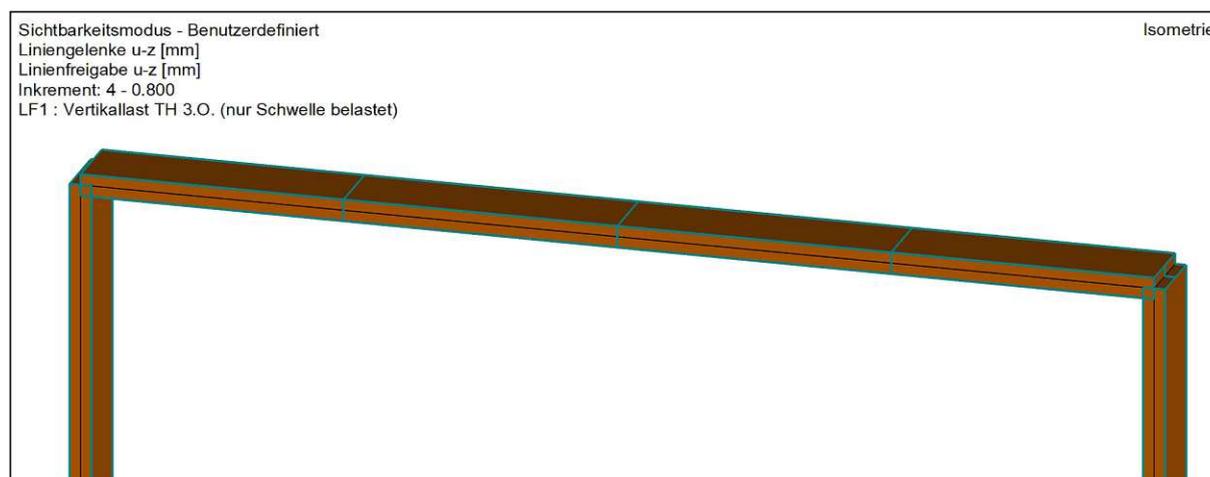


Abb. 3.43: Vertikale Relativverformung der gerissenen Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 0,8 mm

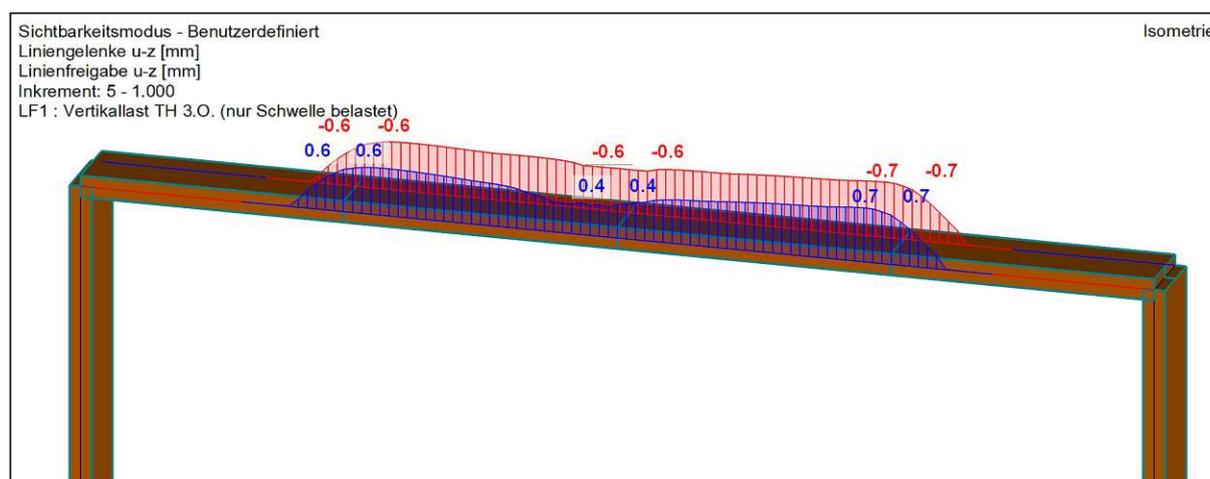


Abb. 3.44: Vertikale Relativverformung der gerissenen Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 1,0 mm

Aus Abb. 3.41, 3.42, 3.43 sowie 3.44 geht hervor, dass bei einer eingepprägten Verschiebung zwischen 0,9 mm und 1,0 mm die Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung versagt. Diese vertikale Zwangsverformung entspricht in etwa einem Lastniveau von 150 kN gemäß Abb. 3.40. Das Versagen dieser Verklebung hat zur Folge, dass die Kraftübertragung in dieser Fuge schlagartig nicht mehr vorhanden ist. Ab diesem Zeitpunkt wird die aufgebrachte Kraft auf die Schwelle nur noch direkt in die Lamellen eingeleitet. Die Belastung der OSB Platten kann nunmehr nur noch über die Verklebung der äußeren Lamellen mit der OSB Beplankung erfolgen.

Dieses schlagartige Versagen der Klebefuge im Rechenmodell erklärt auch den Sprung in Abb. 3.40 beim markierten Punkt A. Dieser Sprung in der Lastverformungskurve resultiert aus dem spröden Versagen der Klebefuge. In Realität versagt die Klebefuge jedoch kontinuierlich was die Diskrepanz zwischen der Lastverformungskurve des Rechenmodells und der Lastverformungskurve des Versuchskörpers erklärt.

3.2.2 Bereich B - Einpressung der Lamellen in die obere Schwelle

In Abb. 3.40 ist erkennbar, dass bei einem Lastniveau zwischen 400 kN und 450 kN ein erstes, und zwischen 450 kN und 500 kN ein zweites Abflachen der Lastverformungskurve zu erkennen ist. Diese Änderung der Systemsteifigkeit ist darauf zurückzuführen, dass der in Kap. 1.6.5 eingehend beschriebene bilineare Zusammenhang der Lastverformungskurve der Einpressung der Lamellen in die Schwellen genau jenes Lastniveau erreicht, an dem dieser Zusammenhang sein Lastverformungsverhalten ändert (siehe Kap. 1.6.5 und Kap. 3.1.8, insbesondere Abb. 1.17 sowie Abb. 3.23). In den Abb. 3.45 bzw. 3.46 wird hierbei ersichtlich, dass der erste Knick in der Lastverformungskurve durch Erreichen der bilinearen Grenzlast im Bereich der äußeren Lamellen hervorgerufen wird. Die Abb. 3.47 zeigt das Erreichen der bilinearen Grenzlast der Einpressung im Bereich der inneren Lamellen, was zum zweiten Knick in der Lastverformungskurve führt. Der Grenzwert des linear elastischen Zusammenhangs der Einpressung liegt hierbei bei 20 kN.

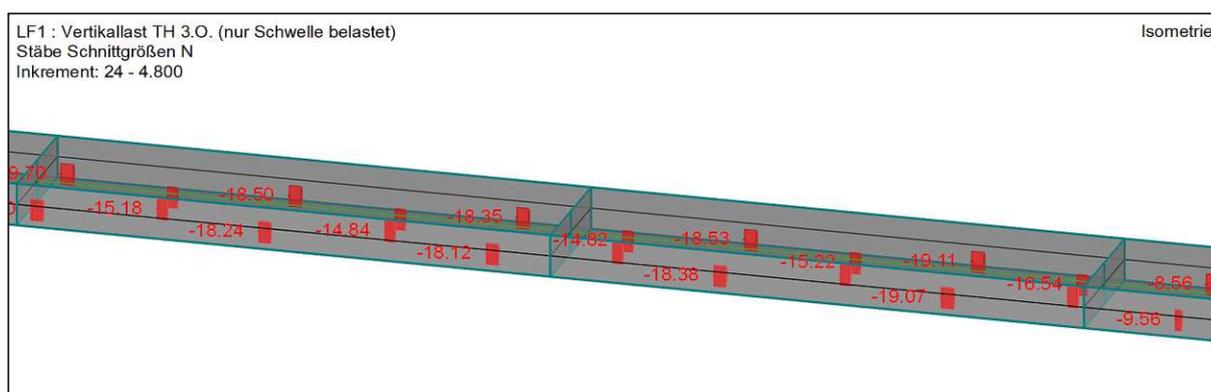


Abb. 3.45: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 4,8 mm

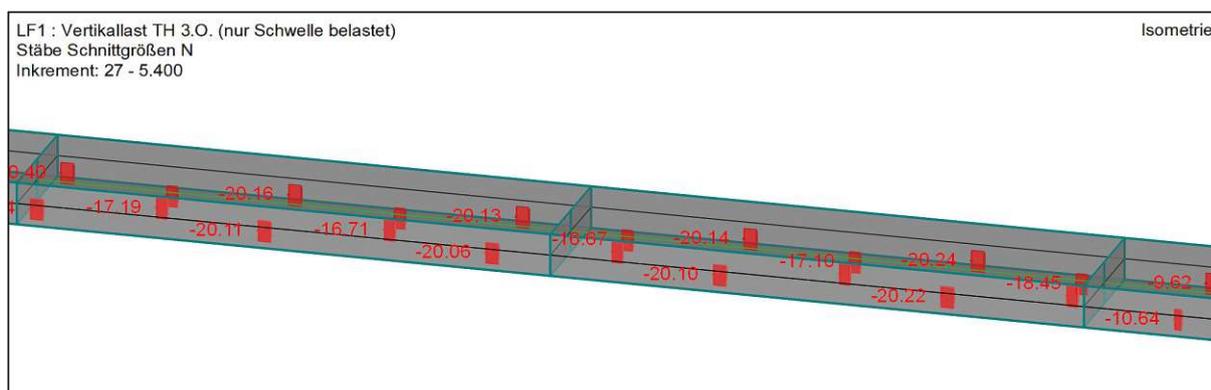


Abb. 3.46: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 5,4 mm

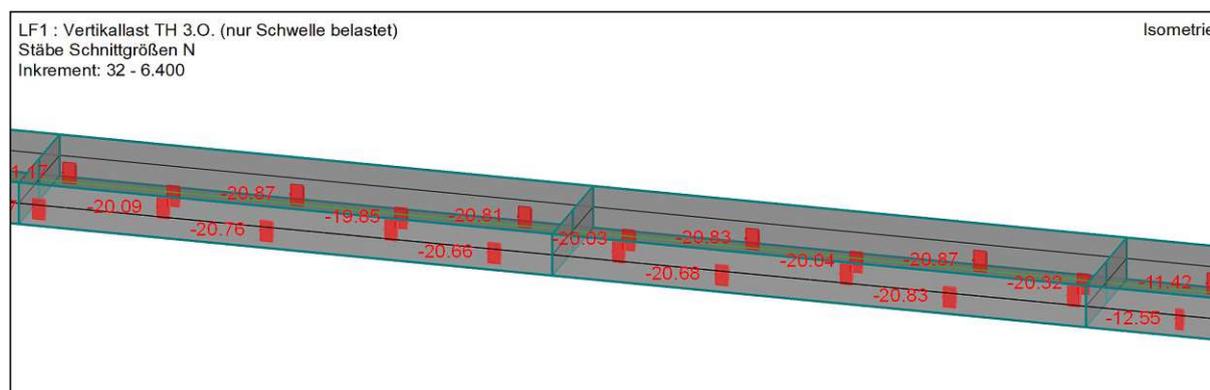


Abb. 3.47: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 6,4 mm

3.2.3 Bereich C - Knickversagen der Innenlamellen

Der Punkt C in Abb. 3.40 markiert die Traglast der Systemwand unter vertikaler Belastung. Diese wird begrenzt durch das Ausknicken der Innenlamellen zwischen den Lagerungspunkten im Bereich der Lasteinleitung. Die kritische Knicklast der Innenlamellen beträgt idealisiert 23 kN (siehe Kap. 3.1.8.1). In Abb. 3.48 ist erkennbar, dass bei einer eingepprägten Verschiebung von 10,2 mm diese kritische Last in den Innenlamellen bereits nahezu erreicht wird und somit ein Versagen dieser bei weiterer Laststeigerung eintritt. Ab einer eingepprägten Verformung von 10,4 mm sind bereits einige Innenlamellen ausgeknickt und tragen somit nicht mehr zum weiteren Lastabtrag bei. Da nicht alle Innenlamellen zugleich Versagen, ist ein Lastabfall in der Lastverformungskurve in Abb. 3.40 zu erkennen.

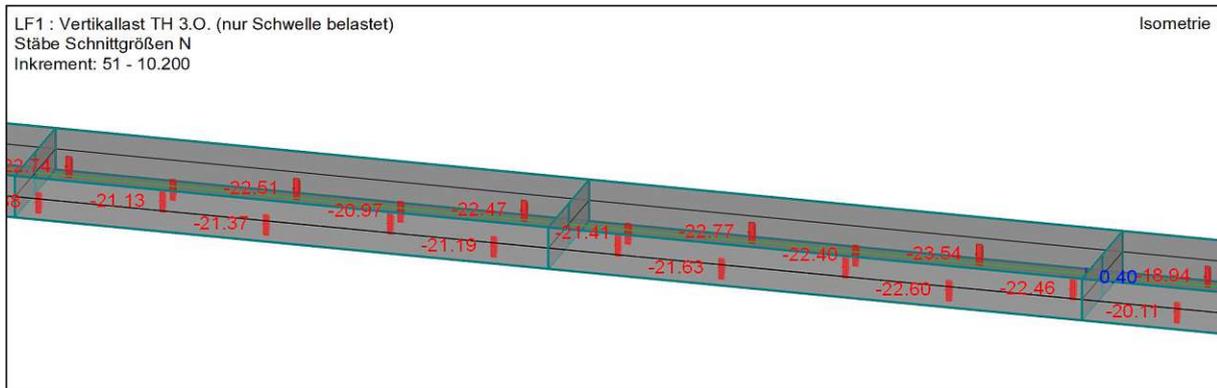


Abb. 3.48: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 10,2 mm

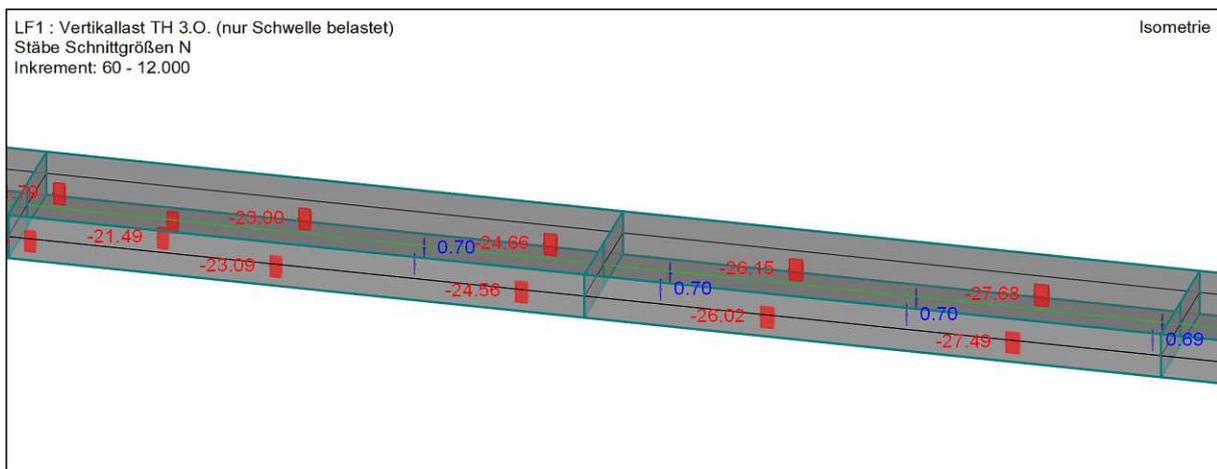


Abb. 3.49: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 12,0 mm

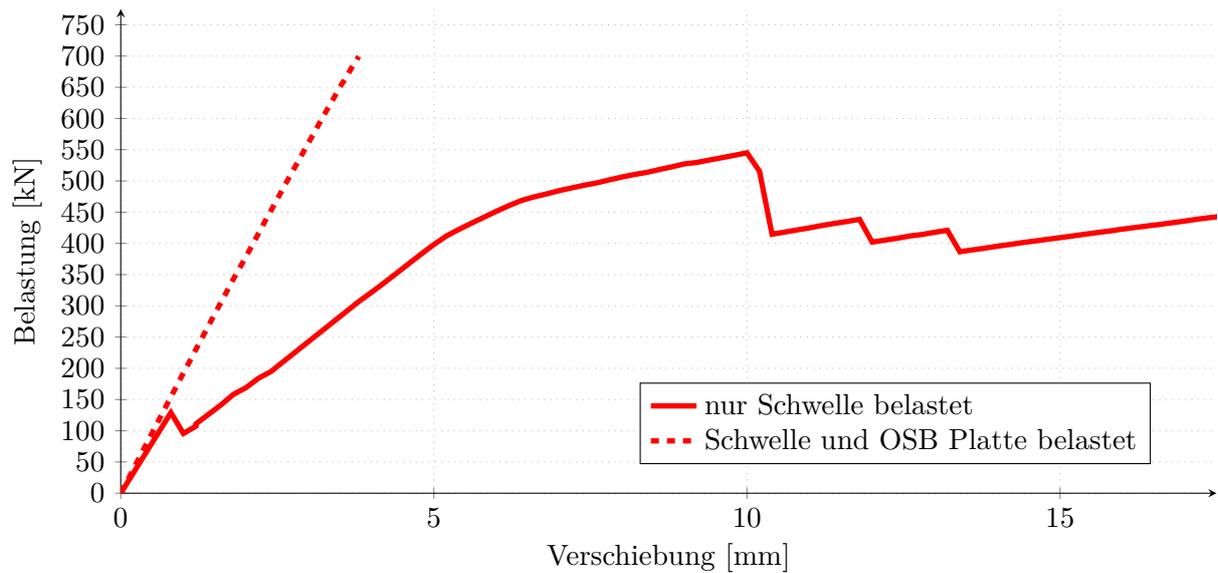


Abb. 3.51: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms des *Rechenmodells mit reiner Schwellenbelastung* und des *Rechenmodells mit Mitbelastung der OSB Beplankung* der Systemwand

In Abb. 3.51 ist zu erkennen, dass die Versagenszenarien der Verklebung zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung (Punkt A gemäß Kap. 3.2), die Einpressung der Lamellen in die Schwellen im Lasteinleitungsbereich (Punkt B gemäß Kap. 3.2) sowie das Knicken der Innenlamellen (Punkt C gemäß Kap. 3.2) nicht auftreten. Das Lastverformungsverhalten der Systemwand bei Mitbelastung der OSB Beplankung ist nahezu ideal linear elastisch. Die Traglast kann durch das geänderte Belastungsszenario auf in etwa 700 kN angehoben werden. Die Limitierung der Traglast kann auf einen globalen Stabilitätsverlust (Erreichen der Verzweigungslast) der gesamten Systemwand zurückgeführt werden. Ein Versagen von Klebefugen kann nicht beobachtet werden.

3.3 Variantenstudien weiterer Konstruktionsvarianten

Aus der eingehenden Analyse der Systemwand wurden etwaige Schwachpunkte der Konstruktion erkannt. Aus diesen wurden einige Varianten entwickelt, welche diesen Schwachpunkten entgegen wirken sollen. Diese Varianten werden im Folgenden vorgestellt und analysiert.

Weiters wird ein Vergleichsmodell in Form des in der Praxis gängigen Konstruktionsprinzip des Holzrahmenbaus erstellt, um einen Vergleich zu möglichen Konkurrenzprodukten in der praktischen Anwendung der Systemwand generieren zu können. Das in der Praxis gängige Verbindungsmittel in Form einer Klammerung wird zur besseren Vergleichbarkeit mit den verschiedenen Varianten der Systemwand durch eine Verklebung ersetzt.

Allgemein ist zu erwähnen, dass sämtliche Modellierungsansätze sowie Lastansätze, welche in Kap. 3.1 eingehend beschrieben wurden, auch für die im Anschluss folgenden Variantenmodelle gelten. Betrachtet wird hier die vertikale Belastungssituation gemäß Kap. 3.1.11 bzw. der Versuchskonfiguration V 1.1 gemäß Kap. 1.6.3. Sämtliche mögliche Abweichungen zu diesen Modellierungsparametern oder Belastungsszenarien werden für die einzelnen Varianten gesondert angeführt.

3.3.1 Variante mit doppelter Strebendicke

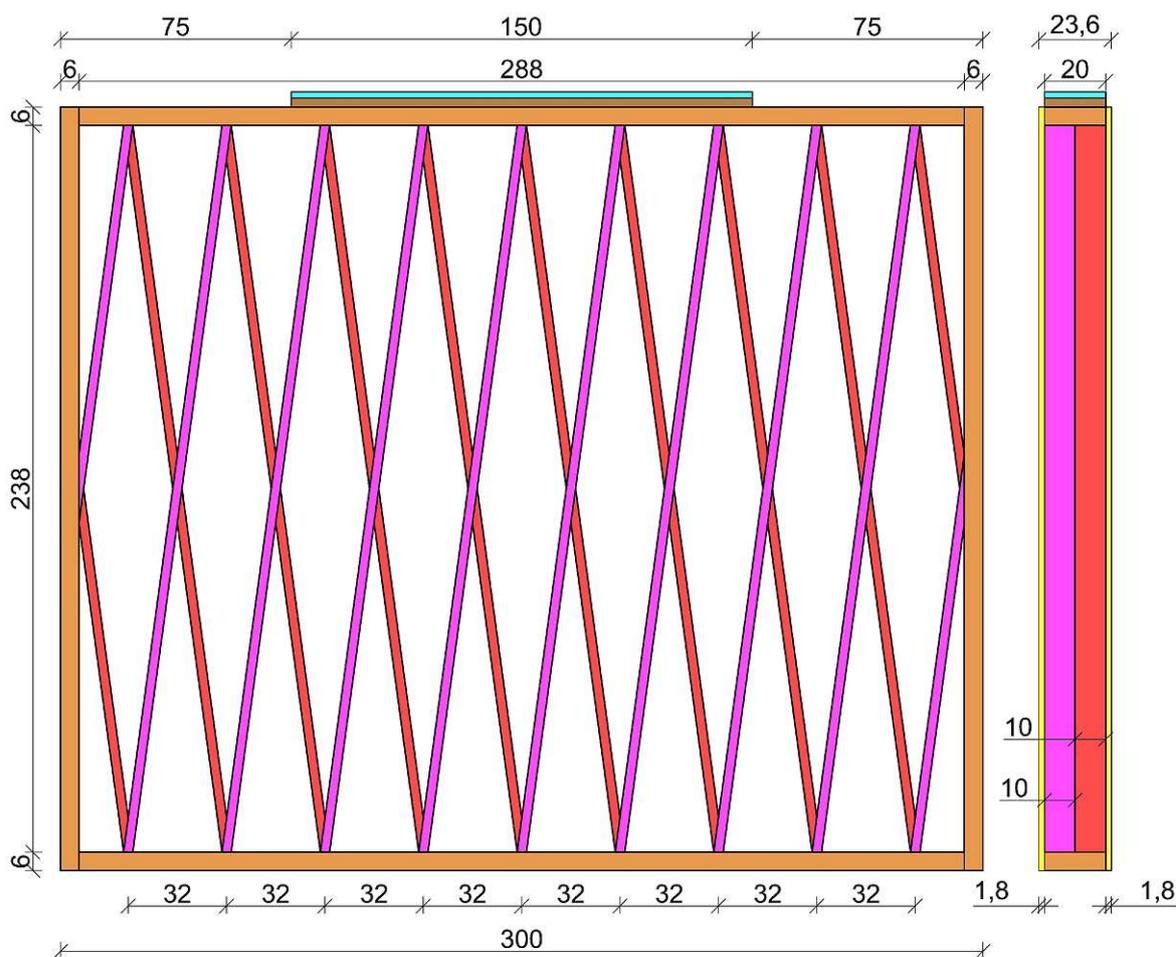


Abb. 3.52: Geometrie Variante der Systemwand mit doppelter Strebendicke [cm]

Die Limitierung der Traglast der originalen Systemwand ist gekoppelt mit dem Ausknicken der Innenlamellen. Wie in Kap. 3.2 beschrieben, ist beim Erreichen der kritischen Knicklast der Innenlamellen auch die Traglast der Gesamtstruktur erreicht. Um dieses Versagen verhindern zu können, müssten die Innenlamellen gegen Knicken gesichert werden. Diese Variante löst dieses Problem durch das Weglassen der Innenlamellen und verdoppelt ersatzweise die Dicke der äußeren Lamellen. Dies hat zur Folge, dass alle Lamellen durch die Verklebung mit der äußeren OSB Beplankung gegen Knicken gesichert werden können. Ein weiterer positiver Effekt ist die geometrische Vereinfachung der Struktur. Damit geht eine Vereinfachung und somit eine Optimierung des Herstellungsprozesses einher. Der homogenisierende Effekt durch die Feingliedrigkeit der Konstruktion nimmt jedoch ab. Die Geometrie dieser Variante kann der Abb. 3.52 entnommen werden. Eine Darstellung des Rechenmodells findet sich in Abb. 3.53.

Die Modellierung der Einpressung der Lamellen in die Schwelle wird aus vereinfachenden Gründen immer noch mittels vier Starrstäben modelliert. Aufgrund der doppelten Strebendicke werden in dieser Variante jeweils zwei Starrstäbe pro Lamelle modelliert.

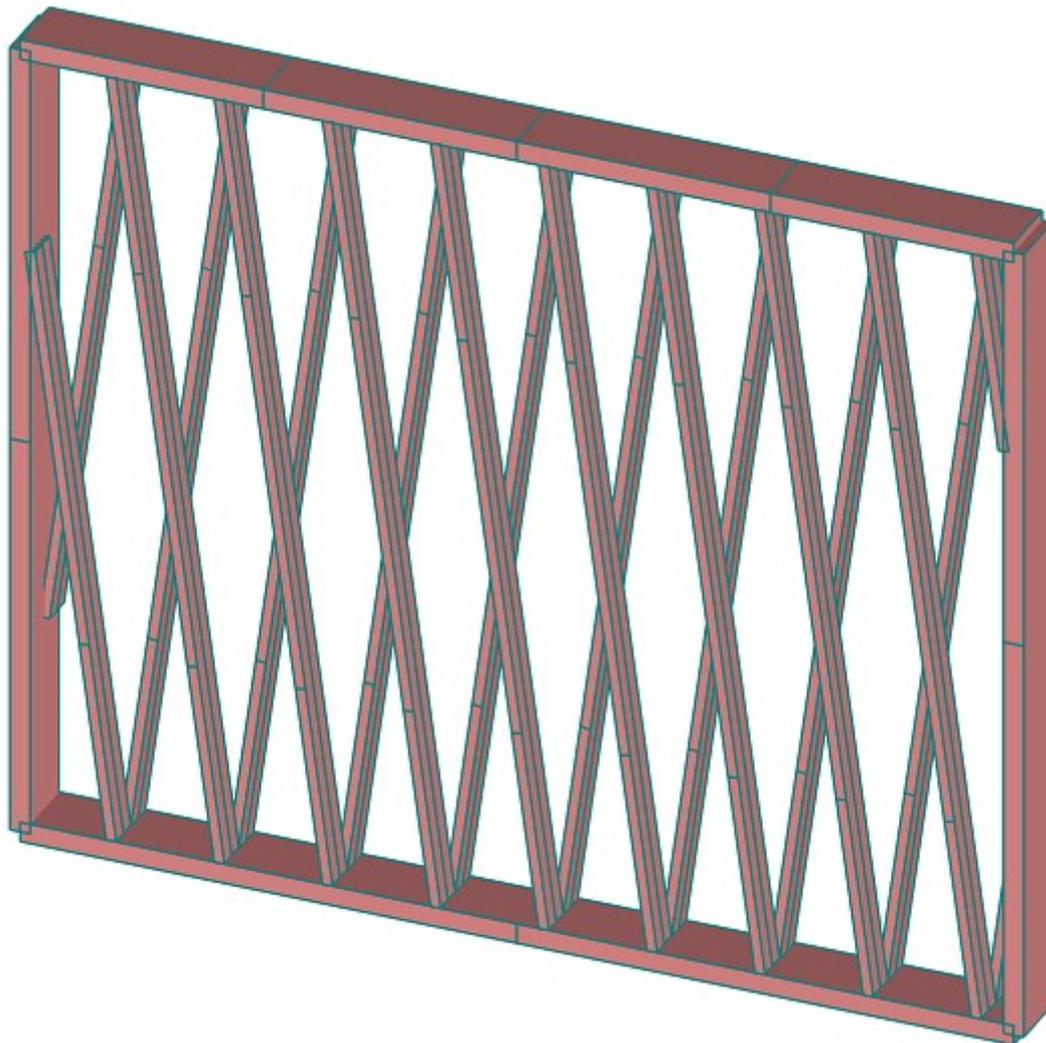


Abb. 3.53: Darstellung des Rechenmodells der Variante der Systemwand mit doppelter Strebendicke

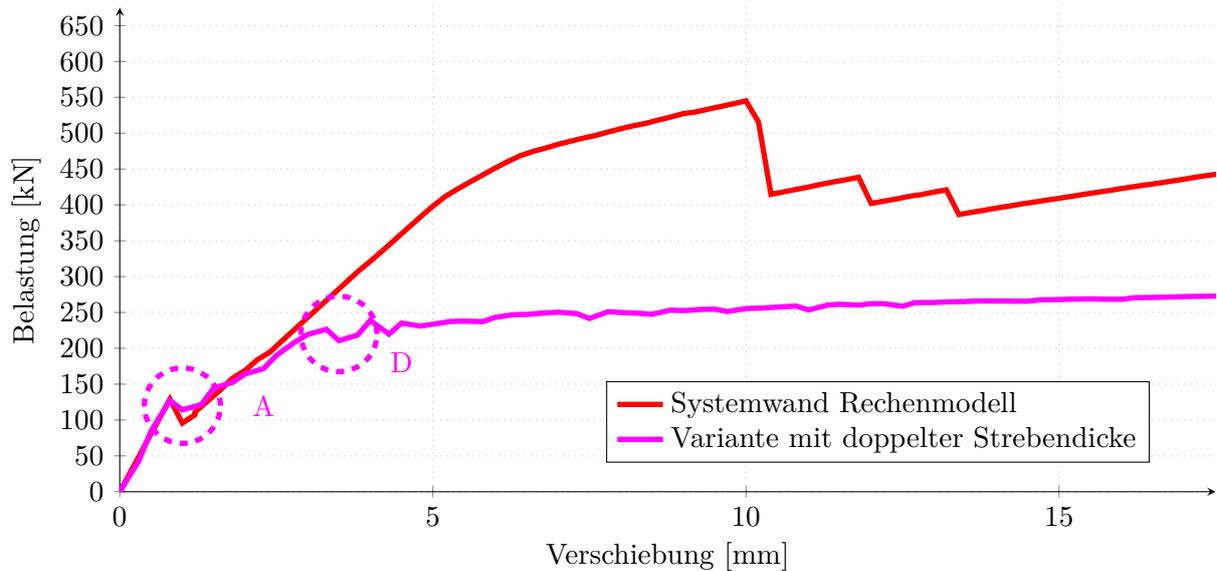


Abb. 3.54: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms der *Systemwand* und der *Variante mit doppelter Strebendicke*

Die Lastverformungskurve der Variante mit doppelter Strebendicke gemäß Abb. 3.54 zeigt im Bereich A ein ähnliches Verhalten wie die Grundvariante der Systemwand. In diesem Bereich findet ein vertikales Versagen der Klebefuge zwischen der oberen Schwelle und der OSB Beplankung statt (dargestellt an der übertragenen Kraft in der Klebefuge in den Abb. 3.55 bzw. 3.56).

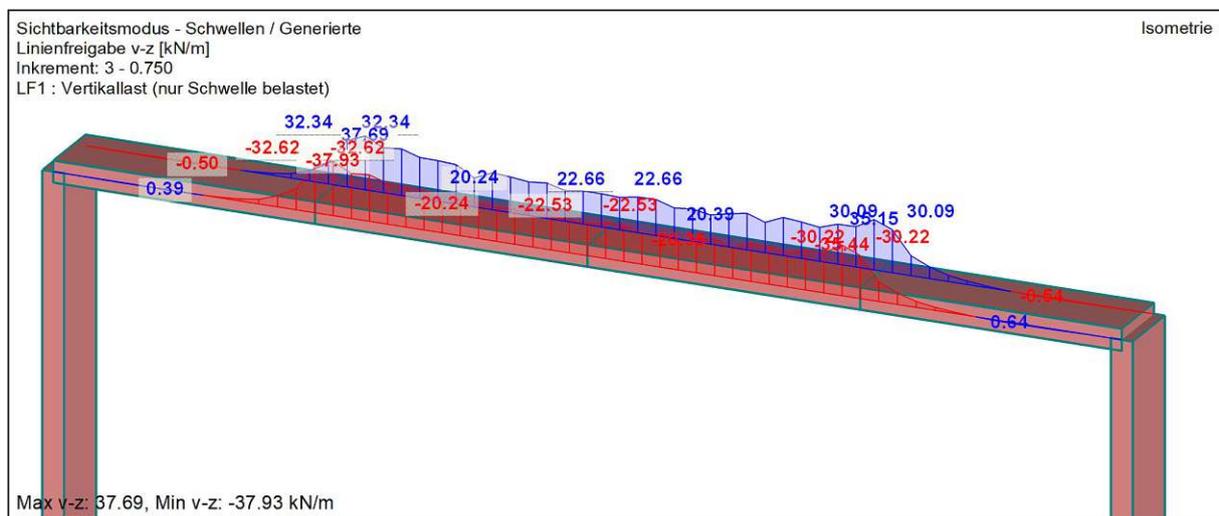


Abb. 3.55: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingegrägte Verformung von 0,75 mm

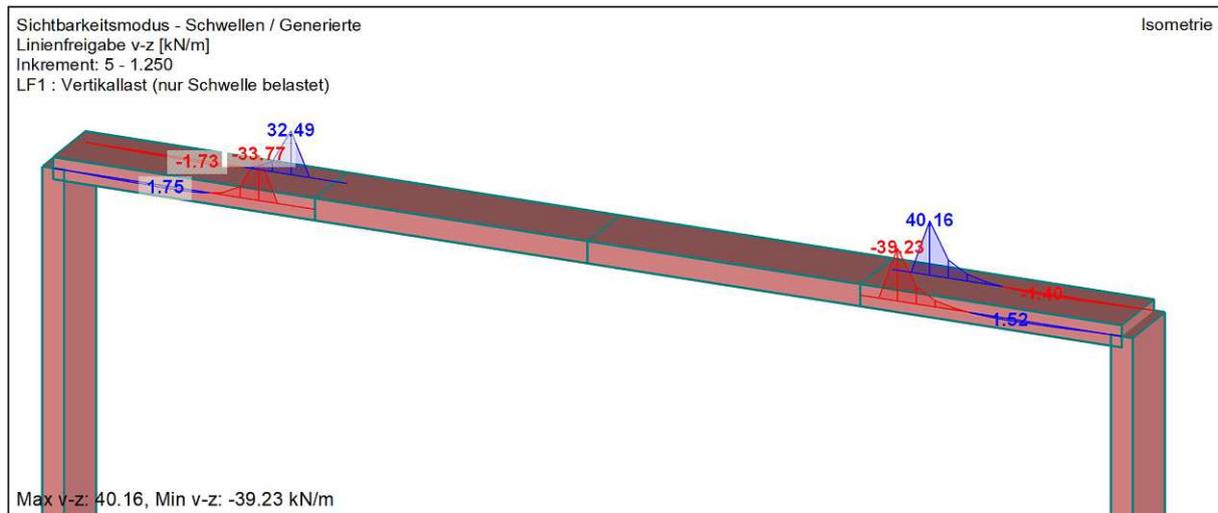


Abb. 3.56: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 1,25 mm

Anders jedoch als bei der Grundvariante der Systemwand, wird die aufnehmbare Traglast bei der Variante mit doppelter Strebendicke durch das Versagen der Klebefuge zwischen den äußeren Lamellen und der OSB Beplankung begrenzt (Bereich D). Durch ein kontinuierliches Versagen dieser Klebefuge (dargestellt in den Abb. 3.57, 3.58, 3.59 und 3.60 anhand der übertragenen Kraft bzw. der Relativverformung innerhalb dieser Klebefuge) kann keine weitere Lasteinleitung in die OSB Beplankung und somit keine weitere Steigerung der Traglast erzielt werden.

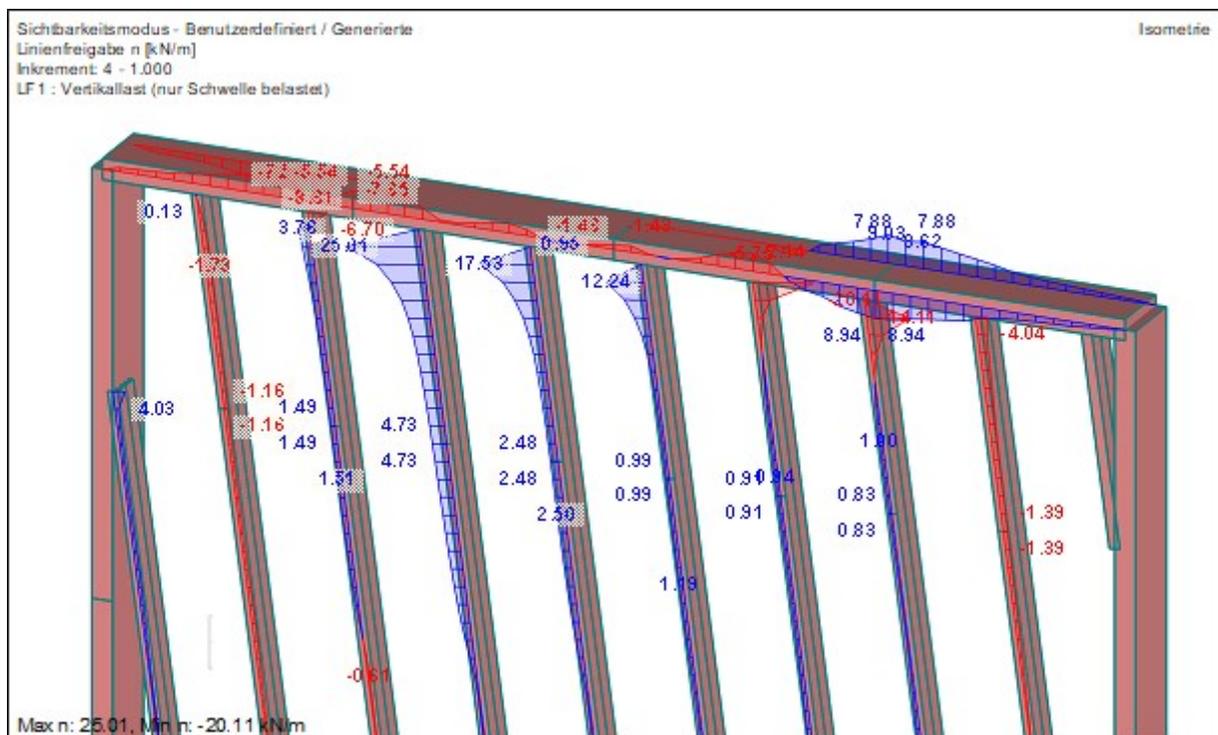


Abb. 3.57: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 1,0 mm

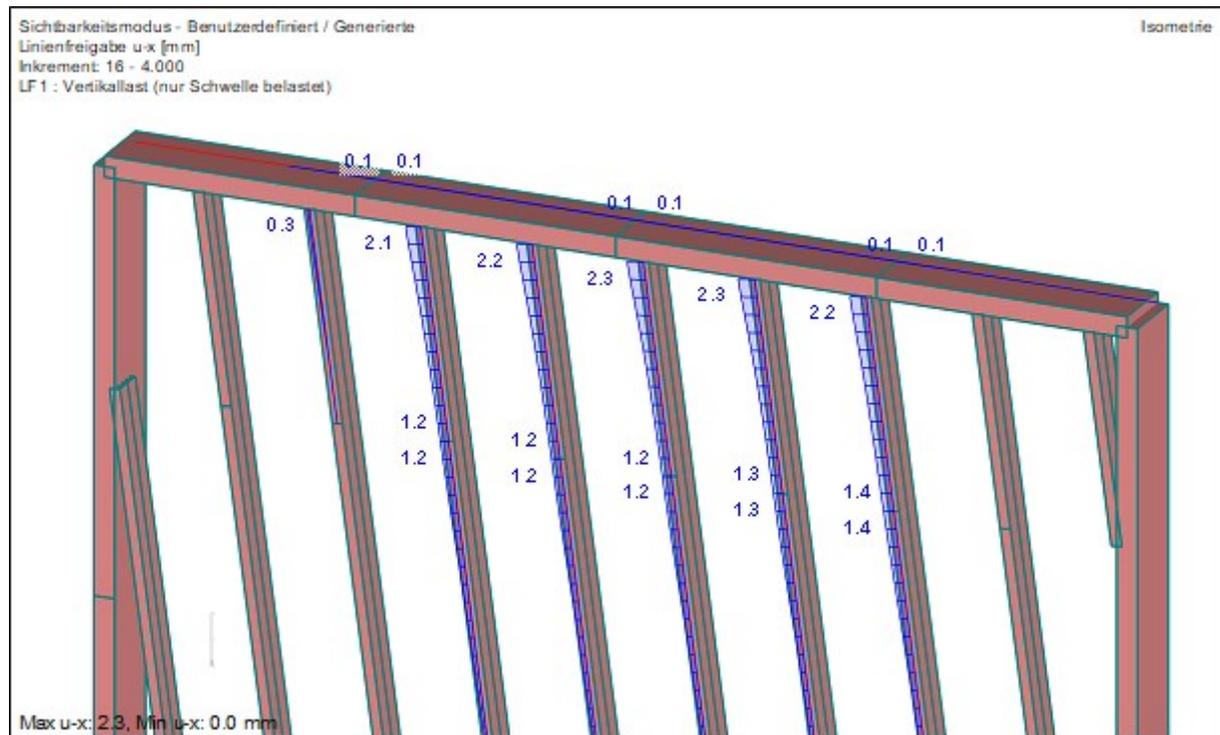


Abb. 3.60: Vertikal Relativverformung in der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 4,0 mm

Da die maximal aufnehmbare Kraft innerhalb der Klebefuge nur eine Abschätzung darstellt (siehe Kap. 3.1.7) wird im weiteren in Kap. 3.3.1.1 eine alternative Modellierungsstrategie und dessen Auswirkungen auf das Lastverformungsverhalten der Variante mit doppelter Strebendicke diskutiert.

3.3.1.1 Alternative Modellierung der Klebefugen

Da gemäß Kap. 3.3.1 die Limitierung der Traglast der Variante mit doppelter Strebendicke durch das Versagen der Klebefuge zwischen Lamelle und OSB Beplankung passiert, wird in diesem Kapitel eine alternative Modellierungsstrategie eben dieser Klebefuge diskutiert. Die Versagenslast der Klebefuge wird nicht wie bisher mit der Rollschubfestigkeit der OSB Beplankung ($f_{R,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2$) sondern mit der Schubfestigkeit längs zur Faser der Lamelle ($f_{v,k} = 3,6 \text{ N/mm}^2$) abgeschätzt. Dadurch ergibt sich für die modellierte Linienfreigabe gemäß Kap. 3.1.9 folgende adaptierte maximal aufnehmbare Last in Längsrichtung der Lamellen:

$$X - \text{Richtung}(+/-) : f_{v,k} = 3,6 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_X = 3,6 * 10^{-1} * 3 * 100 = 108 \text{ kN/m} \quad (3.24)$$

Die adaptierte Grenzlast der Klebefuge in X-Richtung wird gemäß Abb. 3.61 für weitere Berechnungen in das Rechenmodell aufgenommen.

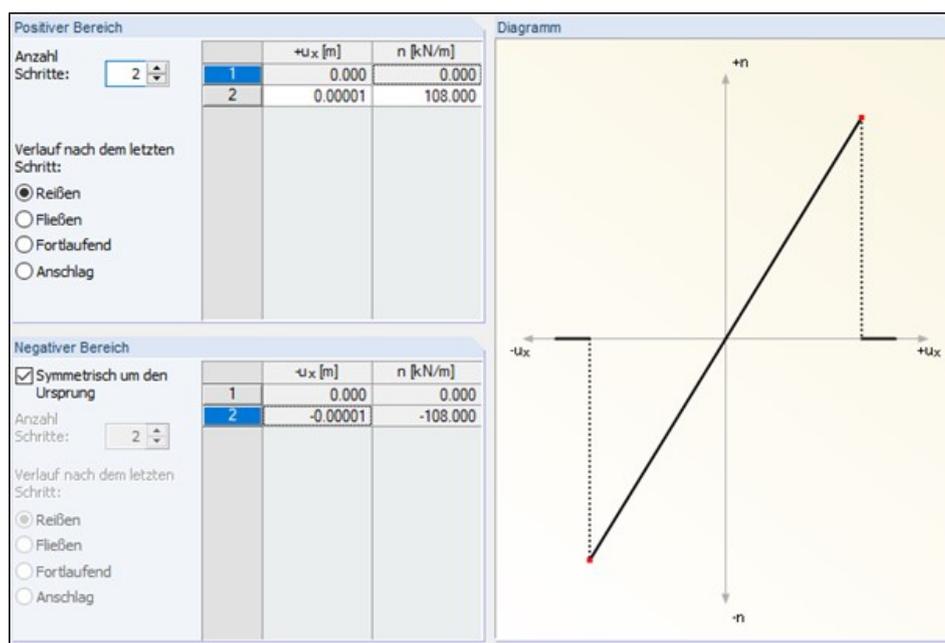


Abb. 3.61: Lastverformungskurve des Linienfreigabetyps zwischen den äußeren Lamellen und der OSB Beplankung in X-Richtung mit alternativer Modellierungsstrategie (Abscheren längs zur Lamelle)

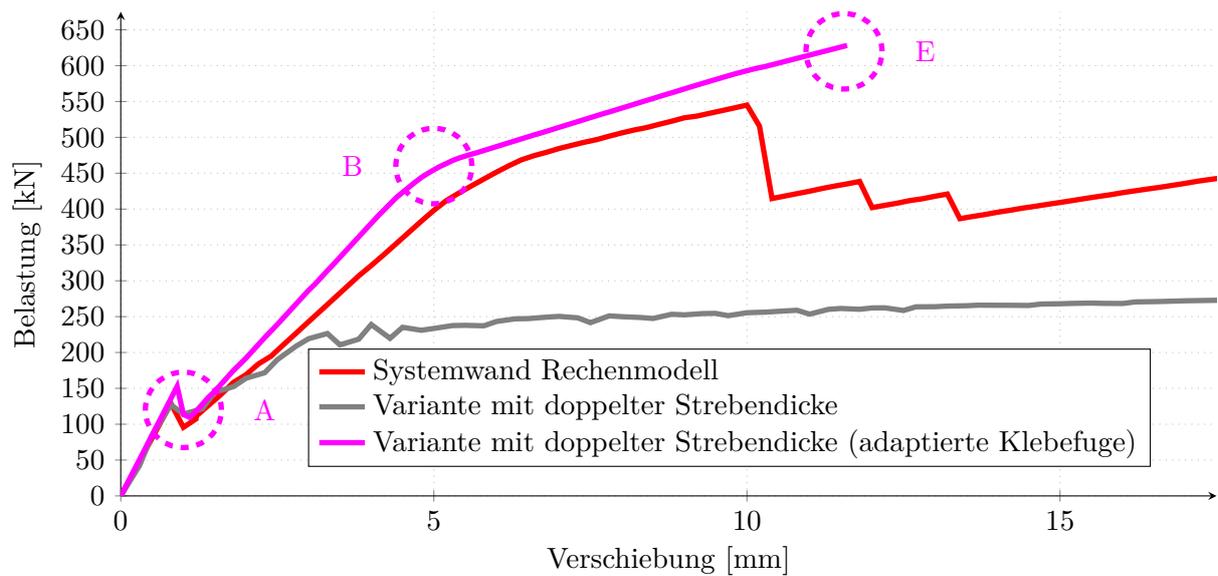


Abb. 3.62: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms der *Systemwand* und der *Variante mit doppelter Strebendicke*

Abb. 3.54 zeigt die Lastverformungskurven der Variante mit doppelter Strebendicke mit und ohne Adaptierung der Modellbildung der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung im Vergleich zur Lastverformungskurve der Grundvariante der Systemwand. Vergleicht man die beiden Kurven der Grundvariante der Systemwand und der Variante mit doppelter Strebendicke mit adaptierter Klebefuge wird ersichtlich, dass bis zum Ausknicken der Innenlamellen bei der Grundvariante der Systemwand (beschrieben durch den Punkt C in Abb. 3.40) sich keine großen Unterschiede im Last-Verformungsverhalten erkennen lassen. Ebenso wie die Grundvariante der Systemwand, versagt die Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung bei einem Belastungsniveau von in etwa 150 kN (siehe Abb. 3.63, 3.64, 3.65, 3.66, 3.67 sowie 3.68). Wiederum ähnlich zur Grundvariante verhält sich der Bereich B betreffend der Einpressungen der Lamellen in die Schwellen. Der Knick im Bereich B der Lastverformungskurve ist wiederum auf den Ansatz des bilinearen Einpressverhaltens zurückzuführen (simultan zu Kap. 3.2.2). Die Einpresskräfte für den Bereich B können den Abb. 3.69, 3.70 sowie 3.71 entnommen werden.

Die asymmetrischen Ergebnisse in den Abb. 3.63, 3.64, 3.65, 3.66, 3.67 sowie 3.68 werden darauf zurückgeführt, dass im Grenzbereich der Öffnung der Klebefuge die maximalen Iterationen der Berechnung erreicht wurden und somit kein eindeutiges Ergebnis für diese Laststufen vorliegt. Die grundlegende Erkenntnis, wann die Klebefuge versagt, kann jedoch dennoch gewonnen werden. Der Bereich E in Abb. 3.62 beschreibt den Versagenszustand der Variante mit doppelter Strebendicke. Dabei ist zu erwähnen, dass dieses Versagen nicht wie zum Beispiel bei der Grundvariante auf das Ausknicken der inneren Lamellen zurück zu führen ist. Da in der Lastverformungskurve kein Lastabfall erkennbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass ein Stabilitätsverlust der Gesamtkonstruktion zum Versagen der Wand führt und somit im Rechenmodell keine stabile Konfiguration bei weiterer Laststeigerung gefunden werden kann.

Durch die alternative Modellierung der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung könnte eine wesentliche höhere Traglast der Gesamtstruktur der Variante mit doppelter Strebendicke erzielt werden. Dieser Ansatz einer höheren Traglast der Klebefuge ist jedoch gemäß EC 5 nicht zulässig. Um dieses Potential ausschöpfen zu können sind weitere Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Klebefuge notwendig.

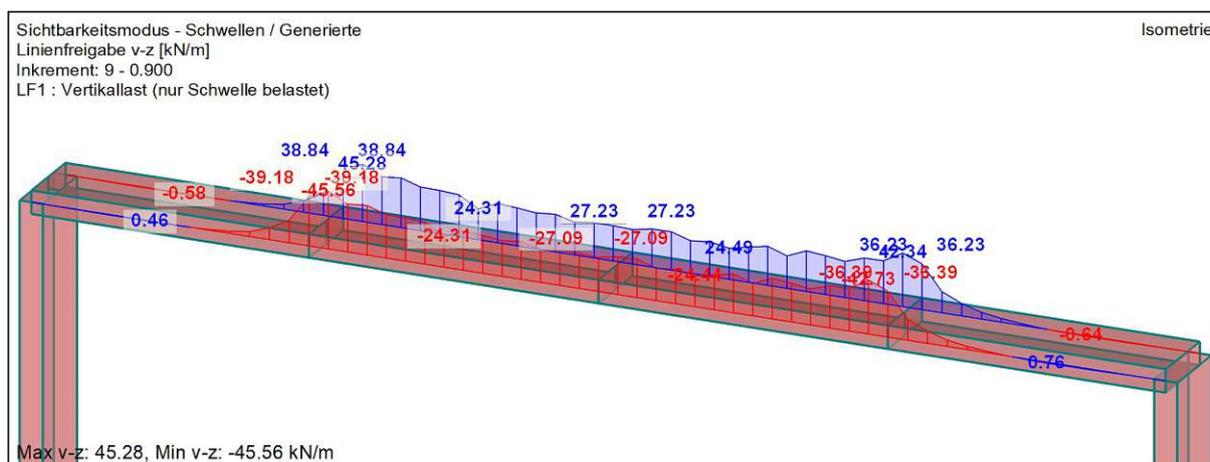


Abb. 3.63: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 0,9 mm

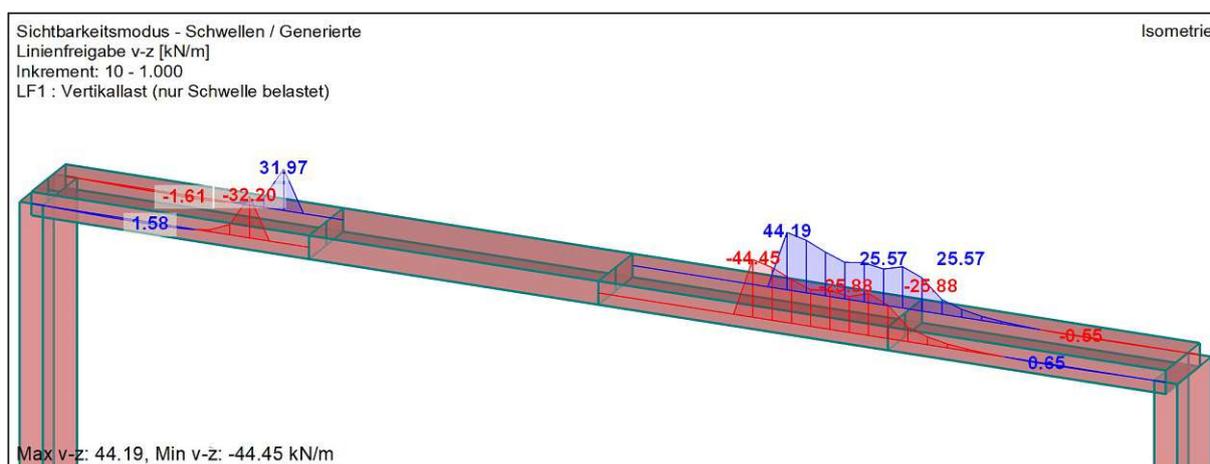


Abb. 3.64: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 1,0 mm

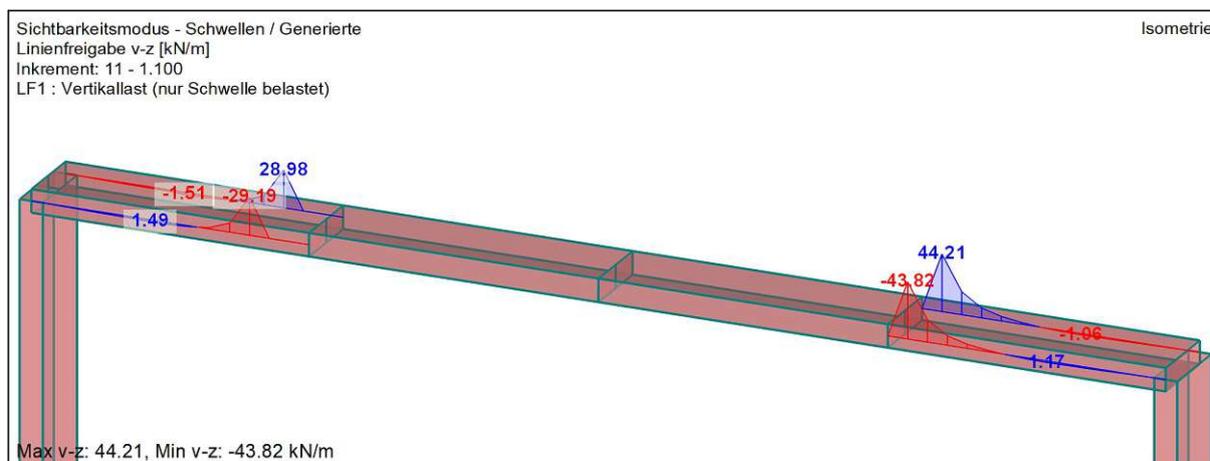


Abb. 3.65: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 1,1 mm

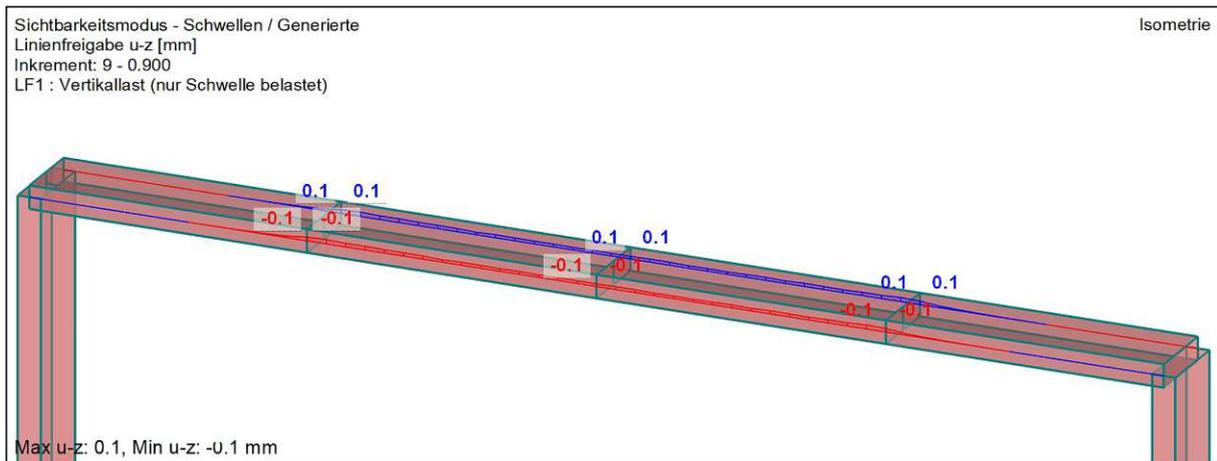


Abb. 3.66: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformungen von 0,9 mm

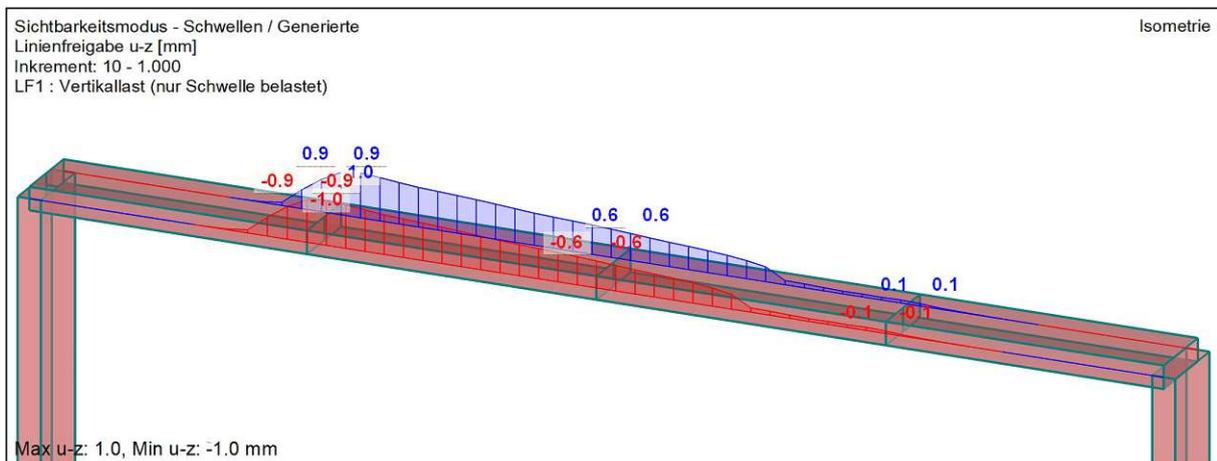


Abb. 3.67: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformungen von 1,0 mm

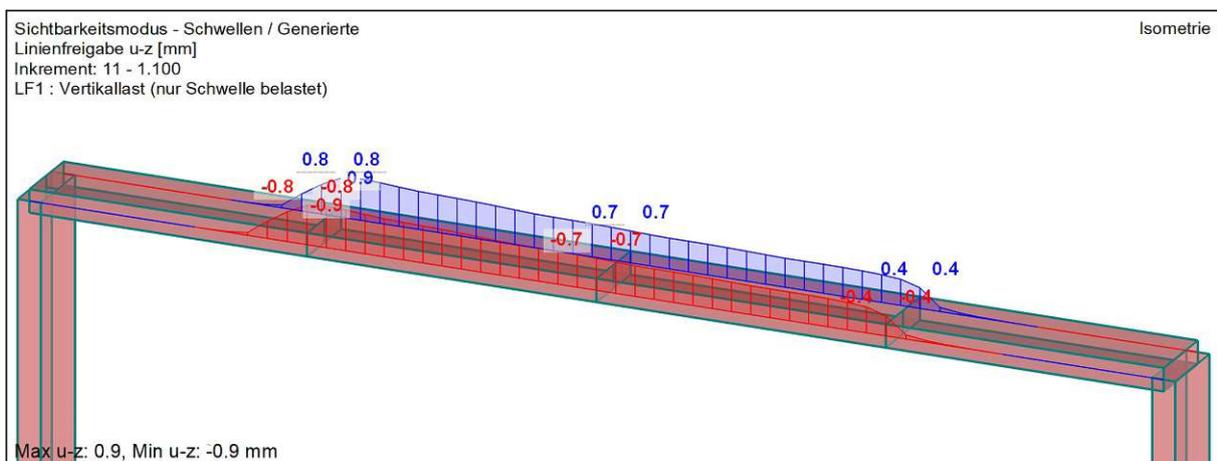


Abb. 3.68: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für die eingeprägte Verformungen von 1,1 mm

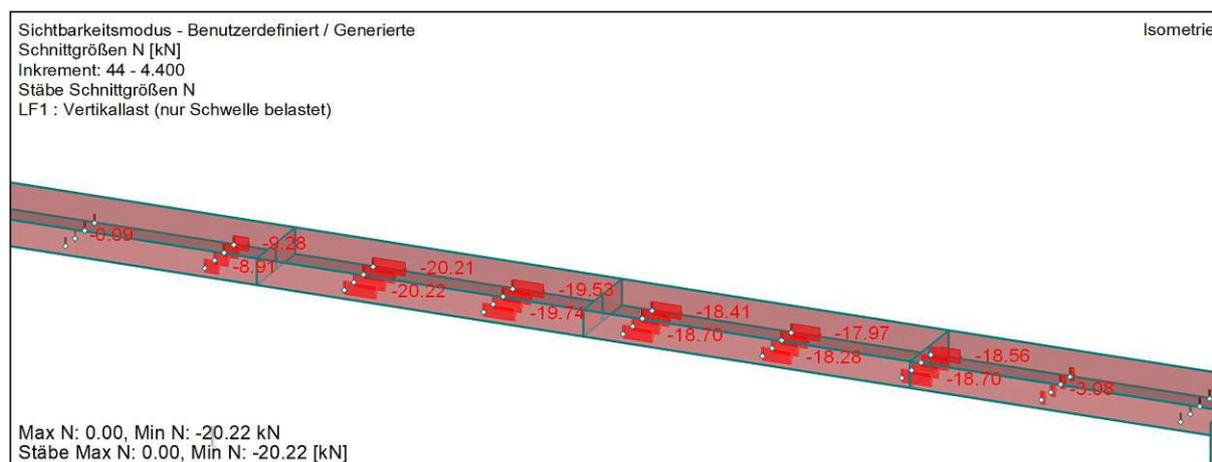


Abb. 3.69: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 4,4 mm

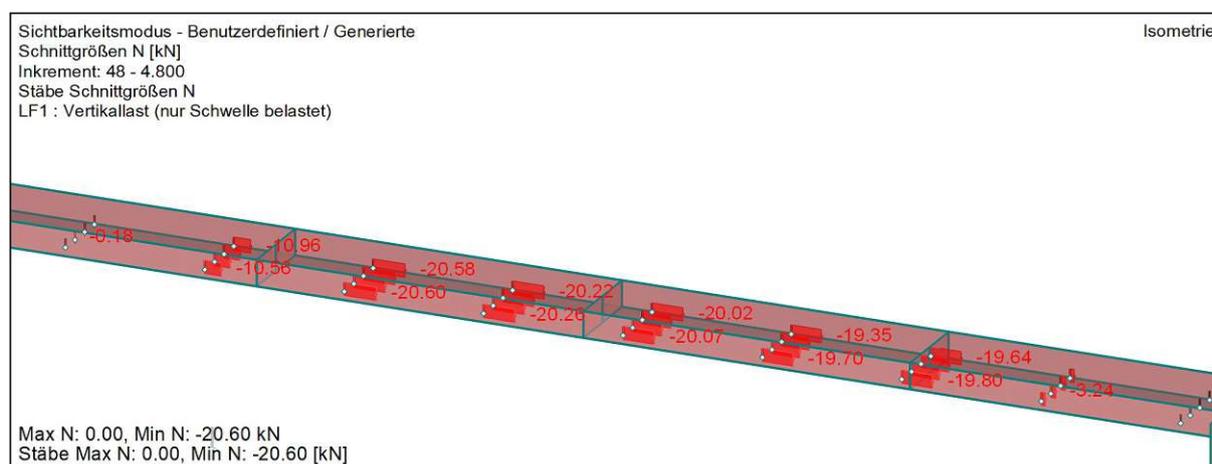


Abb. 3.70: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 4,8

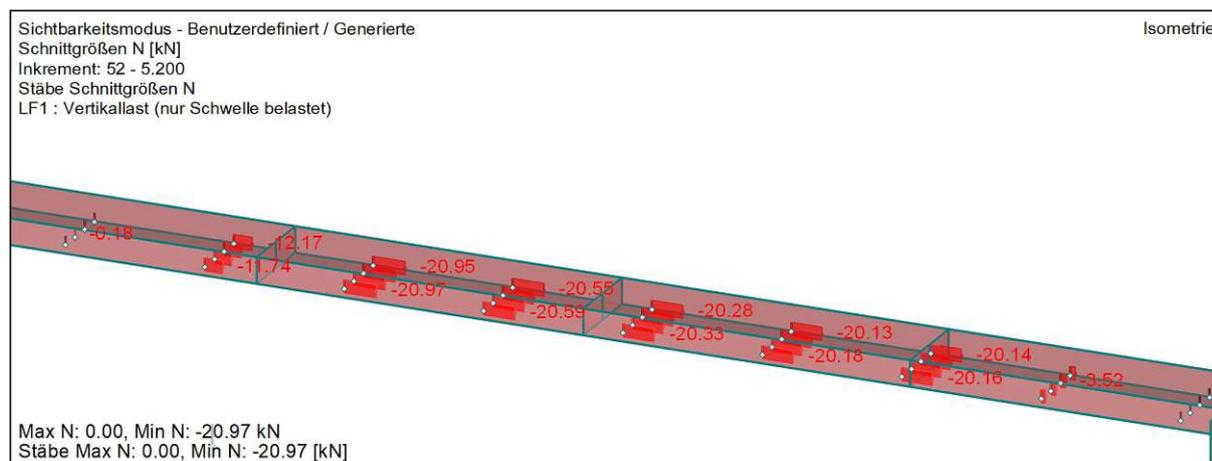


Abb. 3.71: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für eine eingeprägte vertikale Verschiebung von 5,2 mm

3.3.1.2 Vollflächiges Belastungsszenario der Variante mit doppelter Strebendicke

Ähnlich wie bei der Grundvariante der Systemwand wird auch für die Variante mit doppelter Strebendicke ein alternatives, vollflächiges vertikales Belastungsszenario betrachtet. Hierzu wird die eingeprägte Vertikalverformung zusätzlich zur Schwelle auch auf die OSB Beplankung aufgebracht. Diese Belastung ist in Abb. 3.72 dargestellt.

Sichtbarkeitsmodus - Benutzerdefiniert / Generierte
Belastung [mm]
LF2 : Vertikallast (Schwelle + OSB belastet)

Isometrie

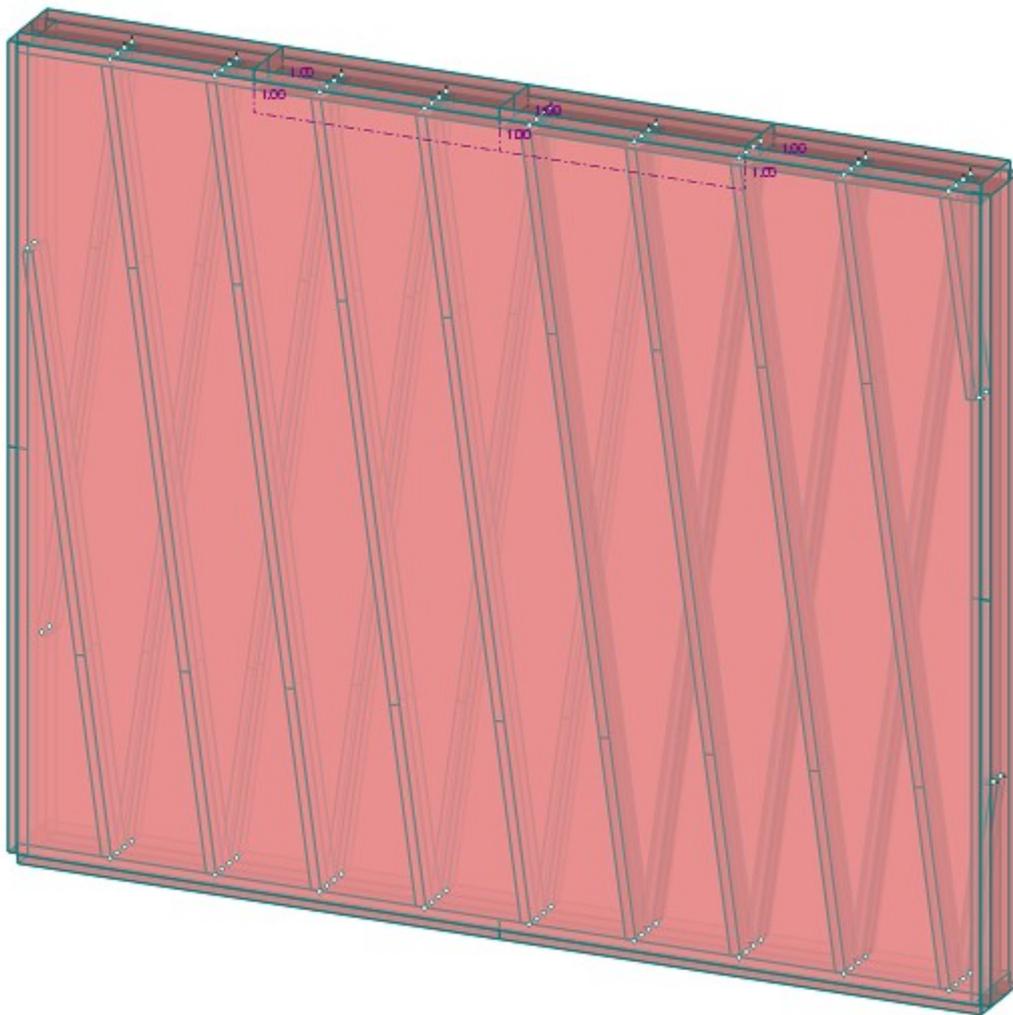


Abb. 3.72: Darstellung der Mitbelastung der OSB Beplankung der Variante mit doppelter Strebendicke

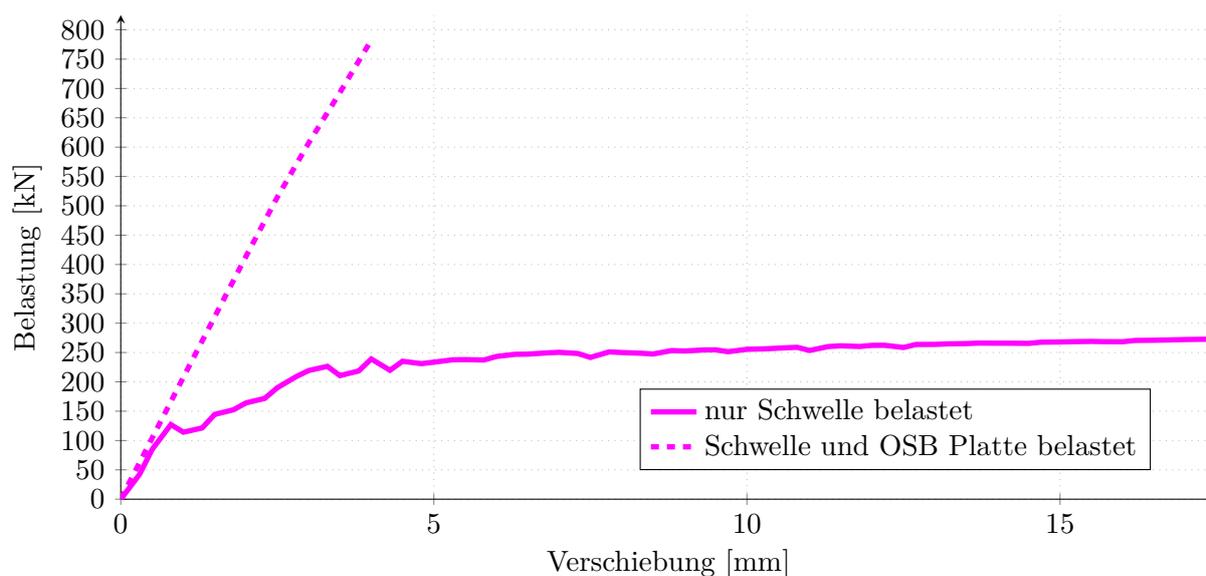


Abb. 3.73: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms der Variante mit doppelter Strebendicke mit reiner Schwellenbelastung und der Variante mit doppelter Strebendicke mit Mitbelastung der OSB Beplankung

Betrachtet man die Lastverformungskurve der Variante mit doppelter Strebendicke für das Belastungsszenario, welches ein Mitbelasten der OSB Beplankung vorsieht (Abb. 3.73), erkennt man, dass ein nahezu linear elastisches Systemverhalten vorliegt. Ähnlich zur Grundvariante der Systemwand können durch das Mitbelasten der OSB Beplankung die Phänomene des Versagens der Klebefuge zwischen der oberen Schwelle und der OSB Beplankung sowie der Einpressung der Lamellen in die Schwellen nicht beobachtet werden. Das Versagen der Wand unter Mitbelastung der OSB Beplankung kann durch ein allgemeines Stabilitätsversagen (Erreichen der Verzweigungslast) der Wand begründet werden. Die Traglast der Variante mit doppelter Strebendicke kann durch das adaptierte Belastungsszenario auf über 770 kN gesteigert werden. Das Versagen tritt, ähnlich wie bei der Grundvariante der Systemwand, zufolge eines globalen Stabilitätsverlustes (Erreichen der Verzweigungslast) der gesamten Konstruktion ein.

3.3.2 Variante mit OSB Platte in Mittelebene

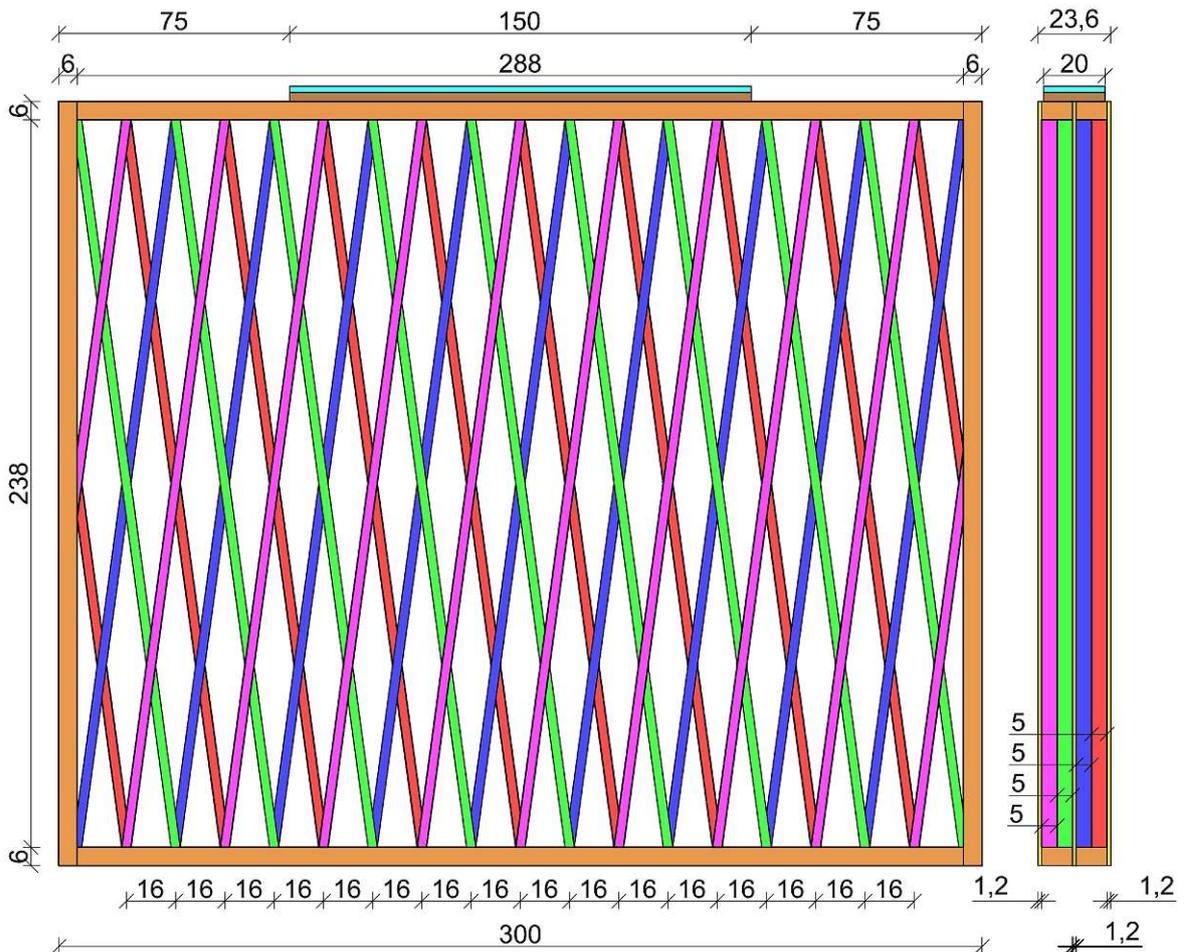


Abb. 3.74: Geometrie Variante der Systemwand mit Mittelebene [cm]

Eine alternative Variante zur Verhinderung des Ausknickens der Innenlamellen und somit einer potentiellen Erhöhung der Traglast der Systemwand wird in diesem Kapitel beschrieben. Hierbei wird in der Mitte der Systemwand eine OSB Platte vorgesehen. Diese wird simultan zu der äußeren OSB Beplankung mit den inneren Lamellen verklebt. Das hat zur Folge, dass nun alle Lamellen (innen und außen) mit einer OSB Platte verklebt werden können und somit gegen Ausknicken gesichert sind. Um die gesamte Wandstärke von 23,6 cm beibehalten zu können, werden die vormals zwei äußeren OSB Platten mit einer jeweiligen Stärke von 18 mm durch drei OSB Platten (zwei außen, eine innen) mit einer jeweiligen Stärke von 12 mm ersetzt. Sämtliche anderen Bauteile werden simultan zur Grundvariante der Systemwand modelliert. Eine geometrische Darstellung dieser Variante findet sich in Abb. 3.74.

Durch die geänderte Geometrie ergibt sich ein allgemein anderer innerer Lastabtrag der Konstruktion. Die ursprünglich rein auf die Schwelle aufgebrachte vertikale Zwangsverformung muss, rein schon aus geometrischen Gründen, auch direkt in die innere OSB Beplankung eingeleitet werden. Das bedeutet, dass zur Lasteinleitung in die mittlere OSB Platte keine Lastweiterleitung über eine Klebefuge notwendig ist. Die Belastung der äußeren OSB Beplankungen erfolgt weiterhin rein über die Verklebung dieser mit der oberen Schwelle bzw. über die Verklebung dieser mit den äußeren Lamellen.

In Abb. 3.75 werden die Lastverformungskurven der Grundvariante der Systemwand und der Variante mit Mittelebene gegenüber gestellt. Hierbei ist zu erkennen (Punkt A), dass das Versagen der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und äußerer OSB Beplankung (ähnlich wie bei der Grundvariante der Systemwand) bei einem Lastniveau von in etwa 150 kN auftritt (siehe Abb. 3.76, 3.77, 3.78 sowie 3.79). Weiters ist zu erkennen, dass ein Abflachen der Lastverformungskurve durch ein Einpressen der Lamellen in die Schwellen nicht auftritt. Dies hat den Grund, dass die Grenzlast des bilinearen Verhaltens der Einpressung (gemäß Kap. 3.1.8) von 20 kN zwar beim Traglastniveau der Gesamtkonstruktion erreicht wird (siehe Abb. 3.80), jedoch aufgrund eines anderen Versagens nicht überschritten wird.

Das globale Versagen der Variante der Systemwand mit Mittelebene (Bereich F gemäß Abb. 3.75) ist auf ein globales Beulen der Systemwand, getriggert durch die hochbelastete weil direkt belastete Mittelebene, gemäß Abb. 3.81 zurückzuführen. Dieses Systemverhalten wird durch zwei Umstände besonders begünstigt. Zum einen ist die Biegesteifigkeit der 12 mm dicken OSB Platte wesentlich geringer als jene der 18 mm dicken OSB Platte, da die Dicke der Platte kubisch in das Trägheitsmoment und dieses wiederum linear in die Biegesteifigkeit eingeht. Darüber hinaus wird aufgrund der Lasteinleitungssituation ein großer Teil der eingeleiteten Last direkt in die OSB Platte in der Mittelebene eingeleitet. Das alles führt dazu, dass ein Großteil der Last über die innere OSB Platte abgetragen wird und die inneren Lamellen nicht optimal in den Lastabtrag miteingebunden werden können. Diese Verteilung der abzutragenden Lasten ist auch in Abb. 3.80 erkennbar. Die eingeleiteten Lasten in die inneren Lamellen sind dabei wesentlich geringer als die eingeleiteten Lasten in die äußeren Lamellen.

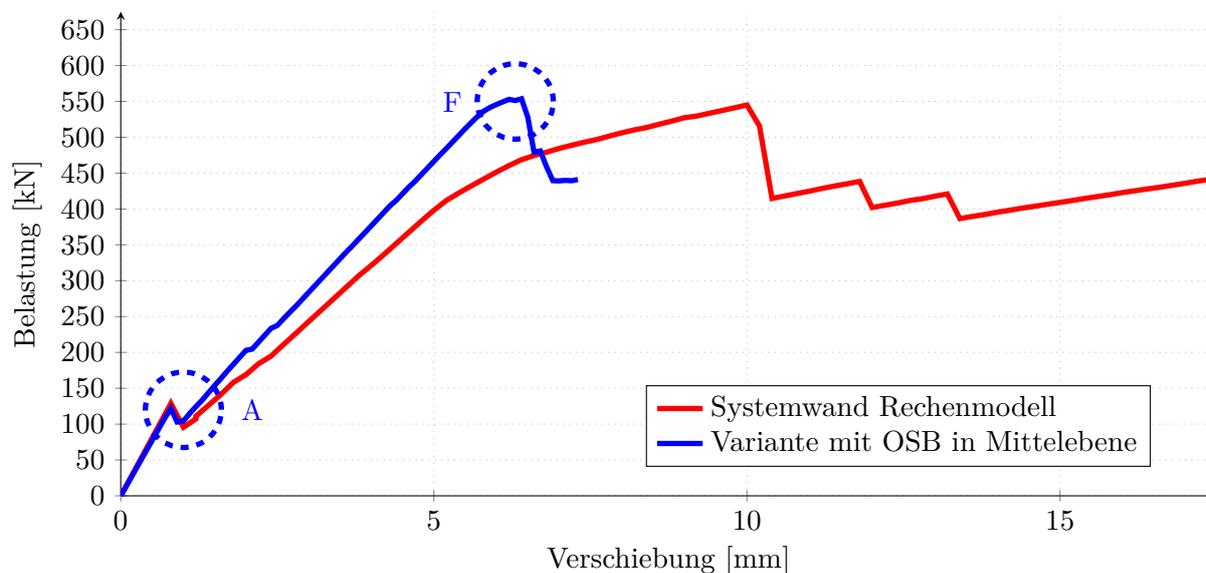


Abb. 3.75: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms der *Systemwand* und der *Variante mit OSB in Mittelebene*

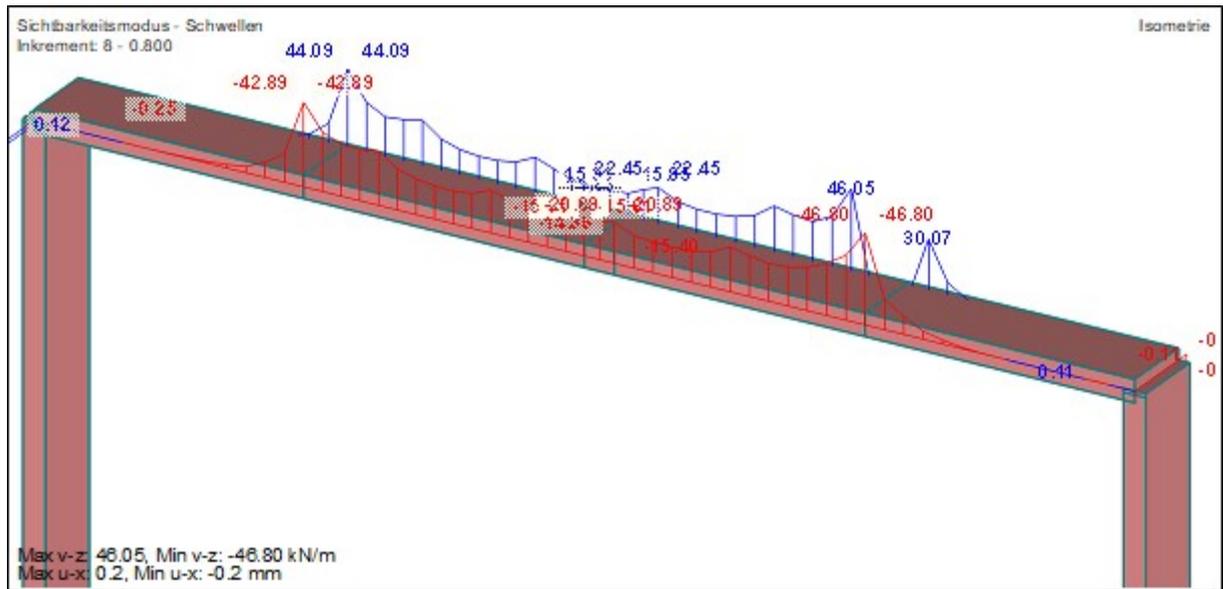


Abb. 3.76: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für eine eingeprägte Verformung von 0,8 mm

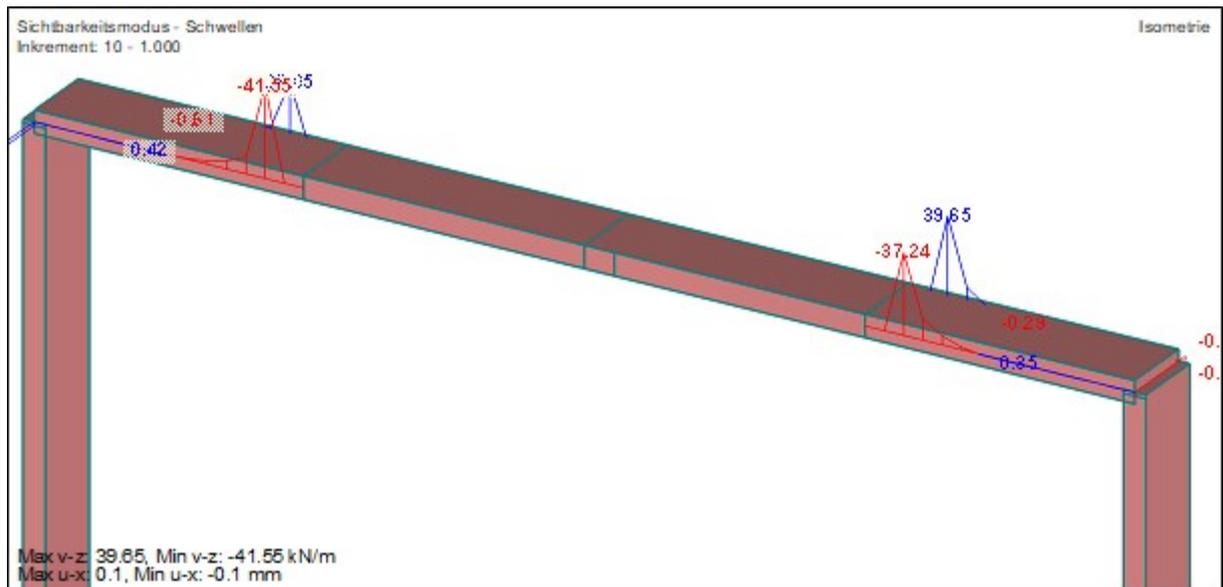


Abb. 3.77: Vertikal übertragene Kraft in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für eine eingeprägte Verformung von 1,0 mm

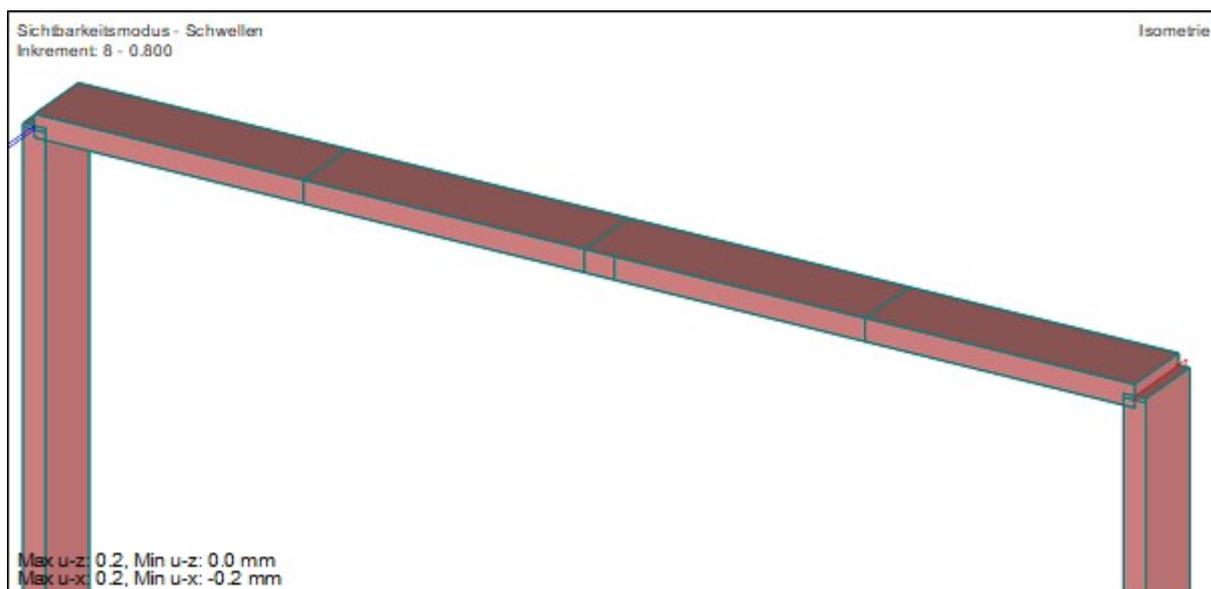


Abb. 3.78: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für eine eingeprägte Verformung von 0,8 mm

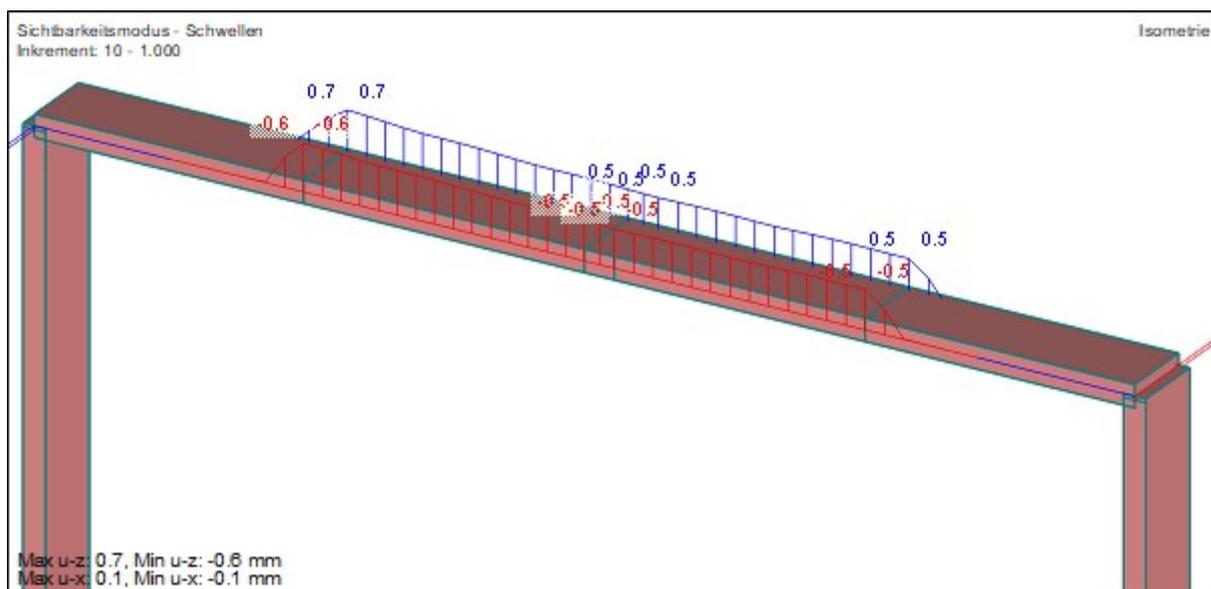


Abb. 3.79: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für eine eingeprägte Verformung von 1,0 mm

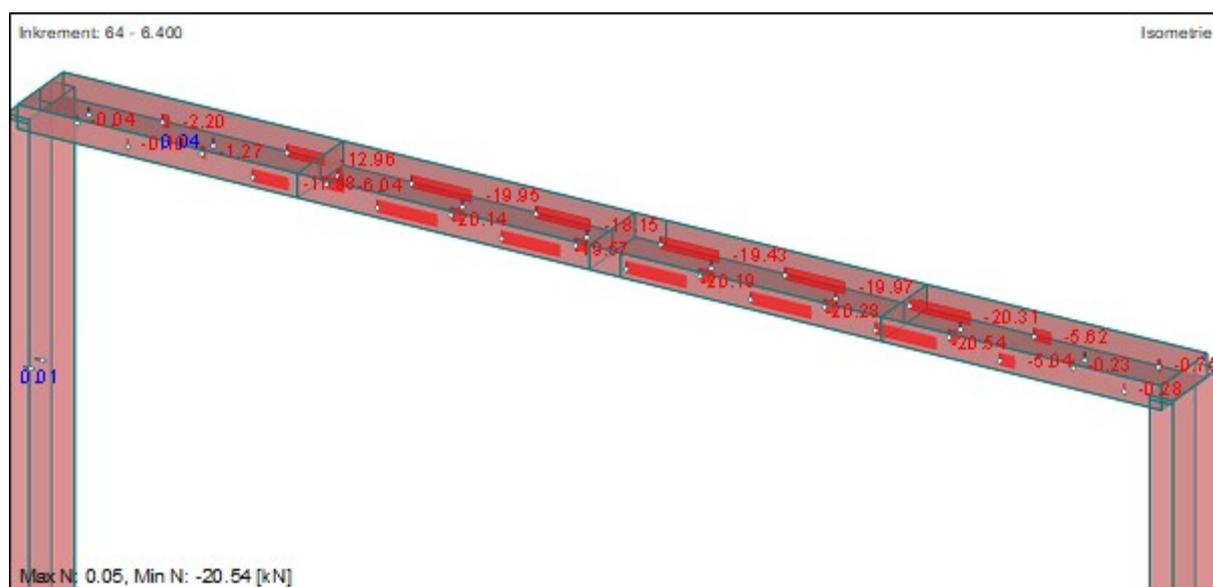


Abb. 3.80: Einpresskräfte der Lamellen in die obere Schwelle im Bereich der Lasteinleitung für das Traglastniveau der Konstruktion (entspricht einer eingprägten vertikalen Verformung von 6,4 mm)

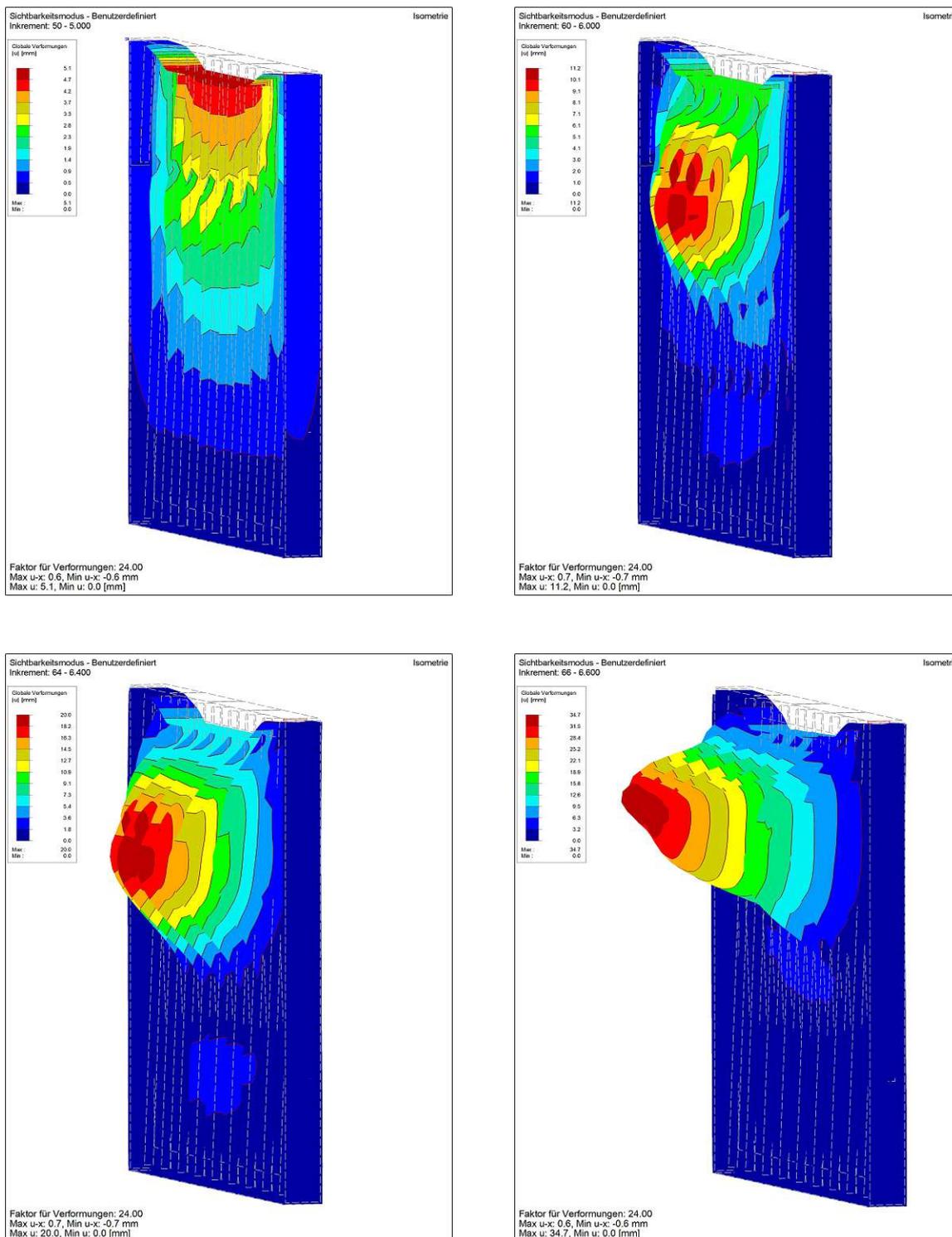


Abb. 3.81: Darstellungen der Verformungen der Variante mit Mittelebene für die eingepägten vertikalen Verformungen von 5,0 mm, 6,0 mm, 6,4 mm und 6,6 mm

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.3.2.1 Vollflächiges Belastungsszenario der Variante mit Mittelebene

Ähnlich zu den anderen Konstruktionsvarianten der Systemwand wird auch die Variante mit Mittelebene einer abgeänderten Belastung unterzogen. Wie auch bei den anderen Varianten wird nicht nur die Schwelle mit einer vertikalen Zwangsverformung, sondern nun auch die OSB Beplankungen mit einer solchen belastet. Eine Darstellung dieser Belastungssituation findet sich in Abb. 3.82.



Abb. 3.82: Darstellung der Mitbelastung der OSB Beplankung der Variante mit Mittelebene

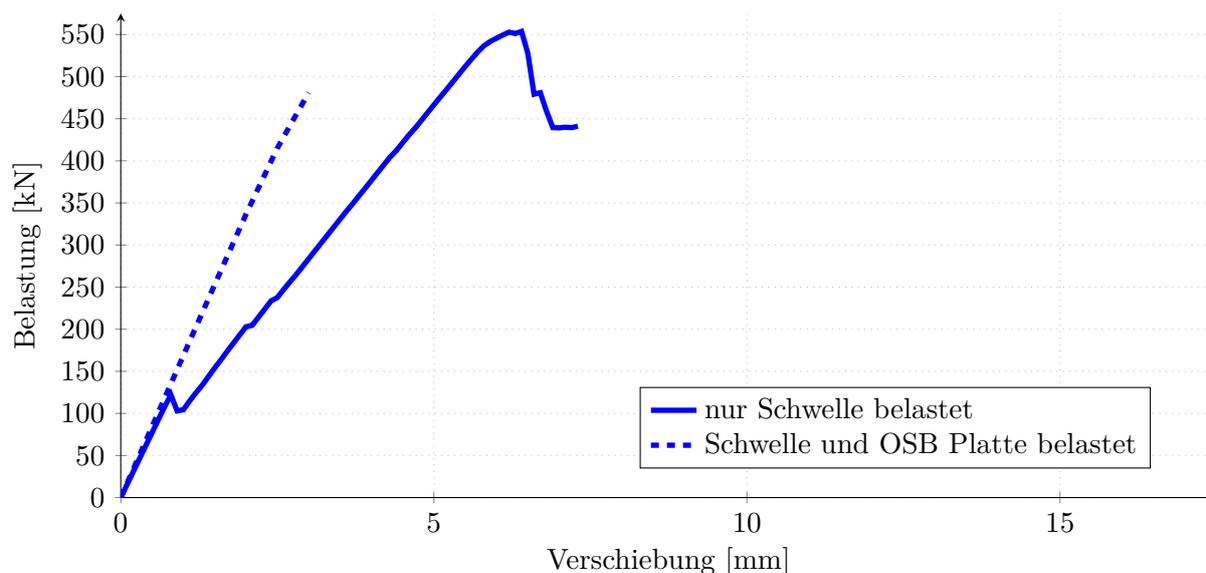


Abb. 3.83: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms der *Variante mit Mittelebene bei reiner Schwellenbelastung* und der *Variante mit Mittelebene bei Mitbelastung der OSB Beplankung*

Abb. 3.83 stellt die Lastverformungskurve der Variante mit Mittelebene mit und ohne Mitbelastung der OSB Beplankung gegenüber. Da bei der Mitbelastung der OSB Platten keine bzw. kaum eine Lastübertragung über die Klebefugen erfolgt, versagen diese auch nicht und die gesamte Tragstruktur weist dementsprechend ein nahezu ideal lineares elastisches Tragverhalten auf. Das Versagen dieser Konstruktionsvariante ist, ähnlich zu den anderen Varianten, auf einen globalen Stabilitätsverlust (Erreichen der Verzweigungslast) der Wand zurück zu führen.

3.3.3 Vergleich mit verklebtem Holzrahmenbau

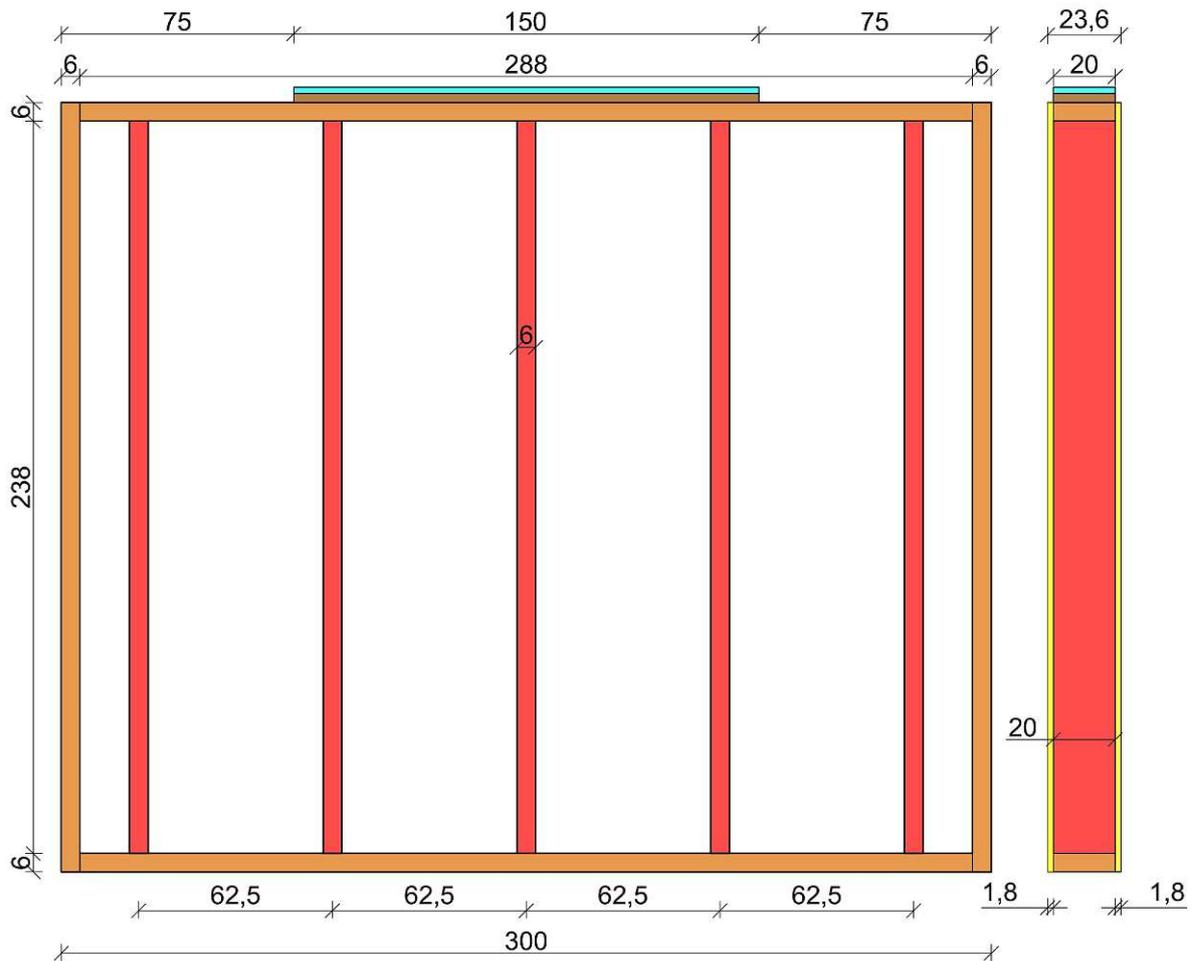


Abb. 3.84: Geometrie Vergleichsmodell verklebter Holzrahmenbau [cm]

In diesem Kapitel soll ein Vergleichsmodell mit dem Konstruktionsprinzip des verklebtem Holzrahmenbaus betrachtet werden. Abb. 3.84 zeigt eine geometrische Darstellung des Vergleichsmodells. Sämtliche Modellierungsparameter der Systemwand (siehe Kap. 3.1) werden für die Modellierung des Vergleichsmodells übernommen. Die darin verankerten Zahlenwerte werden lediglich den veränderten Geometrien (z.B. die Dicke der Lamellen wurde von 3 cm auf 6 cm angepasst) angeglichen. Eine Darstellung des Rechenmodells findet sich in Abb. 3.85.

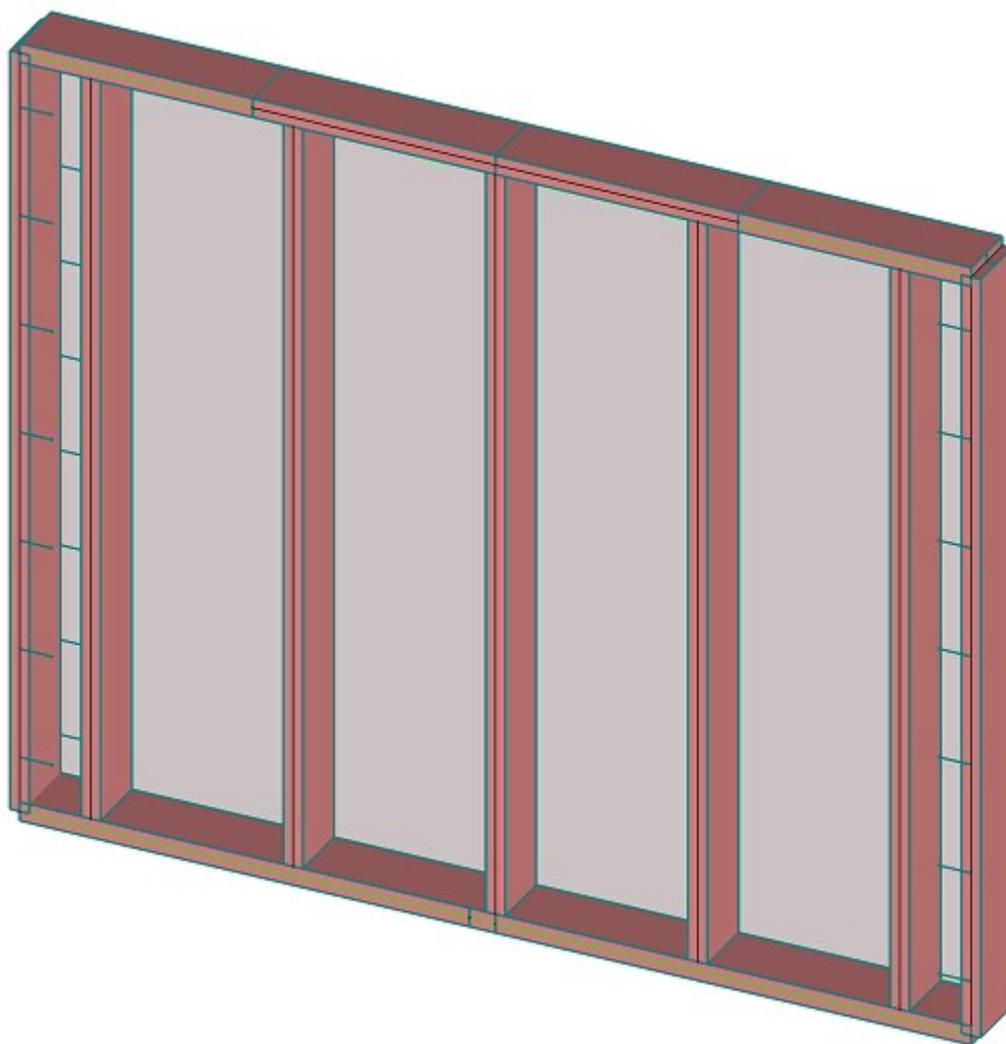


Abb. 3.85: Darstellung des Rechenmodells des Vergleichsmodells des verklebten Holzrahmenbaus

In Abb. 3.86 wird die Lastverformungskurve des Vergleichsmodells der Lastverformungskurve der Systemwand gegenüber gestellt. Dabei entspricht Variante 0 den Modellierungsparametern der Systemwand. Diese liefert jedoch unrealistische Werte bzw. anders formuliert ein unerwartbar niedriges Traglastniveau. Zurückzuführen ist dieses niedrige Traglastniveau auf ein vertikales Versagen der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung. Die Grenzlast für das Versagen der Klebefuge wurde durch den Ansatz der Rollschubfestigkeit der OSB Beplankung wie folgt ermittelt:

$$\text{Var.0} : f_{R,k} = 1,0 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_X = 1,0 * 10^{-1} * 6 * 100 = 60 \text{ kN/m} \quad (3.25)$$

Abb. 3.87 zeigt, dass bei Variante 0 die Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung bereits ab einer eingepprägten Verschiebung von 3 mm versagt. Praktisch zeitgleich versagt jedoch auch die Klebefuge zwischen den Lamellen und OSB Beplankung (Abb. 3.89). Somit kann die eingeleitete Belastung nicht mehr über die Klebefugen in die OSB Platten übertragen werden. Die Last muss somit rein durch die Steher abgetragen werden, was zu einem Ausknicken dieser

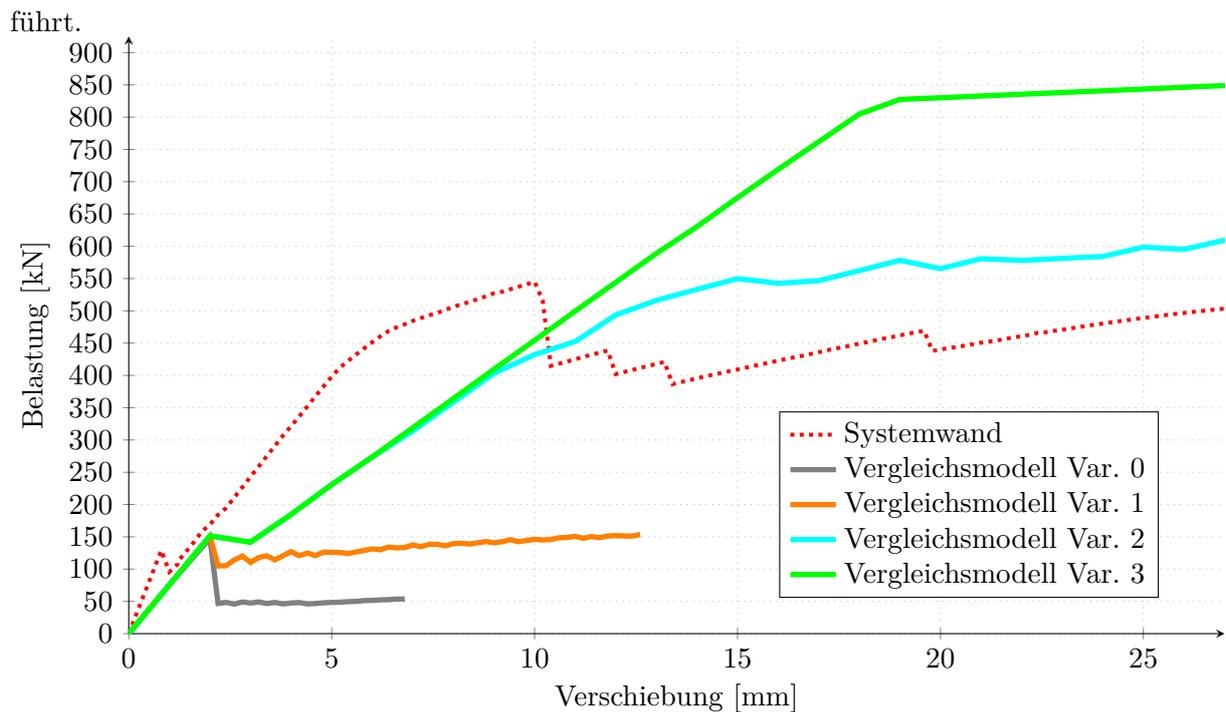


Abb. 3.86: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramm der *Systemwand* und den *Vergleichsmodellen des verklebten Holzrahmenbaus*

Da die Grenzlast der Kraftübertragung in der Klebefuge lediglich eine Abschätzung darstellt, kann angenommen werden, dass hier die unzureichende Modellbildung zur Abbildung der realen Verhältnisse vorliegt. Um ein realistisches Tragverhalten und somit ein geeignetes Vergleichsmodell zu generieren, werden drei weitere Varianten zur Modellierung der Klebefuge angeführt.

- Variante 1:
Die Grenzlast der übertragbaren vertikalen Last in der Klebefuge zwischen Lamellen und OSB Beplankung wird nicht wie in Variante 0 mit der Rollschubfestigkeit der OSB Beplankung, sondern mit der Längsschubfestigkeit der Lamelle abgeschätzt.

$$\text{Var.1} : f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_X = 4,0 * 10^{-1} * 6 * 100 = 240 \text{ kN/m} \quad (3.26)$$

- Variante 2:
Die Grenzlast der übertragbaren vertikalen Last in der Klebefuge zwischen Lamellen und OSB Beplankung wird mit der Druckfestigkeit in Faserrichtung abgeschätzt.

$$\text{Var.2} : f_{c,0,k} = 22 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_X = 22 * 10^{-1} * 6 * 100 = 1320 \text{ kN/m} \quad (3.27)$$

- Variante 3:
Bei dieser Variante wird von einer ideal starren Verklebung zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung ausgegangen.

Die Klebefuge zwischen oberer Schwelle und der OSB Beplankung versagt in allen Varianten bei der selben Laststufe. Durch die geänderten Parameter der Klebefuge zwischen den Lamellen und

der OSB Beplankung zwischen Variante 0 und Variante 2 versagt diese Klebefuge bei Variante 2 erst ab einer eingepprägten vertikalen Zwangsverformung von in etwa 11 mm (siehe Abb. 3.91). Das Aufgehen der Klebefuge schreitet bis zum Versagen immer weiter voran. Bei Variante 3 gibt es aufgrund der Modellbildung kein vertikales Versagen der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung. Die Traglast der Variante 3 ist begrenzt durch die maximal einzuleitende Vertikalkraft pro Lamelle, welche wiederum durch die Druckfestigkeit der Lamellen beschränkt ist.

$$F_{R,k,Lamelle} = f_{c,0,k} * b * h = 2,2 * 6 * 20 = 264 \text{ kN} \quad (3.28)$$

Diese Grenzlast der Lasteinleitung wird im Modell auf vier Starrstäbe aufgeteilt, was einer maximalen einleitbaren Last pro Starrstab von 66 kN entspricht. Diese Grenzlast wird auch im Gelenk am Kopplungspunkt zwischen Lamellen und Schwelle als Grenzlast berücksichtigt. Erreicht wird diese Grenzlast pro Starrstab ab einer vertikalen Zwangsverformung von in etwa 19 mm (siehe Abb. 3.92).

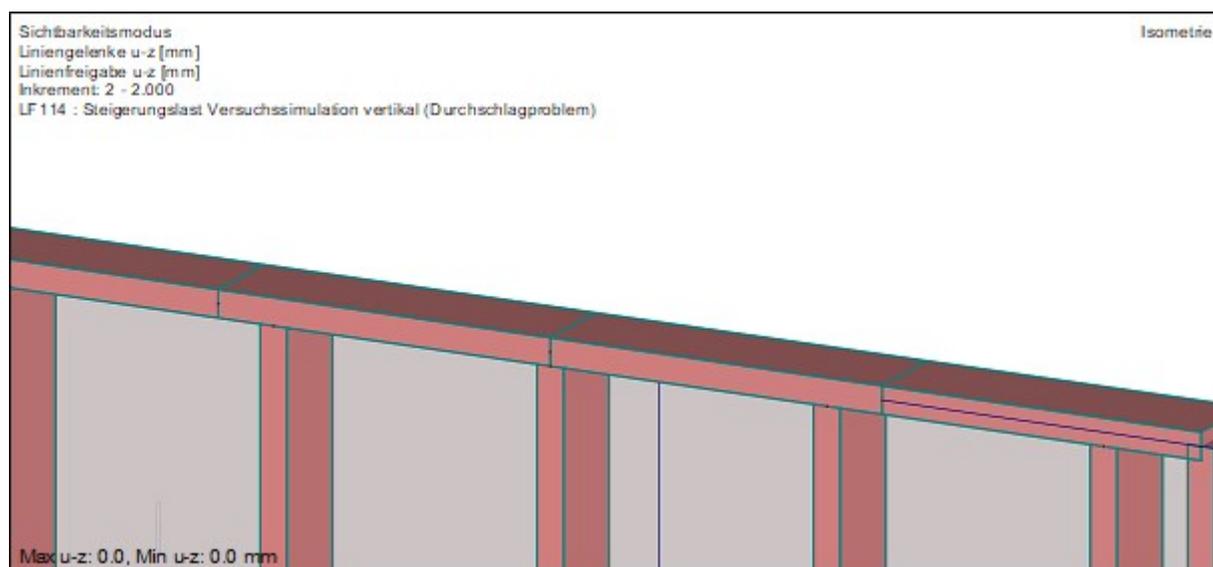


Abb. 3.87: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung für eine eingepprägte Verformung von 2,0 mm (Var. 0)

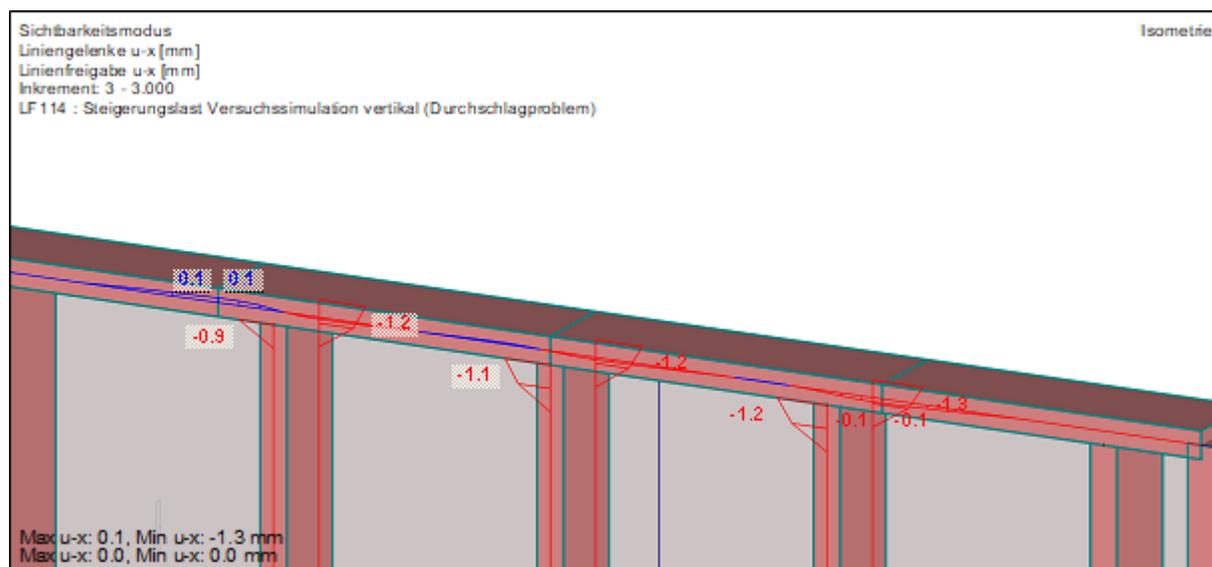


Abb. 3.90: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung für eine eingeprägte Verformung von 3,0 mm (Var. 0)

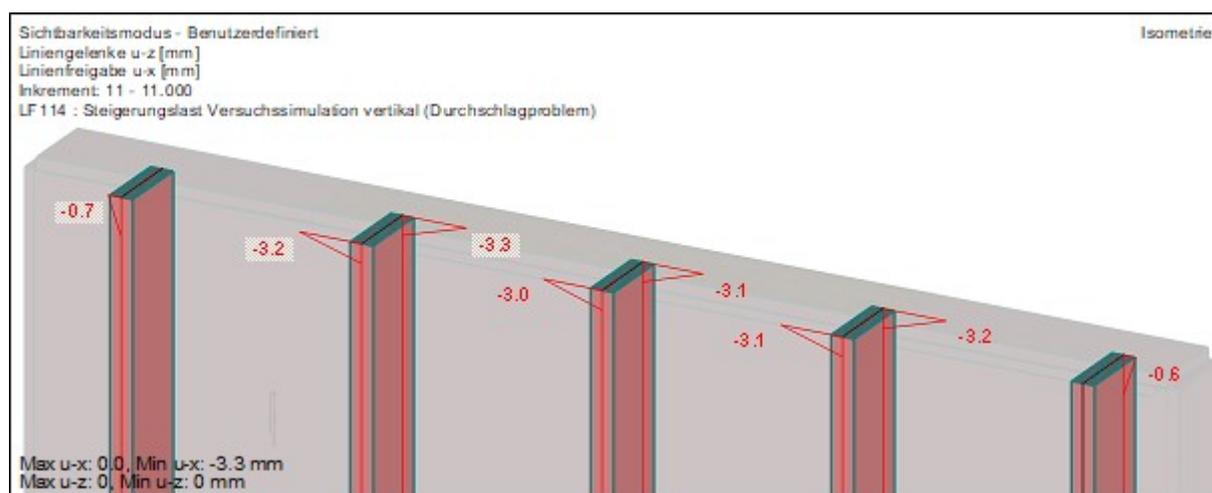


Abb. 3.91: Vertikale relative Verformung in der Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung für die eingeprägte Verformung von 11,0 mm (Var. 2)

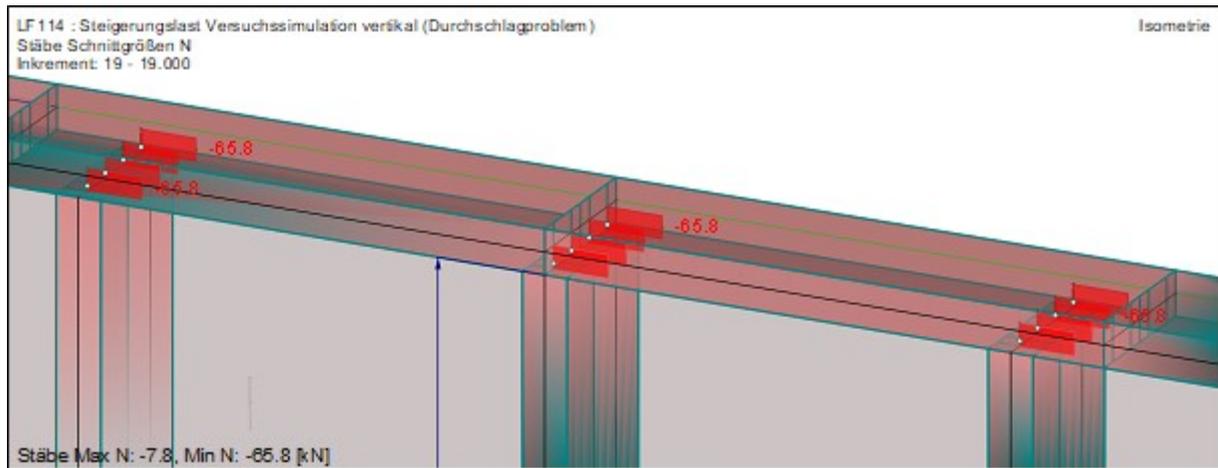


Abb. 3.92: Vertikal eingeleitete Kraft in die Lamellen bei einer eingprägten Verformung von 19,0 mm (Var. 3)

3.3.3.1 Vollflächiges Belastungsszenario des Vergleichsmodells (verklebter Holzrahmenbau)

Ähnlich wie bei der Variantenstudie aus Kap. 3.3 soll auch das Vergleichsmodell des verklebten Holzrahmenbaus einer alternativen vertikalen Belastungssituation, welche einer vollflächigen Belastung der Schwelle und der OSB Beplankung entspricht unterzogen werden. Simultan zu den Varianten der Systemwand wird als alternatives Belastungsszenario zuzüglich zu der eingepprägten Zwangsverformung des Lasttempels, was eine reine direkte Belastung der Schwellen zur Folge hat, eine eingepprägte vertikale Zwangsverformung der OSB Beplankung eingeführt (dargestellt in Abb. 3.93).

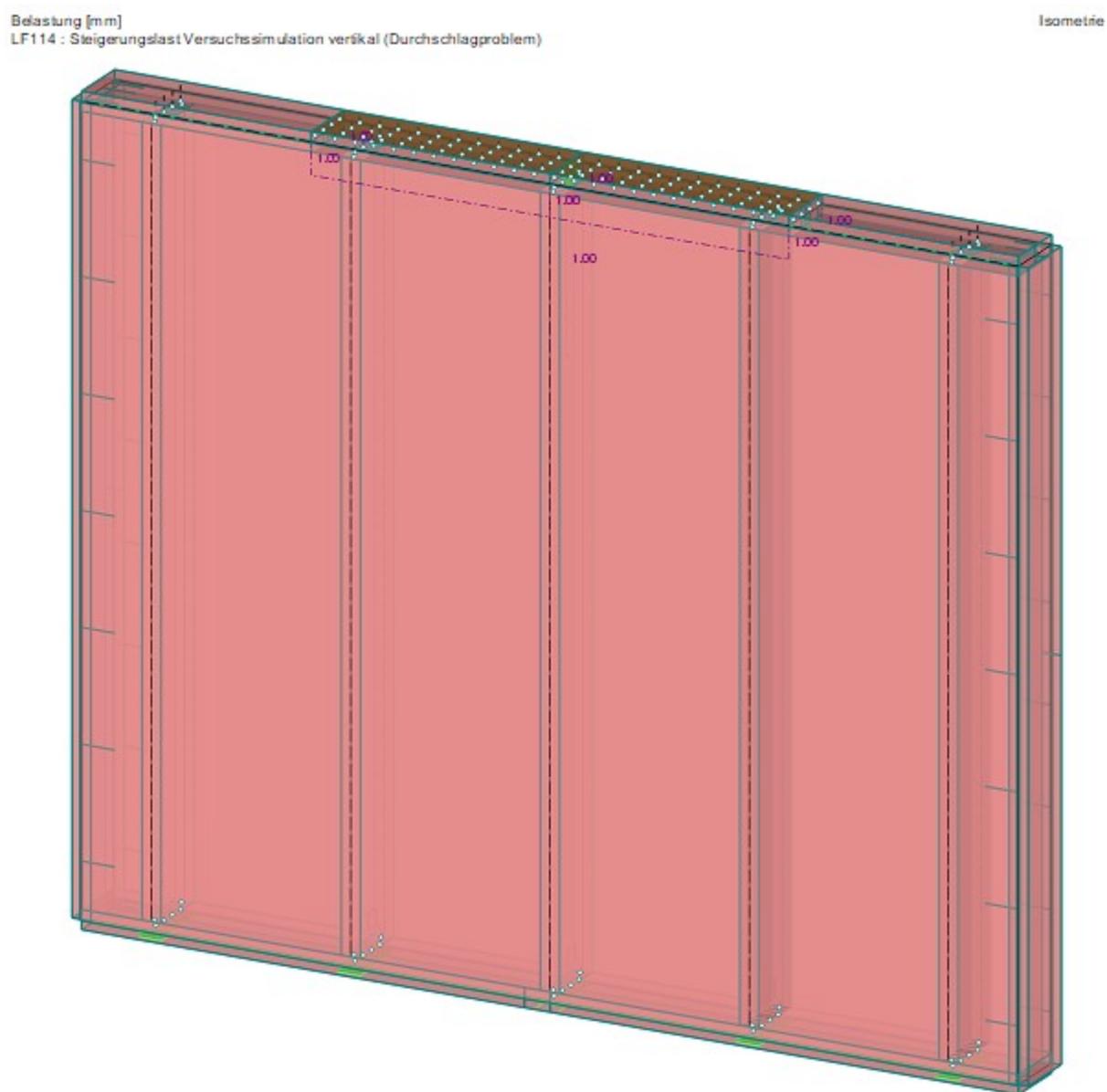


Abb. 3.93: Darstellung der Mitbelastung der OSB Beplankung beim Vergleichsmodell verklebter Holzrahmenbau

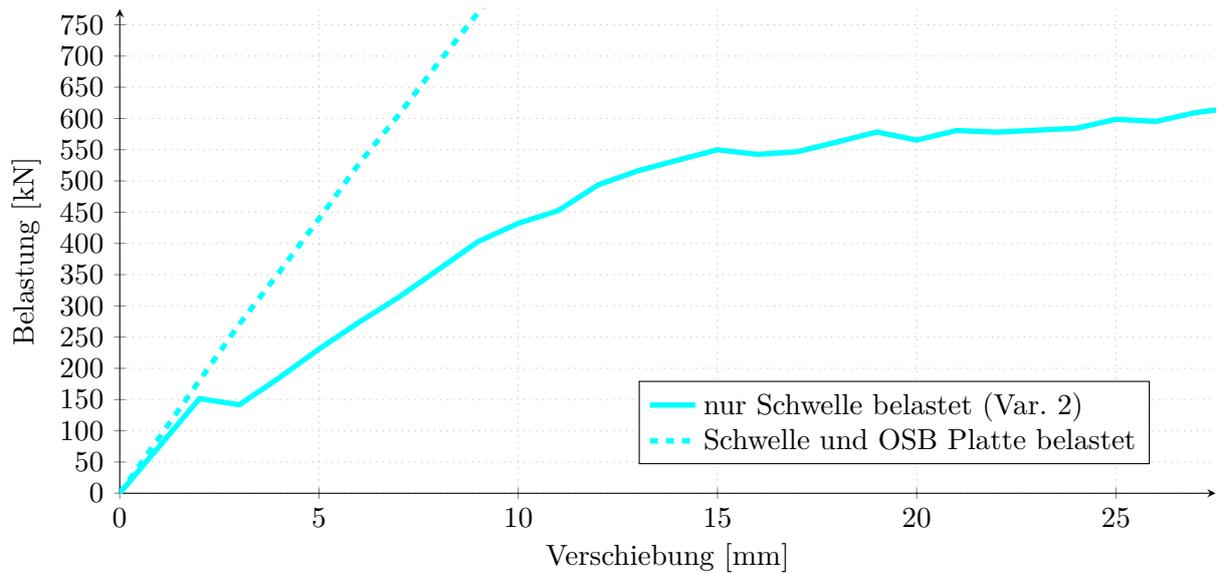


Abb. 3.94: Gegenüberstellung des Last-Verformungsdiagramms des *Vergleichsmodells verklebter Holzrahmenbau bei reiner Schwellenbelastung* und des *Vergleichsmodells verklebter Holzrahmenbau bei Mitbelastung der OSB Beplankung*

Abb. 3.94 zeigt, dass durch das Mitbelasten der OSB Beplankung ein nahezu ideal linear elastisches Tragverhalten des Gesamtsystems vorliegt. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Kräfte nicht mehr über die Klebefugen (welche ab einem gewissen Lastniveau teilweise versagen) in die OSB Beplankungen eingeleitet werden müssen, sondern durch die Belastung die OSB Platten direkt zum Lastabtrag herangezogen werden. Damit kann ein Versagen der Klebefuge, was zu einem nicht linearen Tragverhalten der Gesamtstruktur führen würde, verhindert werden.

3.4 Nachrechnung der Schubversuche mit Öffnung

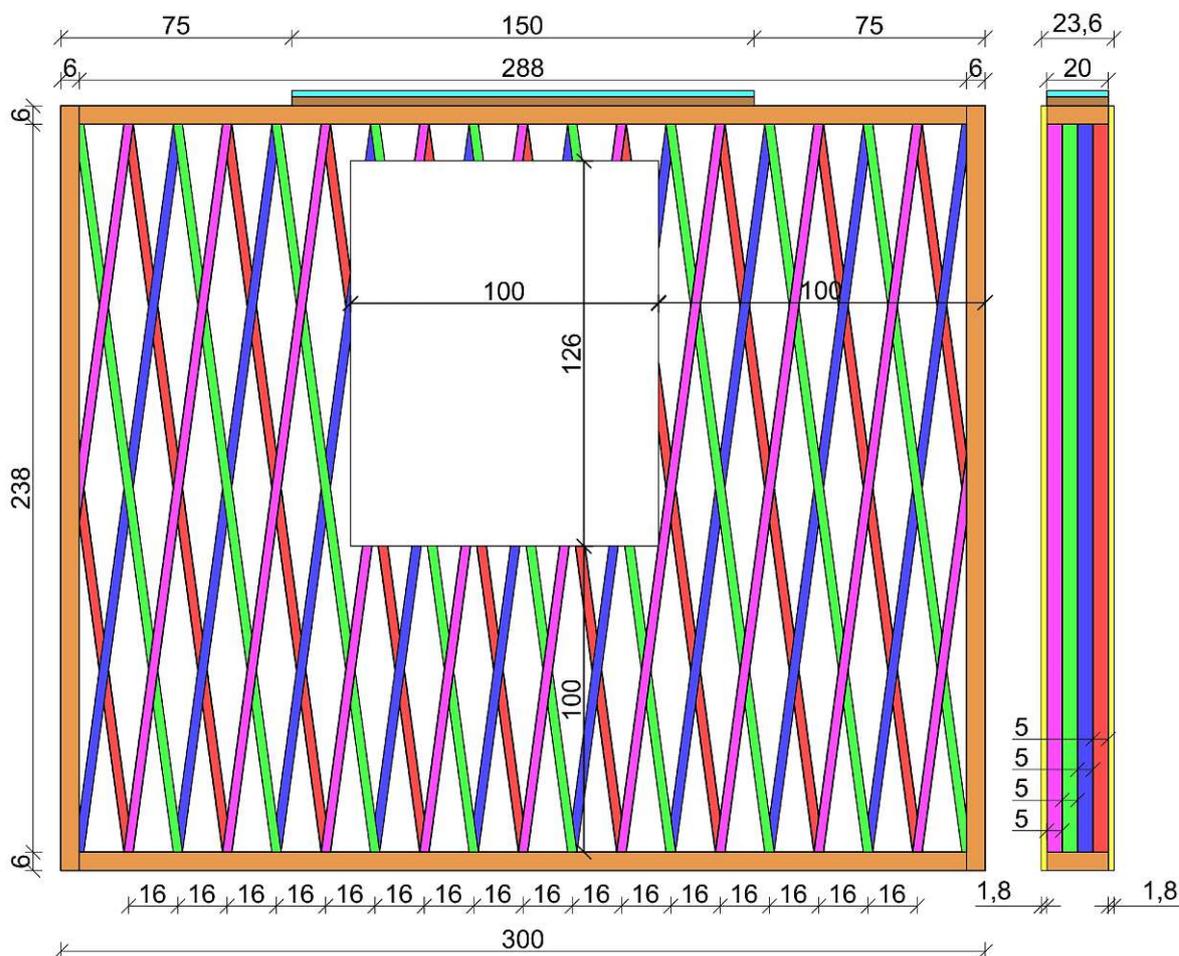


Abb. 3.95: Geometrie Systemwand mit Loch [cm]

In diesem Kapitel wird die Versuchskonfiguration V 2.2 gemäß Kap. 1.6.3 modelliert. Hierzu wird auf die geometrischen Randbedingungen, weiters auf die notwendigen Anpassungen des Rechenmodells und zuletzt auf die Ergebnisse dieser Simulation eingegangen.

Die grundsätzliche Geometrie bzw. die allgemeinen Abmessungen des Modellkörpers entsprechen dem bereits in Kap. 1.6.1 vorgestellten Prüfkörper. Die einzige geometrische Änderung ist ein Loch in der Systemwand, dessen Geometrie der Abb. 3.95 entnommen werden kann. Die Parameter der Modellbildung sind dieselben wie jene für die Modellbildung des Versuchskörpers des vertikalen Belastungsszenarios (siehe Kap. 3.1). Um das im Belastungsversuch festgestellte Aufreißen der OSB Beplankung (siehe Abb. 1.12) in das Modell einfließen lassen zu können, wurde in diesem Bereich eine Linienfreigabe modelliert. Die maximal zu übertragende Zugkraft in der OSB Beplankung (in Richtung der Hauptspannungsrichtung der Mittelzone) richtet sich nach der Zugfestigkeit der OSB Platte und errechnet sich demnach wie folgt:

$$f_{t,k} = 7 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{Zugfestigkeit} \quad (3.29)$$

$$F_{R,k} = 7 \text{ N/mm}^2 * 18 \text{ mm} * 10^3 = 126.000 \text{ N/m} = 126 \text{ kN/m} \quad (3.30)$$

Das Belastungsszenario sowie dessen Modellierung wurde bereits in Kap. 3.1.11 eingehend erläutert. Eine Darstellung des Rechenmodells kann der Abb. 3.96 entnommen werden.

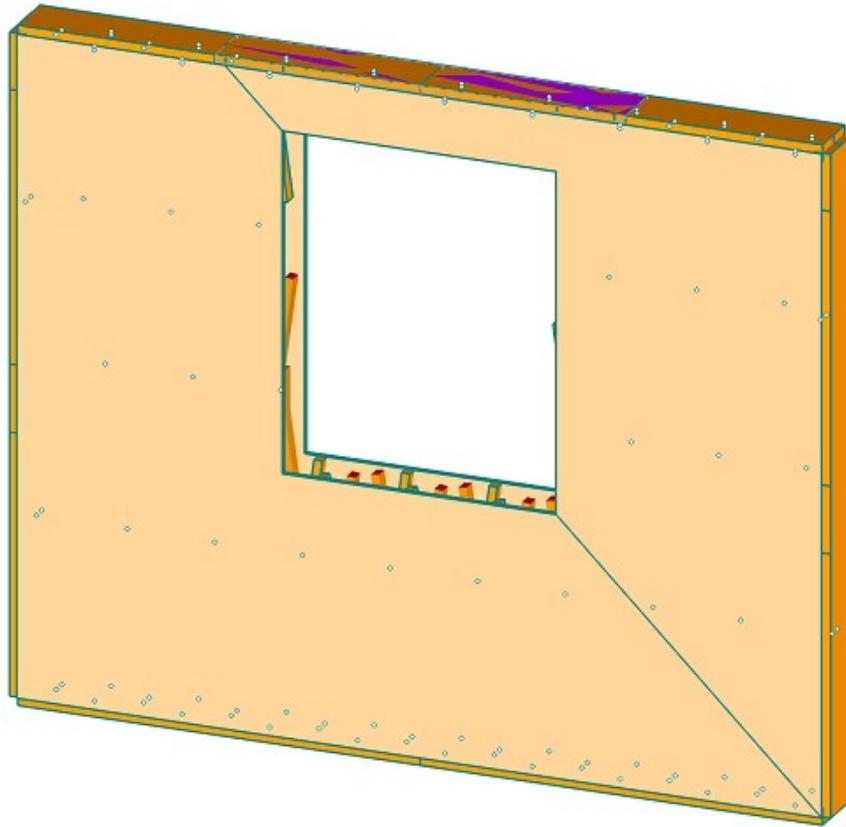


Abb. 3.96: Darstellung des Rechenmodells der Systemwand mit Loch

Da in weiterer Folge neben der gemessenen Kopfverschiebung auch die Längenänderung in der Diagonale der OSB-Platte betrachtet wird, wird im Rechenmodell ein Stab inklusive eines Normalkraftgelenks hinzugefügt, um über die Relativverschiebung des Normalkraftgelenks die Längenänderung in der Diagonale ablesen zu können.

3.4.1 Ergebnisse

In den Abb. 3.97 bzw. 3.98 werden die Ergebnisse der Rechenmodelle den Versuchsergebnissen zufolge Kap. 1.6.4 gegenübergestellt. Anhand beider Lastverformungsdiagramme ist zu erkennen, dass die Ergebnisse des Rechenmodells im wesentlichen den Ergebnissen der Belastungsversuche entsprechen. Sowohl bei Betrachtung der Kopfverschiebung als auch bei Betrachtung der diagonalen Längenänderung der OSB Beplankung ist ein im wesentlichen identisches Lastverformungsverhalten erkennbar.

Lediglich das Versagenszenario bei einem Lastniveau von in etwa 160 kN kann durch das Rechenmodell nicht abgebildet werden. Dies ist aber durch den Umstand begründbar, dass der Lastabfall im Tragverhalten der Versuchskonfigurationen nicht durch ein Versagen der Tragstruktur an sich hervorgerufen wird, sondern durch ein Ablösen des Rähms im oberen Bereich der Konstruktion (siehe Abb. 1.13) eine weitere Lasteinleitung behindert wird. Das Versagen der Verbindung zwischen Rähm und eigentlicher Systemwand wurde im Rechenmodell nicht vorgesehen. Dadurch kann der Lastabfall, der bei den Belastungsversuchen beobachtet werden konnte, nicht durch die Rechenmodelle abgebildet werden. Um dieses Versagenszenario korrekt darstellen zu können müsste eine Linienfreigabe in diesem Bereich ergänzt werden.

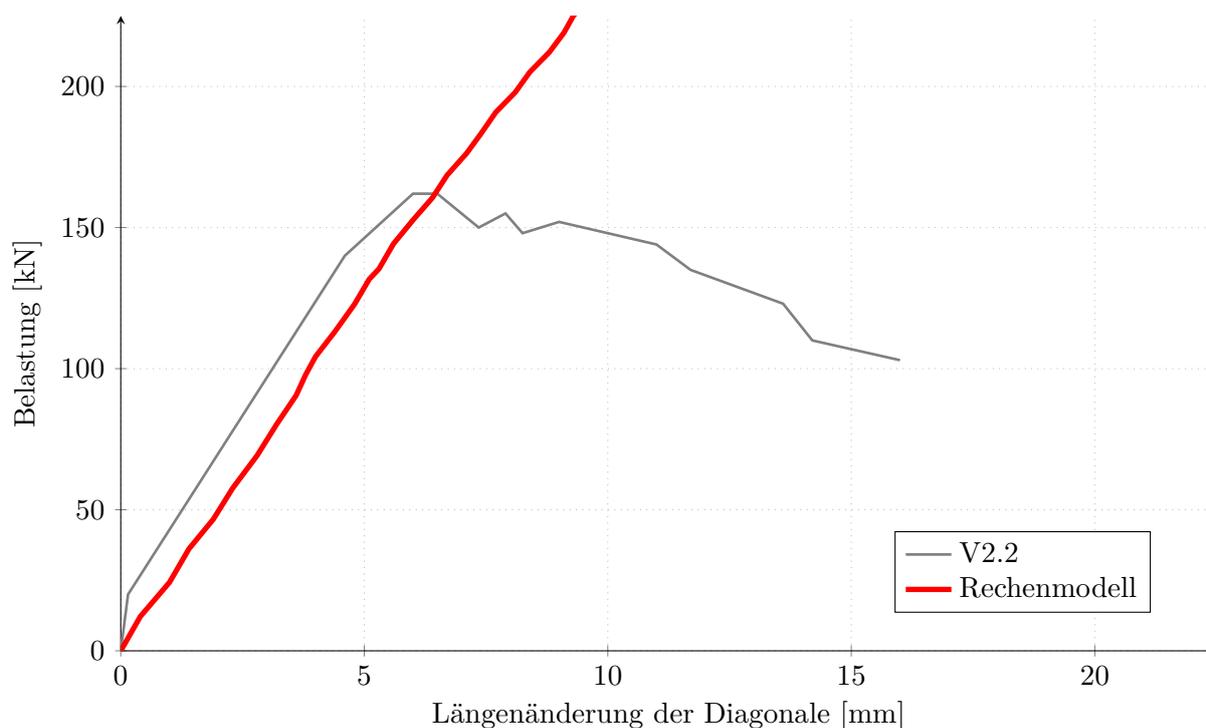


Abb. 3.97: Vergleich der Lastverformungskurve bezogen auf die Längenänderung der Diagonale des *Belastungsversuchs V2.2* mit dem *Rechenmodell mit Loch unter horizontaler Belastung*

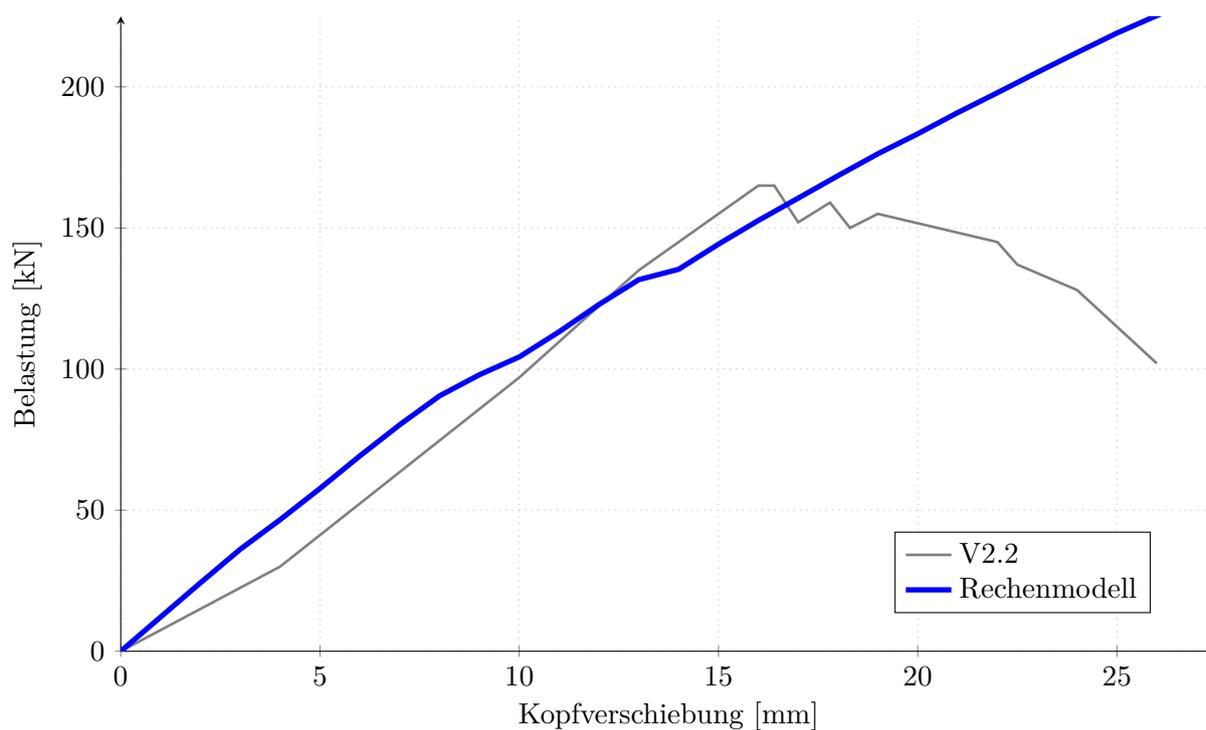


Abb. 3.98: Vergleich der Lastverformungskurve bezogen auf die Kopfverschiebung des *Belastungsversuchs V2.2* mit dem *Rechenmodell mit Loch* unter horizontaler Belastung

Kapitel 4

Schlussfolgerungen

4.1 Erkenntnisse aus der Variantenstudie

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse und Erkenntnisse der vorgestellten Systemwand sowie der betrachteten Varianten miteinander verglichen und gegenübergestellt werden. Weiters soll der Vergleich zur aktuell praxisrelevanten Konstruktionsweise des Holzrahmenbaus gezogen werden. Da das vertikale Belastungsszenario gemäß Kap. 3.1.11 die dominierende Belastungsweise der gesamten Arbeit darstellt, werden auch sämtliche nun folgenden Vergleiche auf Basis dieser Belastung beurteilt.

Um diese Vergleiche anstellen zu können werden folgende Parameter herangezogen:

- Traglast
- Systemsteifigkeit
- Komplexität des Herstellungsprozesses

Um die Übersicht über das Tragverhalten der verschiedenen Systeme zu erhalten, werden in Abb. 4.1 sämtliche Lastverformungskurven der verschiedenen Varianten unter der vertikalen Belastungssituation *reine Schwellenbelastung* dargestellt. In Abb. 4.2 werden die Lastverformungskurven der verschiedenen Varianten für die vertikale Belastungssituation *Schwelle und OSB belastet* dargestellt.

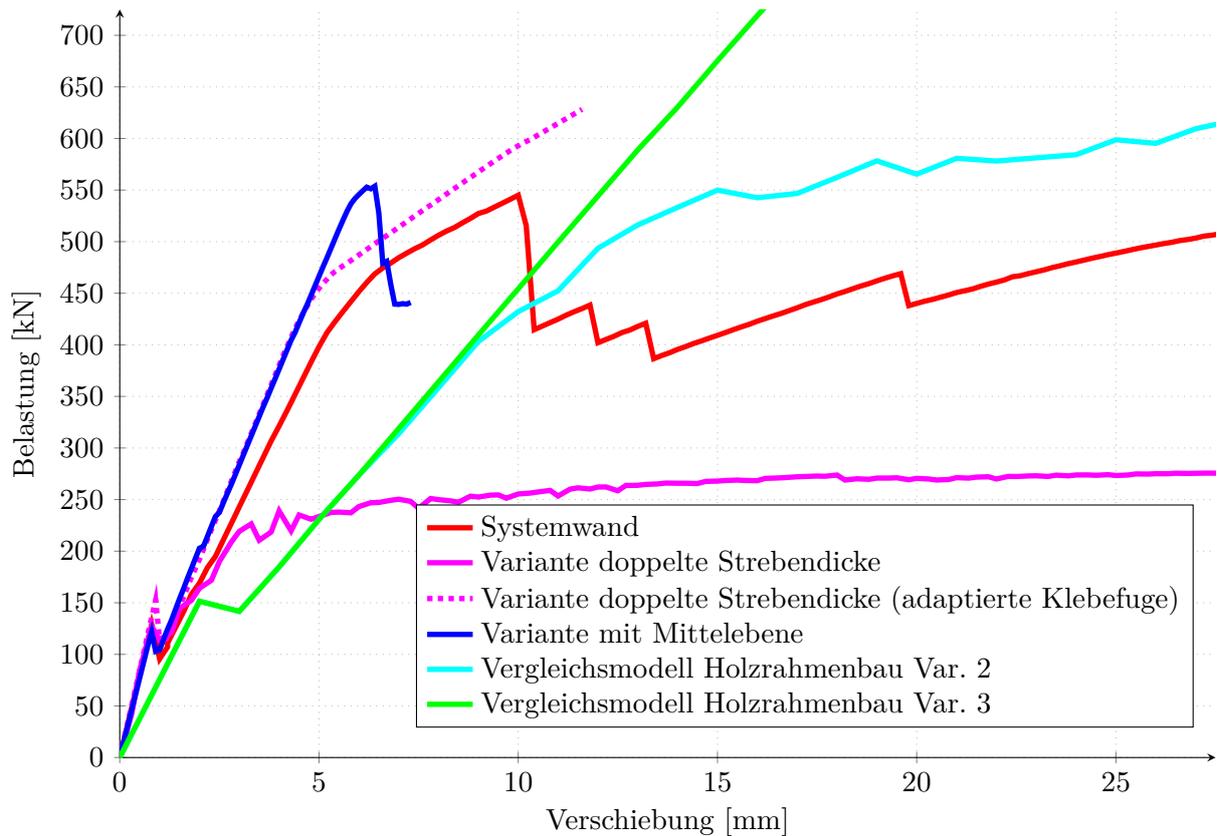


Abb. 4.1: Gegenüberstellung der Last-Verformungsdiagramme der *Systemwand*, der *Variante mit doppelter Strebendicke*, der *Variante mit Mittelebene* und dem *Vergleichsmodell mit verklebtem Holzrahmenbau* unter Vertikalbelastung der Schwelle

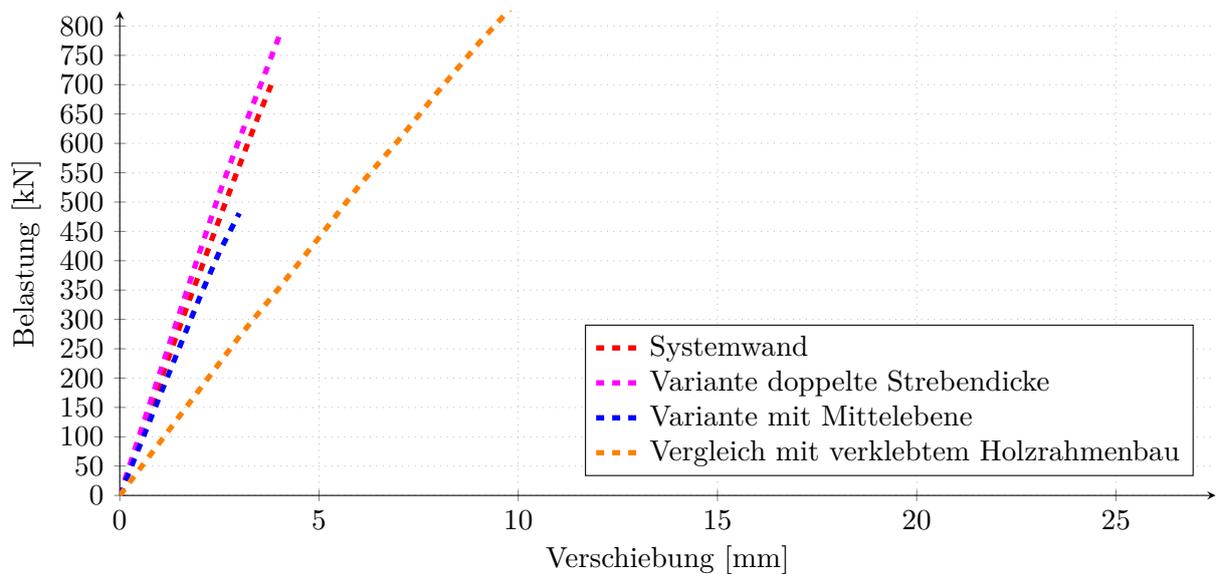


Abb. 4.2: Gegenüberstellung der Last-Verformungsdiagramme der *Systemwand*, der *Variante mit doppelter Strebendicke*, der *Variante mit Mittelebene* und dem *Vergleichsmodell mit verklebtem Holzrahmenbau* unter Vertikalbelastung der Schwelle und der OSB Beplankung

Anbei eine Betrachtung der vorgestellten Varianten der Systemwand sowie des verklebten Holzrahmenbau welche nach der Komplexität ihres Herstellungsprozesses gegliedert wird. Hierbei beschreibt 1 den komplexesten und 4 den einfachsten Herstellungsprozess. Diese Betrachtung ergibt folgende Gliederung:

1. Variante mit Mittelebene
2. Grundvariante der Systemwand
3. Variante mit doppelter Strebendicke
4. verklebter Holzrahmenbau

Ausgehend von dieser Wertung und der Annahme, dass die Grundvariante der Systemwand den Ausgangspunkt der im Weiteren folgenden Betrachtungen darstellt, sollte die Variante mit Mittelebene Vorteile im Bereich des Lastverhaltens gegenüber der Grundvariante der Systemwand bieten, um den komplizierteren Herstellungsprozess kompensieren zu können. Betrachtet man Abb. 4.1 zeigt sich, dass die Grundvariante der Systemwand und die Variante mit Mittelebene ein ähnliches Traglastniveau von in etwa 500 bis 550 kN aufweisen. Die Variante mit Mittelebene erreicht diese Traglast jedoch bereits bei einer aufgetragenen vertikalen Zwangsverformung von in etwa 6 mm, während die Grundvariante der Systemwand ihr Traglastniveau erst bei einer eingepprägten vertikalen Zwangsverformung von 10 mm erreicht. Das bedeutet, dass die Variante mit Mittelebene im Vergleich zur Grundvariante der Systemwand ein steiferes Tragverhalten aufweist.

Weiters ist die Lastverformungskurve der Variante mit Mittelebene (bis auf das Abreißen der Fuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung) bis zu ihrem Versagen hin nahezu ideal linear elastisch. Erst durch das globale Ausbeulen der Gesamtkonstruktion ist die Traglast der Variante mit Mittelebene erreicht. Ein steiferes Systemverhalten ist grundsätzlich positiv zu bewerten, da zulässige Verformungen im Allgemeinen erst zu einem späteren Lastniveau auftreten und so Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit leichter erfüllt werden können. Weiters müssen mögliche angeschlossene Bauteile, wie zum Beispiel Geschoßdecken mit geringeren Verformungen, belastet werden. Im Gegenteil dazu findet bei der Grundvariante bereits ab einem Lastniveau von in etwa 400 kN eine irreversible plastische Einpressung der Lamellen in die Schwellen statt. Eine mögliche Steigerung der Traglast der Variante mit Mittelebene wäre relativ einfach durch eine dickere Ausführung der OSB Platten ausführbar. Da die Traglast der Grundvariante der Systemwand einerseits durch die Einpressung der Lamellen in die Schwelle und andererseits durch ein Ausknicken der Innenlamellen begrenzt ist, wird die Steigerung der Traglast der Grundvariante nicht so trivial möglich sein.

Ausgehend von der Wertung der Komplexität des Herstellungsprozesses hat die Variante mit doppelter Strebendicke durch die einfachere Herstellung bereits einen Vorteil gegenüber der Grundvariante der Systemwand. Darüber hinaus kann die Variante mit doppelter Strebendicke eine höhere Traglast von in etwa 600 bis 650 kN erzielen (verglichen mit der Traglast der Grundvariante der Systemwand von in etwa 500 bis 550 kN). Diese höhere Traglast ist jedoch nur erreichbar, wenn die zu übertragende Last in der Klebefuge zwischen den äußeren Lamellen und der OSB Beplankung ausreichend hoch ist. Diese Grenzlaster muss in weiteren Forschungsarbeiten genauer untersucht werden um eine exaktere Modellierung der Klebefugen erzielen zu können. Geht man davon aus, dass auch höhere Lasten (siehe dazu auch Kapitel 3.3.1.1) übertragen werden können ist das grundlegende Tragverhalten der Variante mit doppelter Strebendicke jedoch grundsätzlich sehr ähnlich dem der Grundvariante der Systemwand. Die nicht linearen Phänomene des Versagens der Klebefuge zwischen oberer Schwelle und OSB Beplankung sowie die Einpressung der Lamellen in die Schwellen treten in beiden Varianten auf. Jedoch kann die

gewünschte Verhinderung des Ausknickens der Innenlamellen bei der Variante mit doppelter Strebendicke durch die Verdopplung der Dicke der Streben und die damit einhergehende Reduktion auf nur zwei Strebenebenen erzielt werden.

Interessant ist, dass die Variante mit doppelter Strebendicke (mit der höheren übertragbaren Last in der Klebefuge zwischen Lamelle und OSB Beplankung) eine annähernd gleich hohe Traglast wie das Vergleichsmodell des verklebten Holzrahmenbaus mit einer in Vertikalrichtung idealisiert unendlich steifen Klebefuge zwischen den Lamellen und der OSB Beplankung (entspricht Variante 3 in Abb. 4.1) bietet. Noch dazu ist diese Variante mit doppelter Strebendicke, vorallem im Lastbereich bis in etwa 450 kN, wesentlich steifer (Faktor 2,5) als der verklebte Holzrahmenbau. Diese erhöhte Steifigkeit ist auf die größere Homogenität des Tragsystems der Variante mit doppelter Strebendicke zurückzuführen. Diese im Vergleich sehr hohe Steifigkeit kann wiederum aus den gleichen Gründen, die zuvor bereits genannt wurden, als im Allgemeinen positiv gewertet werden.

Auf Basis der Einflüsse des Tragverhaltens der verschiedenen Varianten der Systemwand und unter Berücksichtigung der Komplexität des Herstellungsprozesses ergibt sich gesamtheitlich gesehen folgendes Ranking:

1. Variante mit doppelter Strebendicke (bei höherer Kraftübertragung in der Klebefuge)
2. verklebter Holzrahmenbau
3. Variante mit Mittelebene
4. Grundvariante der Systemwand
5. Variante mit doppelter Strebendicke (ohne höherer Kraftübertragung in der Klebefuge)

Hierbei ist die Variante mit doppelter Strebendicke (mit höherer Kraftübertragung in der Klebefuge) als effizienteste Variante zu sehen. Aufgrund des doch noch relativ einfacheren Herstellungsprozesses, aber trotzdem sehr steifen Tragverhaltens, ist diese Variante meiner Meinung nach zu präferieren. Der verklebte Holzrahmenbau ist jedoch meiner Einschätzung zufolge durch seinen sehr einfachen Herstellungsprozess und der dennoch sehr hohen zu erzielenden Traglasten eine nahezu ebenbürtige Variante. Die Variante mit Mittelebene stellt eine relativ komplexe Struktur dar, welche jedoch mit relativ leichten Mitteln (dickere OSB Platten) weiter entwickelt werden und noch höhere Traglasten erzielen könnte. Der Variantenvergleich wird in Tab. 4.1 komprimiert dargestellt. Für den Vergleich in Tab. 4.1 wird bei der Variante mit doppelter Strebendicke das Alternativmodell mit höheren übertragbaren Lasten in der Klebefuge zwischen Lamelle und OSB Beplankung herangezogen.

Tab. 4.1: Übersicht Variantenvergleich

Vergleichsobjekt	Grundvariante	Var. doppelte Strebendicke	Var. mit Mittelebene
Traglast	+/-	+	+/-
Systemsteifigkeit	-	+/-	+
Herstellungsprozess	+/-	+	-

4.2 Ausblick auf weitere Forschung

Dieses Kapitel soll einen Ausblick darauf geben, welche weiteren Fragen noch zu beantworten sind, um die Idee der Systemwand der Firma EGGER weiter voran zu bringen.

- In erster Linie wird es sinnvoll sein, anhand weiterer Belastungsversuche, vorallem von Probekörpern der Variante mit doppelter Strebendicke und der Variante mit Mittelebene, die Ergebnisse der Rechenmodelle validieren zu können. Eine große Frage im Hinblick auf weitere Modellbildungen wird sein, das Verhalten der Klebefugen detailliert und vollständig zu verstehen und somit auch möglichst realitätsnah in weitere Rechenmodelle einfließen lassen zu können.
- Ein weiterer Schritt wird sein auch außergewöhnliche Belastungsszenarien, wie ein Brandzenario näher zu betrachten. Welche Auswirkungen haben beispielsweise der rechnerische Verlust einer Beplankung? Welches Tragverhalten stellt sich bei einer Systemkonfiguration von nur einer einseitigen Beplankung ein? Welche Auswirkung hat die dadurch entstehende exzentrische Vertikallast auf das Tragverhalten der Systemwand?
- Eine weitere, im Allgemeinen noch unbeantwortete Problemstellung, ist die Frage nach dem Umgang mit Öffnungen. Welche konstruktiven Maßnahmen können getroffen werden um zwangsweise auftretende Durchringungen der Struktur herstellen zu können. Ist es sinnvoll, zusätzliche Bauteile in Form einer Auswechslung vorzusehen oder können auch andere, einfachere Konstruktionen gefunden werden um mit Öffnungen in der Konstruktion umgehen zu können?
- Ein weiteres, bisher noch nicht beachtetes Belastungsszenario, ist eine Beanspruchung der Systemwand als Platte. Diese Beanspruchung könnte z.B. aus einer Windbelastung oder etwaigen Imperfektionen entstehen. Welche Lastweitergabepunkte in Dickenrichtung der verschiedenen Varianten der Systemwand stehen dabei zur Verfügung? Wie stellt sich der Lastfluss einer solchen Belastung konkret dar?

Literatur

- [1] M. S. Agerer. *Knicken - Eulersche Knickfälle*. 2023. URL: <https://www.maschinenbauwissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/134-knicken-euler> (Zugriff am 20.05.2023).
- [2] BILP. *Die Schlankheit*. 2023. URL: <https://holzbau.bilp.de/anleitung-dachkonstruktion/allgemeinheit/schlankheit> (Zugriff am 19.05.2023).
- [3] F. Domschat. *Holztafelbauelement, Verfahren zur Herstellung eines Holztafelbauelements und Verwendung eines Holztafelbauelements*. 2020. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/64/ad/c3/d706e2e3ac2c69/DE102020104929A1.pdf> (Zugriff am 05.06.2023).
- [4] S. Glattacker. *Prüfbericht Nr. 226102 - Versuche an Wandscheiben Systemwand*. Forschungsber. Amtliche Materialprüfungsanstalt für Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2022. 25 S.
- [5] J. Kohlauf. *Kohlhauf Wandsysteme – flexibel, ökologisch und energiesparend!* 2015. URL: <http://https://www.zimmerei-kohlhauf.de/wandsysteme/> (Zugriff am 23.04.2023).
- [6] R. Mauritz. *Systemwand – Schwellendruck Strebe-Schwelle*. Forschungsber. EGGER, 2022. 12 S.
- [7] *ÖN EN 594:2011-09 Holzbauwerke - Prüfverfahren - Wandscheiben-Tragfähigkeit und -Steifigkeit von Wandelementen in Holztafelbauart; Deutsche Fassung EN 594:201*. Wien: Austrian Standards, Sep. 2011.
- [8] *ÖNORM EN 1995-1-1:2019 06 01: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Austrian Standards, Juni 2019.
- [9] M. Raimund. „EGGER Systemwand“. In: Vorstellung als Input für Holzbauexperten / Zimmermeister (6. Mai 2022). 2022, S. 1–9.
- [10] RFEM. *RFEM 5 Räumliche Tragwerke nach der Finite-ElementeMethode*. März 2020. Tiefenbach: Dlubal Software, 2020.
- [11] M. Steger. „Mechanische Analyse einer neuartigen Holz-Fertigteilmwand mittels finite-Element-basierter Simulation“. Diplomarbeit. Wien: TU Wien, 2022.