

Entwicklung einer Methode für die Modellierung, Bemessung und Ausführung von aussteifenden Holzrahmenbau-Wänden mit Öffnungen

Projekt REF-5211.02086.100.01

Schlussbericht

27.11.2025

Nadja Manser
Lukas Kramer
Martin Geiser
René Steiger

Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen und IBK / ETH Zürich
BFH-AHB, Biel/Bienne und Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen
BFH-AHB, Biel/Bienne
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	3
2	ZIELE UND RAHMEN DES PROJEKTS.....	4
2.1	PROJEKTZIELE	4
2.2	PROJEKTTEAM	4
2.3	ARBEITSSCHRITTE IM PROJEKT.....	4
2.4	BEGRIFFE IM ZUSAMMENHANG MIT HOLZRAHMENBAUWÄNDEN MIT FENSTERÖFFNUNGEN.....	5
3	DEFINITION DER ZU UNTERSUCHENDEN PARAMETER (ARBEITSPAKET 1).....	5
4	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN (ARBEITSPAKETE 2 – 5).....	6
4.1	ARBEITSPAKET 2: OPTIMIERUNG DER VERBINDUNGSMITTELKONFIGURATION	6
4.1.1	<i>Inhalt und Ziele.....</i>	6
4.1.2	<i>Resultate und Fazit</i>	7
4.2	ARBEITSPAKET 3: ENTWICKLUNG VON METHODEN ZUR OPTIMIERUNG DES KRAFTFLUSSES	7
4.2.1	<i>Inhalt und Ziele.....</i>	7
4.2.2	<i>Resultate und Fazit</i>	9
4.3	ARBEITSPAKET 4: WEITERE UNTERSUCHUNGEN AN EINZELNEN, EINGESCHOSSIGEN WANDELEMENTEN.....	10
4.3.1	<i>Inhalt und Ziele.....</i>	10
4.3.2	<i>Resultate und Fazit</i>	12
4.4	ARBEITSPAKET 5: ZWEIFESCHOSSIGE WÄNDE UND LANGE, EINGESCHOSSIGE WANDELEMENTE	13
4.4.1	<i>Inhalt und Ziele des Arbeitspakets.....</i>	13
4.4.2	<i>Inhalt und Ziele der Versuche an den zweigeschossigen Wänden</i>	13
4.4.3	<i>Resultate und Fazit der Versuche an den zweigeschossigen Wänden.....</i>	14
4.4.4	<i>Inhalt und Ziele der Versuche an langen eingeschossigen Wandelementen</i>	15
4.4.5	<i>Resultate und Fazit der Versuche an den langen, eingeschossigen Wandelementen</i>	16
4.5	FAZIT DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN IN DEN ARBEITSPAKETEN 3 BIS 5	17
5	NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZU DEN VERSUCHEN IN DEN ARBEITSPAKETEN 3 BIS 5.....	18
5.1	INHALT UND ZIELE	18
5.2	RESULTATE UND FAZIT.....	18
5.3	WEITERE ARBEITEN	19
6	VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE MIT ANALYTISCHEN BERECHNUNGSMETHODEN.....	19
6.1	INHALT UND ZIELE	19
6.2	RESULTATE UND FAZIT.....	20
7	ARBEITSPAKET 6: WEITERE RELEVANTE PARAMETER FÜR DIE BEMESSUNG VON HOLZRAHMENBAUTEN MIT WÄNDEN MIT BZW. OHNE FENSTERÖFFNUNGEN.....	21
7.1	INHALTE UND ZIELE	21
7.1.1	<i>Untersuchungen zum Verhaltensbeiwert q.....</i>	21
7.1.2	<i>Untersuchungen zur Tragwerksdämpfung</i>	22
7.2	ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	22
7.2.1	<i>Untersuchungen zum Verhaltensbeiwert q.....</i>	22
7.2.2	<i>Untersuchungen zur Tragwerksdämpfung</i>	22
8	ARBEITSPAKET 7: WISSENSTRANSFER.....	23
8.1	INHALT UND ZIELE	23
8.2	WISSENSCHAFTLICHE PUBLIKATIONEN UND PRÄSENTATIONEN DES PROJEKTS.....	23
8.3	BACHELOR- UND MASTERARBEITEN IM PROJEKT	26
8.4	ERSTELLUNG DES LEITFADENS FÜR DIE PRAXIS	26
9	PROJEKTSITZUNGEN UND WORKSHOPS	27

1 Einleitung

Neben den vertikalen Einwirkungen wie Eigengewicht, Auflasten, Schnee- und Nutzlasten müssen bei der Bemessung von Hochbauten stets auch horizontale Einwirkungen, insbesondere Wind- und Erdbebenlasten, berücksichtigt werden. Untersuchungen an der Berner Fachhochschule (BFH) haben gezeigt, dass die Bemessungssituation für Erdbeben selbst in der Schweiz – trotz geringer bis mittlerer Seismizität – häufig bemessungsrelevant sein kann [1]. Im Holzbau werden häufig Holzrahmenbauwände für die horizontale Gebäudeaussteifung eingesetzt. Nach den derzeit gültigen Normen, wie z.B. der Schweizer Norm SIA 265:2021 [2] oder dem Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1/NA:2013 [3]), dürfen für die Aussteifung eines Gebäudes jedoch nur jene Wandsegmente berücksichtigt werden, die durchgehend von der Bodenplatte bis zur Oberkante des Gebäudes verlaufen.

Die moderne Architektur stellt diese Voraussetzung zunehmend in Frage. Offene Grundrisse mit wenigen Innenwänden und grosse Fensteröffnungen in den Aussenwänden führen häufig dazu, dass nur noch wenige durchgehende Wandsegmente vorhanden sind, welche die erforderliche Aussteifung gegen horizontale Kräfte gewährleisten können. Dies kann dazu führen, dass nicht ausreichend Wände für die horizontale Gebäudeaussteifung zur Verfügung stehen. In der Praxis werden bei Wänden mit grossen Fensteröffnungen in der Regel nur die Segmente, welche direkt an die Fensteröffnungen angrenzen, zur Aufnahme horizontaler Kräfte berücksichtigt. Die Wandbereiche ober- und unterhalb der Öffnungen tragen jedoch zur Gesamtsteifigkeit und zum Tragwiderstand der Wand in horizontaler Richtung bei. Das derzeitige normative Vorgehen führt somit zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Steifigkeit und des Tragwiderstands solcher Wände.

Zwar erlauben aktuelle Normen wie die Norm SIA 261:2020 [4] unter bestimmten Voraussetzungen Abweichungen von den normativen Regelungen, jedoch fehlten im Fall von Wänden mit Fensteröffnungen bislang die notwendigen theoretischen und experimentellen Grundlagen. Diese Unsicherheit wirkt sich nicht nur auf die Tragsicherheit, sondern auch auf die Wirtschaftlichkeit aus: Wenn nur die schmalen Wandsegmente neben den Öffnungen als tragend angesetzt werden, erhöhen sich sowohl die Anzahl der notwendigen Zugverankerungen als auch die Grösse der zu übertragenden Zugkräfte. Würden die Wandbereiche um die Fensteröffnungen systematisch in die Bemessung einbezogen werden, liesse sich die Zahl der Zugverankerungen und die durch diese aufzunehmenden Kräfte deutlich reduzieren, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist. Dies würde zu einer effizienteren und wirtschaftlicheren Bauweise führen.

Eine realistische Erfassung der Steifigkeit ist sowohl für den Wind- als auch für den Erdbebenlastfall von zentraler Bedeutung. Wird der Beitrag der Wände mit Fensteröffnungen vernachlässigt, kann dies zu einer erheblichen Unterschätzung der Gebäudesteifigkeit führen. Im Erdbebenfall resultiert daraus eine Überschätzung der massgebenden Grundschwingzeit und damit eine Unterschätzung der Erdbebenkräfte, was die Tragsicherheit beeinträchtigen kann. Im Windlastfall führt dieselbe Unterschätzung zu grösseren horizontalen Verschiebungen und damit zu Überbemessungen, was die Wirtschaftlichkeit reduziert. Diese Aspekte verdeutlichen die Notwendigkeit zur Entwicklung experimentell validierter Bemessungsansätze, welche das tatsächliche Tragverhalten von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen realitätsnah abbilden.

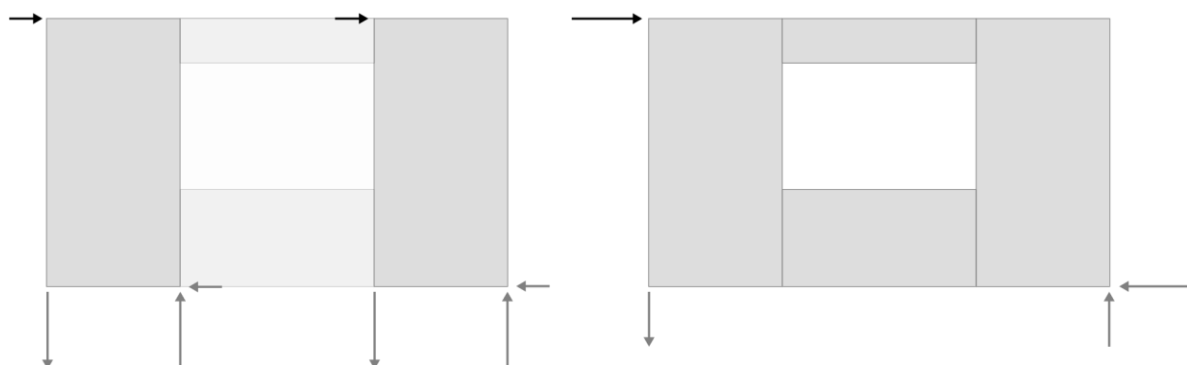


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anzahl der notwendigen Zugverankerungen und der Grösse der Verankerungskräfte bei der Betrachtung nur den Wandsegmenten neben den Fensteröffnungen (links) und bei der Betrachtung der gesamten Wand mit Fensteröffnung (rechts).

2 Ziele und Rahmen des Projekts

2.1 Projektziele

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung eines experimentell validierten Bemessungs- und Modellierungskonzepts für Holzrahmenbauwände mit Fensteröffnungen. Dieses Konzept bildete die Grundlage für eine Bemessungsrichtlinie, welche auch Konstruktionsdetails umfasst, um eine praxisgerechte Anwendung im Ingenieur-Alltag zu ermöglichen.

Es wurden die erforderlichen experimentellen Grundlagen geschaffen und ein numerisches Modell entwickelt. Es wurden mehrere Versuchsreihen an realitätsnahen Prüfkörpern durchgeführt und die Ergebnisse mit einem FE-Modell verglichen, das mit der in der Schweiz verbreitet, angewendeten Software RFEM (Dlubal) erstellt wurde. Das numerische Modell ist in der Lage, das experimentell beobachtete Verhalten der Holzrahmenbauwände abzubilden. Es berücksichtigt realistische Materialparameter, Verbindungsdetails und wurde hinsichtlich Genauigkeit und Grenzen der Anwendung durch den Vergleich mit Versuchsergebnissen überprüft. Weiter wurden die Versuchsergebnisse mit Berechnungen mittels vereinfachten Berechnungsansätzen aus Normen und der Literatur verglichen, um die Eignung der bestehenden Bemessungsverfahren zu bewerten.

Der Fokus lag auf niedrigen bis mittelhohen Gebäuden in Holzrahmenbauweise. In den Versuchen wurden Materialien und Verbindungsmittel verwendet, die der aktuellen Baupraxis in der Schweiz entsprechen, sodass die Ergebnisse direkt in die Ingenieurpraxis übertragbar sind.

2.2 Projektteam

Das Projekt war ein Kooperationsprojekt zwischen dem Departement Architektur, Holzbau und Bau (AHB) der BFH in Biel/Bienne (BE), der Abteilung Ingenieur-Strukturen der Empa in Dübendorf (ZH) und dem Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich. Mit den beiden Wirtschaftspartnern Swiss Timber Engineers STE und Holzbau Schweiz wurde eine breite Verankerung in der Holzbaubranche sichergestellt. Die zusätzliche Unterstützung der Firma Ancotech AG, Dielsdorf (ZH) gewährleistete den Einsatz von optimierten, kosteneffizienten Zugverankerungen. Die Industriepartner wurden während des gesamten Projekts laufend in Workshops über die Projektergebnisse informiert und waren in die Entscheidungen eingebunden. Die Gesamtprojektleitung lag bei Prof. Martin Geiser (BFH-AHB). Stellvertretender Projektleiter war Dr. René Steiger (Empa). Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Doktorarbeit wurde durch Prof. Dr. Andrea Frangi (ETH Zürich) geleitet.

2.3 Arbeitsschritte im Projekt

Das Projekt war in sieben Arbeitspakete (AP) aufgeteilt. Der Zeitplan des Projektes, aufgeteilt nach den sieben Arbeitspaketen, ist in der Abbildung 2 ersichtlich. Die AP umfassten:

- AP 1: Definition und Abgrenzung der zu untersuchenden Parameter.
- AP 2: Experimentelle Ermittlung der Eigenschaften der OSB/3-Platten und der optimalen Beplankungskonfiguration.
- AP 3: Modellierung und experimentelle Untersuchungen an eingeschossigen Wandelementen, um den Kraftfluss in Wänden mit Fensteröffnungen dahingehend zu optimieren, dass alle Segmente der Wandelemente so gut wie möglich aktiviert werden.
- AP 4: Modellierung und experimentelle Untersuchungen an eingeschossigen Wandelementen mit dem Ziel, den Einfluss verschiedener Parameter zu ermitteln (Methode der Kraftflussoptimierung, Verbindungsmittel, Fensteröffnungsgrösse).
- AP 5: Modellierung und experimentelle Untersuchungen an zweigeschossigen Wänden und langen Wandelementen mit je zwei Fensteröffnungen, um den Einfluss der vertikalen Kopplung der Wandelemente und den Einfluss von mehreren Fenstern nebeneinander zu bestimmen.
- AP 6: Untersuchung weiterer relevanter Parameter (Verhaltensbeiwert, Dämpfung) für die Bemessung von Holzrahmenbauten mit Wänden mit bzw. ohne Fensteröffnungen
- AP 7: Verfassen einer Dissertation und eines Leitfadens für die Praxis

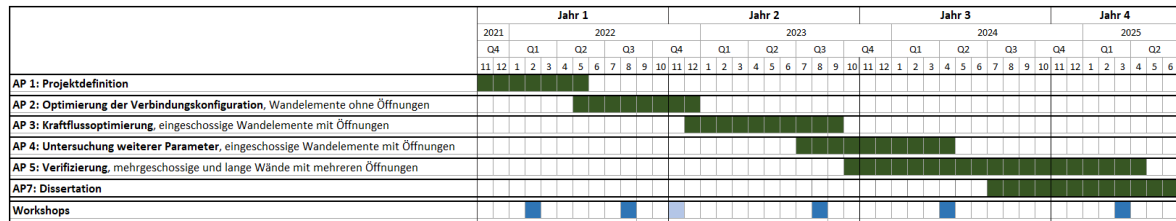


Abbildung 2: Zeitplan des Projekts.

2.4 Begriffe im Zusammenhang mit Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen

In der Abbildung 3 sind die im vorliegenden Bericht verwendeten Begriffe einer Holzrahmenbauwand definiert.

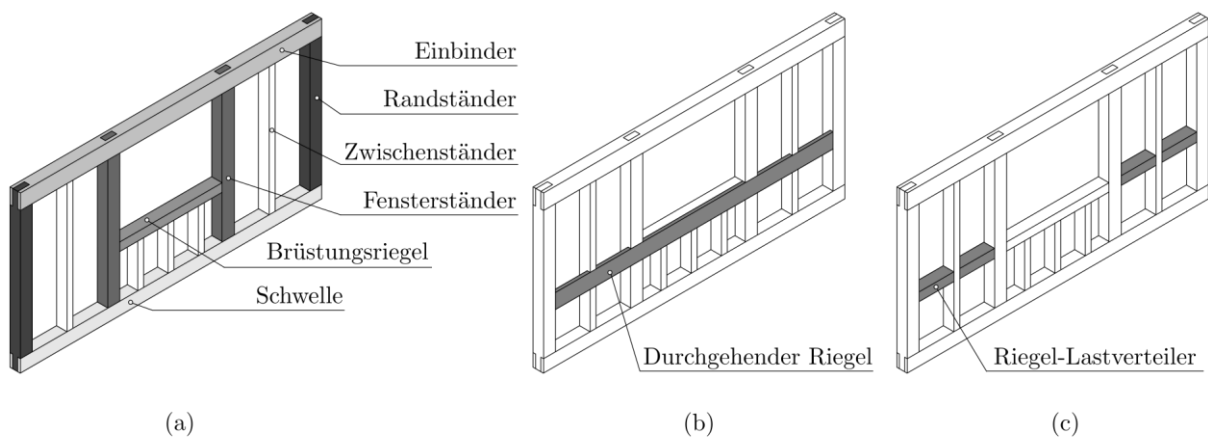


Abbildung 3: Terminologie einer Holzrahmenbau-Wand.

3 Definition der zu untersuchenden Parameter (Arbeitspaket 1)

Das AP 1 wurde von Martin Geiser geleitet. Es umfasste die Einarbeitung in das Thema Holzrahmenbauwände mit Fensteröffnungen sowie die Erhebung und Dokumentation des State-of-the-Art auf Grundlage eines umfassenden Literaturstudiums. Zudem wurden Beispiele von Wänden mit und ohne Fensteröffnungen rechnerisch analysiert und mit Versuchsergebnissen aus der Literatur verglichen. Ziel war es, die für das Projekt relevanten Untersuchungsparameter zu definieren und abzugrenzen, um eine unnötige Vervielfachung der zu prüfenden Wandkonfigurationen zu vermeiden. Auf Basis der früher an der BFH durchgeführten Arbeiten, der Projektvorbereitung und der Diskussionen in den Projektworkshops wurden folgende Rahmenbedingungen für das Projekt festgelegt:

- Die Verbindung zwischen der Beplankung und den Rahmenelementen der Wände erfolgte überwiegend mit Klammern ($1,53 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$). Bei einem kleineren Anteil der Prüfkörper wurden Seismic Nails ($3,10 \times 90 \text{ mm}$) eingesetzt.
- Einer der Schwerpunkte im Projekt wurde auf der Untersuchung möglicher Verstärkungsvarianten von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen gelegt.
- Auf der Grundlage einer an der BFH-AHB durchgeführten Bachelorarbeit [5] wurden drei Fenstergrößen betrachtet:
 - eine Fensteröffnung mittlerer Grösse von etwa $1,00 \text{ m} \times 1,40 \text{ m}$;
 - eine grosse Fensteröffnung von etwa $1,70 \text{ m} \times 1,40 \text{ m}$;
 - eine sehr grosse Fensteröffnung von etwa $3,40 \text{ m} \times 2,00 \text{ m}$.
- Die Erdbebenbemessung erfolgte gemäss dem Konzept des nicht-duktilen Tragwerksverhaltens (Norm SIA 265:2021, Ziffer 4.6 [2]).
- Die Wände wurden einseitig mit 18 mm dicken OSB/3-Platten beplankt.

Die Entscheidung, eine einseitige Beplankung zu wählen, beruhte darauf, dass Wände mit Fensteröffnungen überwiegend als Aussenwände ausgeführt werden. Solche Wände sind aus Feuchttransportgründen in der Regel nur einseitig beplankt. Die Wahl der 18 mm starken Platten basiert auf drei Hauptargumenten:

- Beulen der Beplankung ist nicht massgebend: Gemäss dem EC 5 [6] und gemäss der DIN [3] ist ab 18 mm Plattendicke bei einem Ständerabstand von 625 mm kein Beulnachweis erforderlich – die volle Schubfestigkeit kann somit genutzt werden.
- Robustere Konstruktion: Dickere Platten weisen einen grösseren Widerstand gegen Baustellenbeanspruchungen (z. B. Kranarbeiten, Schläge) auf.
- Höherer Tragwiderstand: Die grössere Dicke und dass Beulen nicht massgebend ist, tragen zur erhöhten Tragfähigkeit bei.

Die OSB/3-Platten wurden pro Wandelement in mehreren Teilen montiert – jeweils eine Platte rechts, eine links sowie eine unterhalb der Fensteröffnung. Da die Fenster bis zum Einbinder reichen, wurde kein Sturzsegment vorgesehen. Ein Wandelement mass 4,40 m in der Breite und 2,54 m in der Höhe. Die Zugverankerung erfolgt ausschliesslich an den Randständern, während die Zwischenstände nicht auf Zug verankert wurden.

Die meisten der tragenden Bauteile bestanden aus in der Schweiz gewachsenem Brettschichtholz aus Fichte (*Picea abies* (L.) H. Karst) der Festigkeitsklasse GL24h (EN 14080:2013 [7]). Nur die Zwischenstände und die Schwellen wurden aus verklebtem Vollholz GL24h (EN 14080:2013) hergestellt. Der Einbinder wurde praxisnah als kombinierter Querschnitt aus Brettschichtholz GL24h und einem Kerto-Q-Schwert als Deckenaufleger ausgeführt.

4 Experimentelle Untersuchungen (Arbeitspakete 2 – 5)

4.1 Arbeitspaket 2: Optimierung der Verbindungsmittelkonfiguration

4.1.1 Inhalt und Ziele

Das AP 2 wurde von Martin Geiser geleitet. Die Versuche wurden an der BFH-AHB in Biel/Bienne durchgeführt. Das Ziel des AP 2 war es, die Klammerverbindung dahingehend zu optimieren, dass eine möglichst starke Verklammerung angewendet werden kann, sodass der Tragwiderstand maximiert und die Steifigkeit optimiert werden kann, ohne dass die OSB/3-Platte versagt. Mit anderen Worten: Man wollte die Leistungsgrenze der OSB/3-Platte in der Anwendung als Beplankung von Holzrahmenbau-Wänden bestimmen. Diese Information wurde benötigt, um die später im Projekt durchzuführenden Versuche an Holzrahmenbau-Wänden mit Fensteröffnungen zu planen und ein vorzeitiges Versagen der OSB/3-Platte ausschliessen zu können.

Es wurden insgesamt 27 Versuche an Wandelementen ohne Fensteröffnungen und mit reduzierten Abmessungen durchgeführt ([8], [9]). Die untersuchten Parameter waren:

- Plattendicke: 12 mm, 15 mm, 18 mm und 25 mm;
- Verbindungsmittel: Klammern und Nägel;
- Geometrie: Rechteckige und quadratische Wandelemente;
- Beplankung: Einseitig oder beidseitig.

Ausserdem wurden Materialversuche an den OSB/3-Platten durchgeführt, um die Eigenschaften der als Beplankung verwendeten Platten experimentell zu ermitteln. Es wurden die Plattendicke gemessen, sowie die Zug- und die Schubfestigkeit in Versuchen bestimmt. Die Schubfestigkeit wurde an Platten mit vier unterschiedlichen Dicken (12 mm, 15 mm, 18 mm und 25 mm) von einem einzigen Hersteller untersucht. Die Zugfestigkeit wurde an Platten mit den identischen vier Dicken jedoch von drei Herstellern untersucht [10]. Zusätzlich wurde an einer Stichprobe die Biegefestigkeit der 15 mm dicken Platte untersucht.

4.1.2 Resultate und Fazit

Die Untersuchungen zeigten, dass die Hersteller dazu neigen, die Plattendicke so zu optimieren, dass die Platten häufig dünner als der Nennwert sind, sich jedoch noch innerhalb der zulässigen Toleranzgrenzen befinden. Die berechneten charakteristischen Werte der Schub- und Zugfestigkeit lagen entweder in der Nähe der in der DIN EN 12369-1:2001 [11] angegebenen Werte oder unterhalb dieser Werte. Die Überprüfung anhand einer kleinen Anzahl von Biegeversuchen (wie sie im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (FPC) durchzuführen sind) zeigte, dass die Biegefestigkeit dieser Platten grösser war als die in der DIN EN 12369-1:2001 festgelegten charakteristischen Werte. Nach den Vorgaben der EN 300:2006 [12] sind die Hersteller im Rahmen der FPC lediglich verpflichtet, die Biegefestigkeit der Platte zu prüfen. Eine Überprüfung der Schub- und Zugfestigkeit ist in den Normen nicht vorgeschrieben. Auf Grundlage der in diesem Projekt durchgeführten Versuchsergebnisse musste davon ausgegangen werden, dass die auf dem Markt erhältlichen OSB/3-Platten in Bezug auf die Schub- und die Zugfestigkeit die in DIN EN 12369-1:2001 angegebenen charakteristischen Werte nicht erreichen.

Die Versuche an den Wandelementen ohne Fensteröffnungen zeigten, dass der Schubtragwiderstand der OSB/3-Beplankung in den getesteten Schubwänden, wie in aktuell gültigen Normen angenommen, geringer ist als die reine Plattenschubfestigkeit, wie sie in den Materialversuchen ermittelt worden war. Die Reduktion entsteht durch zusätzliche Beanspruchungen, die aus der Interaktion von Ständerwerk und Platte resultieren, insbesondere durch den diskontinuierlichen Schubfluss, lokale Verformungsunterschiede, Exzentrizitäten und Kräfte rechtwinklig zu den Plattenrändern. Die Untersuchungen zeigten allerdings, dass die bisher in den Normen [3] verwendeten Reduktionsfaktoren sehr konservativ gewählt sind. Während die Bemessungsregeln in Deutschland Reduktionsfaktoren von etwa 0,33 (einseitig) bzw. 0,50 (beidseitig) ansetzen, lagen die experimentell bestimmten Werte im Bereich von 0,69 bis 0,99, abhängig von Wandgeometrie und Auswertungsmethode. Für einseitig beplankte Wände konnte bestätigt werden, dass der im Entwurf der prEN 1995-1-1:2025 [6] vorgeschlagene Reduktionsfaktor von 0,50 angemessen ist. Für beidseitig beplankte Wände zeigte sich jedoch kein deutlicher Unterschied. Der höhere Faktor von 0,67, der in der Norm vorgesehen ist, konnte experimentell nicht eindeutig bestätigt werden. Unter den getesteten Bedingungen – mit steifem und massivem Holzrahmen – zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen ein- und beidseitiger Beplankung hinsichtlich des effektiven Schubtragwiderstands. Daraus folgt, dass die derzeitigen Ansätze in den Normen tendenziell zu konservativ sind, was zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Tragwiderstands von OSB/3-beplankten Holzrahmenbauwänden führt. Auf Basis der Versuchsergebnisse in diesem Projekt wurde ein Faktor von 0,6 für beide Fälle, ein- und beidseitig beplankte Wände, vorgeschlagen und in der Lignum Dokumentation Erdbebengerechte Holzbauten implementiert. Auch wurde dieser Faktor in den zuständigen Gremien für die Ausarbeitung des neuen EC 5 von der Schweiz vorgeschlagen, jedoch letztlich nicht implementiert. Die Anpassung der Reduktionsfaktoren kann zu wirtschaftlicheren und effizienteren Konstruktionen führen. Für das Ansetzen eines Faktors höher als 0,6 wären weitere Untersuchungen – insbesondere mit unterschiedlichen Rahmensteifigkeiten, Wandöffnungen, zyklischer Belastung und realen Anschlussdetails – erforderlich.

In weiteren Untersuchungen (AP 6) wurden mit theoretischen Daniels-Systemen numerische Untersuchungen durchgeführt, um die unerwarteten Differenzen zwischen ein- und zweiseitiger Beplankung auf Basis der Systemwirkung erklären zu können. Diese numerischen Ergebnisse wurden verwendet, um die erwartete Höchst-Tragkraft von beidseitig beplankten Wandelementen auf der Grundlage der Ergebnisse von Versuchen an einseitig beplankten Wandelementen zu berechnen. Es zeigte sich, dass die Systemwirkung tatsächlich eine Erklärung für die reduzierten Reduktionsfaktoren liefern kann, die in den experimentellen Studien zu FTSW festgestellt wurden. Somit kann der Reduktionsfaktor $k_{p,model}$ allein anhand der Versuche an den einseitig beplankten Wandelementen bestimmt werden. [13]

4.2 Arbeitspaket 3: Entwicklung von Methoden zur Optimierung des Kraftflusses

4.2.1 Inhalt und Ziele

Das AP 3 wurde von Martin Geiser geleitet. Die Versuche wurden an der BFH-AHB in Biel/Bienne durchgeführt. Das Ziel des AP 3 war es, das Gesamttragverhalten von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen zu verbessern, indem verschiedene Methoden zur Optimierung des Kraftflusses untersucht wurden. An einzelnen, eingeschossigen Wandelementen wurde untersucht, inwiefern mit diesen Methoden die einzelnen Wandsegmente der Wandelemente aktiviert werden können.

In den dem vorliegenden Projekt vorangegangenen experimentellen Untersuchungen [14] wurden bei einem Holzrahmenbauelement mit Fensteröffnung unter horizontaler Belastung zwei kritische Bereiche, in denen hohe Spannungen auftreten, identifiziert (Abbildung 4, [14]):

- Ecke der Fensteröffnung auf der Seite der Einleitung der Horizontalkraft: Das Wandsegment neben der Fensteröffnung wird über das Brüstungssegment gebogen, wodurch im angrenzenden Fensterständer hohe lokale Biegespannungen entstehen.
- Ecke der Fensteröffnung auf der Seite, welche der Krafteinleitung gegenüberliegt: Das Wandsegment neben der Fensteröffnung ist unzureichend mit dem Brüstungssegment verbunden, was zur Bildung eines Spalts zwischen diesen beiden Wandbereichen führt.

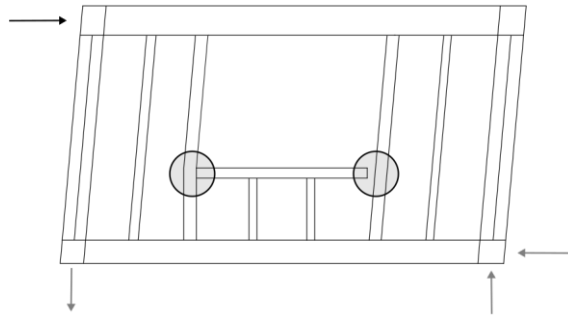


Abbildung 4: Kritische Bereiche mit hohen Spannungen bei Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen, welche durch eine Horizontalkraft am Wandkopf belastet werden.

Die entwickelten Methoden, um den Kraftfluss in den Wandelementen zu optimieren, zielten darauf ab, die lokal grossen Biegespannungen in den Fensterständern zu reduzieren und gleichzeitig die Spaltbildung an den Fensterecken zu verhindern. Im Rahmen der im AP 3 durchgeführten Versuchsreihe wurden die folgenden Konfigurationen experimentell untersucht (Abbildung 5), allesamt mit Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Holzrahmen:

- Referenz-Wandelement (1Sa_L_NoOpt_S): Diese Konfiguration repräsentiert die aktuell in der Praxis gebauten Holzrahmenbau-Wände.
- Wandelement mit einem Riegel-Lastverteiler (1Sa_L_SillBlock_S): Übertragung der Druckkräfte im Bereich des Brüstungsriegels durch Weiterführen des Brüstungsriegels bis auf den Randständer. Das Ständerwerk wurde hierfür auf der Höhe des Brüstungsriegels mit einem Riegel-Lastverteiler ergänzt.
- Wandelement mit einem durchlaufenden Brüstungsriegel (1Sa_L_NoOpt_S): Übertragung der Druck- und Zugkräfte im Bereich des Brüstungsriegels mit einem über die gesamte Breite durchlaufenden Brüstungsriegel. Im Bereich der Ständer wurden der durchlaufende Brüstungsriegel und die Ständer gegengleich ausgeblattet.
- Wandelement mit breiten Fensterständern (1Sa_L_NoOpt_S): Die Fensterständer wurden im Vergleich zum nicht optimierten Wandelement breiter ausgebildet.

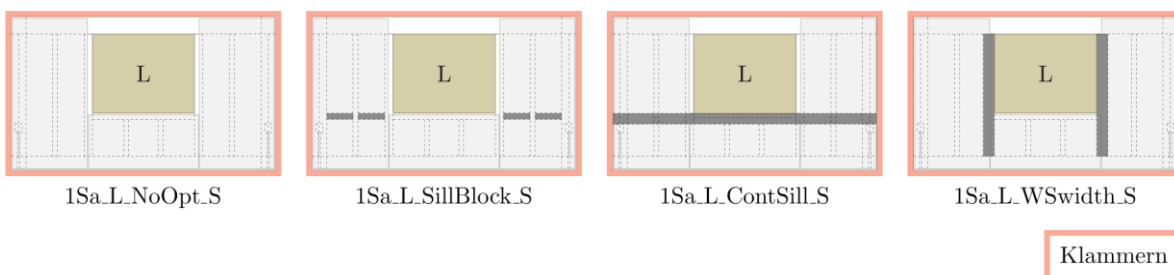


Abbildung 5: Wandelemente, welche im AP 3 experimentell untersucht wurden.

4.2.2 Resultate und Fazit

Die Kraft-Verschiebungskurven aller vier experimentell untersuchten Wandelemente sind in der Abbildung 6 dargestellt. Alle vier Wandelemente zeigten auch über die maximale horizontale Kraft hinaus ein duktiler Verhalten, das durch ein Versagen der Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk ausgezeichnet war, bevor sich sekundäre spröde Versagensmechanismen wie ein Biegeversagen des Einbinders oder des Randständers oberhalb der Zugverankerung einstellten.

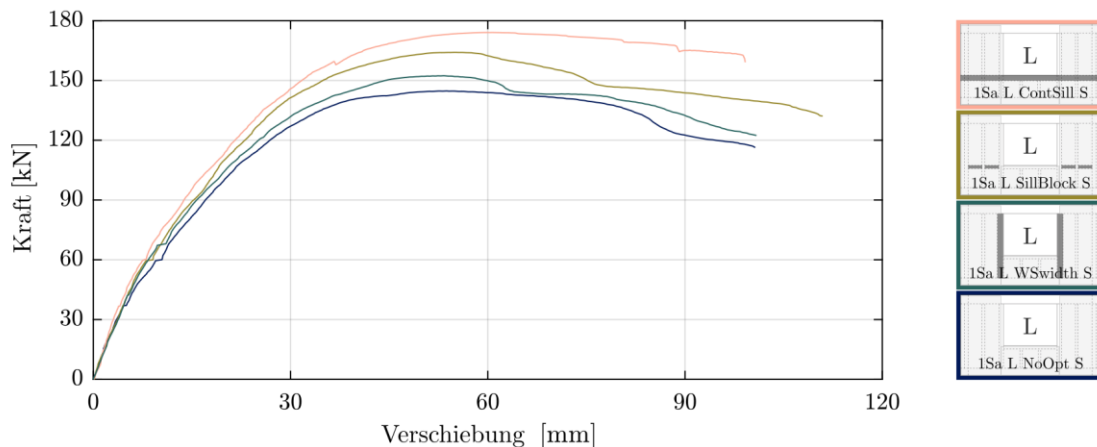


Abbildung 6: Kraft-Verschiebungskurven (Horizontale Kraft versus horizontale Verschiebung am Wandkopf) der vier im AP 3 untersuchten Wandelemente.

Das Ziel, dass alle Wandsegmente wirksam zur Gesamtsteifigkeit und zum horizontalen Tragwiderstand beitragen, wurde am besten durch die Konfiguration mit durchlaufendem Brüstungsriegel erreicht, gefolgt von der Variante mit zusätzlichen Riegel-Lastverteilern. Das Ziel, die grossen lokalen Biegespannungen in den Fensterständern zu reduzieren, konnte mit allen drei Optimierungsmethoden erreicht werden. Darüber hinaus konnte bei der Konfiguration mit durchlaufendem Brüstungsriegel die Spaltbildung an der Ecke der Fensteröffnung zwischen Brüstungsriegel und angrenzendem Wandsegment erfolgreich verhindert werden.

Die beiden Methoden zur Optimierung des Kraftflusses – Riegel-Lastverteiler und durchlaufender Brüstungsriegel – führten zu einer deutlichen Erhöhung sowohl der maximalen horizontalen Kraft als auch der Steifigkeit. Das Wandelement mit durchlaufendem Brüstungsriegel erzielte die höchsten Werte was die horizontale Kraft, die Steifigkeit und insbesondere die Kraft bei einer Wandkopfauslenkung von 5 mm betrifft. Letzteres entspricht dem Verformungsgrenzwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) gemäss Norm SIA 261:2020 [4]. Eine Vergrösserung der Fensterständerbite hatte zwar ebenfalls einen positiven Einfluss auf die maximale horizontale Kraft und Steifigkeit, doch war die Verbesserung deutlich geringer als bei den beiden anderen Optimierungsmethoden. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse der Versuche an den Wandelementen mit Riegel-Lastverteiler und durchlaufendem Brüstungsriegel wurden beide Konfigurationen für die weiterführenden Untersuchungen in den folgenden Projektphasen ausgewählt. Obwohl die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Versuchsergebnisse eine ausschliessliche Fokussierung auf die Variante mit durchlaufendem Brüstungsriegel gerechtfertigt hätten, wurde die Methode mit Riegel-Lastverteiler beibehalten, da sie nach Einschätzung der Projektpartner Vorteile in der Vorfertigung und Montage bietet.

Die Industriepartner betonten wiederholt die Vorteile der einfachen Integrierbarkeit der Riegel-Lastverteiler in bestehende Produktionsprozesse. Diese Methode erlaubt es, die Hauptrahmenelemente – Einbinder, Schwelle, Fenster- und Randstände – zu montieren und die Zwischenstände und Riegel-Lastverteiler problemlos dazwischen einzusetzen. Allerdings wies der Holzbauer, der die Prüfkörper für die Versuche im AP 3 herstellte, darauf hin, dass der durchlaufende Brüstungsriegel in der Praxis sogar einfacher zu montieren sei. Diese Diskrepanz in der Bewertung der beiden Verstärkungsmethoden bezüglich Praxistauglichkeit zeigt, dass die bevorzugte Methode stark von den jeweiligen Produktionsbedingungen abhängt. Daher blieben sowohl der durchlaufende Brüstungsriegel als auch die Riegel-Lastverteiler im weiteren Verlauf der Untersuchungen im Fokus.

4.3 Arbeitspaket 4: Weitere Untersuchungen an einzelnen, eingeschossigen Wandelementen

4.3.1 Inhalt und Ziele

Das AP 4 wurde von René Steiger geleitet. Die Versuche wurden an der BFH-AHB in Biel/Bienne durchgeführt. Gemäss Projektantrag sollte im AP 4 die auf den Vorprojekten der BFH-AHB ([15], [16]) und den Arbeitspaketen 1 – 3 basierende Bemessungsmethode mittels weiterer numerischer und experimenteller Untersuchungen optimiert werden. Die beiden im AP 3 entwickelten Varianten zur Optimierung des Kraftflusses – ein durchlaufender Brüstungsriegel und Riegel-Lastverteiler – wurden im AP 4 weiter untersucht. Diese zweite Versuchsreihe an einzelnen, eingeschossigen Wandelementen mit Fensteröffnungen verfolgte drei Hauptziele. Das erste Ziel bestand darin, die Konstruktionsdetails so anzupassen, dass sie der aktuellen Praxis im Schweizer Holzrahmenbau entsprechen. Diese Details wurden in enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern entwickelt. Dabei wurden sowohl die Wandelemente selbst als auch der Versuchsaufbau angepasst. Die wichtigsten Anpassungen an den Wandelementen für die Versuche im AP 4 umfassten:

- Die Zugverankerungen wurden innerhalb der Randständer positioniert, was Bohrungen auf der jeweiligen Höhe erforderte. Bei einem durchlaufenden Brüstungsriegel, der sich über die gesamte Länge des Wandelements erstreckte, war die Höhe der Verankerung direkt an die Position dieses Riegels gekoppelt. Um diese Abhängigkeit zu eliminieren, wurde der Brüstungsriegel verkürzt, sodass er nur noch zwischen den inneren Kanten der Randständer verlief. Auf diese Weise konnte die Höhe der Fensteröffnung von der Höhe der Zugverankerung entkoppelt werden.
- Der Querschnitt des Einbinders wurde so angepasst, dass dieser direkt als Auflager für ein Deckenelement dienen kann.
- Bei allen Wandelementen mit Riegel-Lastverteilern wurden der Brüstungsriegel und die Aussteifungselemente zusätzlich mittels Paaren gekreuzter Vollgewindeschrauben mit den Fensterständern verbunden. Dadurch kann die Verbindung nicht nur Druckkräfte, sondern auch Zugkräfte übertragen.
- Die Fensterständer wurden mittels Zapfenverbindungen mit dem Einbinder und der Schwelle verbunden, anstelle der zuvor im AP 3 verwendeten eingepassten Verbindungen. Durch diese Änderung kann die Einleitung von Druckkräften rechtwinklig zur Faserrichtung im Einbinder und der Schwelle vermieden werden.
- Die Schubverankerungen wurden nicht mehr ausschliesslich an den Enden der Wandelemente, sondern über deren gesamte Länge verteilt angeordnet. Dazu wurden drei Schubwinkel an die Schwelle montiert und mit dem Prüfrahm verbunden.

Das zweite Ziel der Versuchsreihe im AP 4 bestand darin, verschiedene Konfigurationen von Wandelementen zu untersuchen, um einen umfassenderen Vergleich mit dem numerischen Modell zu ermöglichen. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung des Einflusses der folgenden Parameter auf das Tragverhalten von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen:

- 2 im AP 3 ermittelte "beste" Methoden zur Optimierung des Kraftflusses:
 - Durchlaufender Brüstungsriegel;
 - Gekreuzt verschraubte Riegel-Lastverteiler;
- Grösse der Fensteröffnung (nachfolgend als M-, L- und XL-Fensteröffnungen bezeichnet):
 - M-Fensteröffnung: 1,04 m (Breite) × 1,24 m (Höhe);
 - L-Fensteröffnung: 1,70 m (Breite) × 1,24 m (Höhe) – durchschnittliche Fensteröffnungsgrösse gemäss der Erhebung von Attenhofer (2022) [5];
 - XL-Fensteröffnung: 2,46 m (Breite) × 1,44 m (Höhe);
- Art der Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk:
 - Klammern (S);
 - Seismic Nails (N).

Die gewählten Fensteröffnungsgrössen decken den Bereich der in der Schweiz in Holzbauten aktuell ausgeführten Fensteröffnungen ab, wie in Attenhofer (2022) [5] dokumentiert. Die Höhe der Fensteröffnungen wurde im Vergleich zu den Wandelementen im AP 3 aufgrund des veränderten Querschnitts des oberen Riegels reduziert. Eine vollständige Versuchsmatrix auf Basis dieser Parameter hätte zwölf zu untersuchende Konfigurationen ergeben: sechs mit Klammern (Abbildung 7) und sechs mit Seismic Nails als Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk. Damit wäre ein umfassender Vergleich aller Kombinationen der Optimierungsmethoden, Fenstergrössen

und Verbindungstypen möglich gewesen. Auf Grund der im Projekt zur Verfügung stehenden limitierten Anzahl an Prüfkörpern, konnten nicht alle zwölf Varianten experimentell untersucht werden. In Absprache mit den Industriepartnern wurde der Schwerpunkt auf die Wandelemente mit Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk gelegt. Da mehrere Konstruktionsdetails zwischen dem AP 3 und dem AP 4 angepasst wurden, wurde die L-Fensteröffnung erneut mit beiden Methoden zur Optimierung des Kraftflusses untersucht. Basierend auf den Ergebnissen der Versuche im AP 3 wurde die XL-Fensteröffnung in Kombination mit dem durchlaufenden Brüstungsriegel geprüft, da diese Methode zuvor die grössten Verbesserungen des Tragwiderstands und der Steifigkeit gezeigt hatte und daher als besonders geeignet für grössere Fensteröffnungen galt. Die M-Fensteröffnung wurde hingegen in Kombination mit den gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern untersucht. Da die Industriepartner die Riegel-Lastverteiler gegenüber dem durchlaufenden Brüstungsriegel bevorzugten, wurde der Vergleich zwischen Klammern und Seismic Nails an der Wandkonfiguration mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern und L-Fensteröffnung durchgeführt.

Die folgenden fünf nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten bemessenen Konfigurationen von Wandelementen wurden im AP 4 experimentell untersucht (Abbildung 7):

- Konfiguration 1Sb_M_ScrSillBlock_S: Wandelement mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, M-Fensteröffnung und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration 1Sb_L_ScrSillBlock_S: Wandelement mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, L-Fensteröffnung und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration 1Sb_L_ContSill_S: Wandelement mit durchlaufendem Brüstungsriegel, L-Fensteröffnung und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration 1Sb_XL_ContSill_S: Wandelement mit durchlaufendem Brüstungsriegel, XL-Fensteröffnung und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration 1Sb_L_ScrSillBlock_N: Wandelement mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, L-Fensteröffnung und Seismic Nails als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk.

Das dritte Ziel war es, zu untersuchen, ob für ein nach dem duktilen Tragwerksverhalten bemessenes Tragwerk Holzrahmenbauwände mit und ohne Fensteröffnungen kombiniert werden können. Dazu wurden zwei duktil bemessene Wandelemente, eine mit Fensteröffnung und eine ohne Fensteröffnung zyklisch untersucht. Für beide Wandelemente wurden Seismic Nails als Verbindungsmittel verwendet. Das Wandelement mit Fensteröffnung hatte die gleiche Geometrie, wie das nicht duktil bemessene Wandelement mit den Seismic Nails (1Sb_L_ScrSillBlock_N). Die Geometrie des Wandelements ohne Fensteröffnung richtete sich ebenfalls nach diesem Wandelement. Die Hauptabmessungen und die Positionen der Ständer wurden übernommen und auch die OSB/3-Platten wurden in drei Teilen angebracht, wobei die Stösse auf der Höhe der Fensterständer des Wandelements mit Fensteröffnung angeordnet wurden.

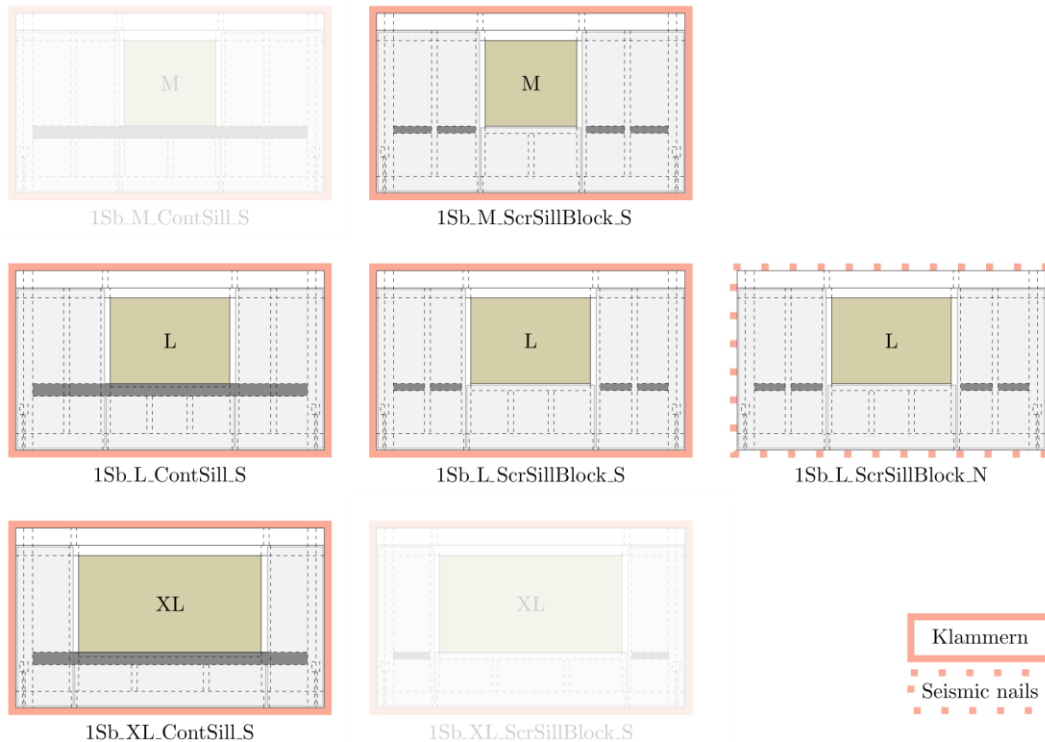


Abbildung 7: Wandelemente, welche im AP 4 experimentell untersucht wurden.

4.3.2 Resultate und Fazit

Versuche an nicht-duktile bemessenen Wandelementen

Die Kraft-Verschiebungskurven aller fünf experimentell untersuchten nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten bemessenen Wandelemente sind in der Abbildung 8 dargestellt. Die Ergebnisse der Versuche zeigten, dass das Wandelement, bei welchem die Riegel-Lastverteiler mit paarweise gekreuzt angeordneten Vollgewindeschrauben mit den Fensterständern verbunden wurden, einen vergleichbaren Tragwiderstand erreichte, wie die Konfiguration mit durchlaufendem Brüstungsriegel. Wie bereits im AP 3 beobachtet worden war, wies das Wandelement mit dem durchgehenden Brüstungsriegel jedoch eine höhere Steifigkeit auf als dasjenige mit den gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern. Alle untersuchten Wandelemente zeigten ein duktilen Versagen in den Verbindungen zwischen der Beplankung und dem Ständerwerk. Spröde Versagensmechanismen traten erst nach Erreichen der maximalen horizontalen Kraft auf. Sekundäre spröde Versagen im Ständerwerk wurden typischerweise bei Konfigurationen mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern und kleineren Fensteröffnungen beobachtet. Im Gegensatz dazu kam es bei Konfigurationen mit grösseren Fensteröffnungen und durchlaufendem Brüstungsriegel zu einem Versagen der OSB/3-Platten. Die Art der Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk hatte einen deutlichen Einfluss auf das Tragverhalten. Die Wandelemente mit geklammerten Verbindungen zeigten ein steiferes Verhalten als solche mit Seismic Nails. Der Unterschied im Verhalten der Wände mit unterschiedlichen Verbindungsmitteln ist direkt auf das Kraft-Verschiebungsverhalten des einzelnen Verbindungsmittel zurückzuführen. Die Seismic Nails verhalten sich deutlich weicher als die Klammern, wenn man die beiden Verbindungsmittel auf den gleichen Bemessungswert des Tragwiderstands normiert.

Der Vergleich zwischen dem AP 3 und dem AP 4 zeigte, dass sowohl der durchlaufende Brüstungsriegel als auch die gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteiler den horizontalen Tragwiderstand verbesserten. Die Steigerung in der Steifigkeit war jedoch deutlich ausgeprägter. Besonders das Wandelement mit den gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern zeigte einen grösseren Anstieg der Steifigkeit als jenes mit dem durchlaufenden Brüstungsriegel. Dies verdeutlicht, dass die Anpassung durch das Anbringen von gekreuzten Schraubenpaaren die Wirksamkeit dieser Methode zur Optimierung des Kraftflusses erheblich verbesserte. Darüber hinaus hebt der Vergleich der beiden Versuchsreihen den Einfluss der konstruktiven Detailausbildung auf sowohl den Tragwiderstand als

auch die Steifigkeit hervor. Dies unterstreicht die Bedeutung klar definierter Konstruktionsrichtlinien für die Detailgestaltung von Wänden mit Fensteröffnungen in der Ingenieurpraxis.

Trotz der geringeren Steifigkeit verglichen mit dem Wandelement mit durchlaufendem Riegel wurde die Verstärkungsmethode mit den gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern von den Industriepartnern weiterhin bevorzugt, da sie eine einfachere Umsetzung bei der Montage versprach. Aus diesem Grund wurden beide Methoden – der durchlaufende Brüstungsriegel und die gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteiler – für die weiterführenden Untersuchungen in den im Projekt folgenden Versuchsreihen beibehalten.

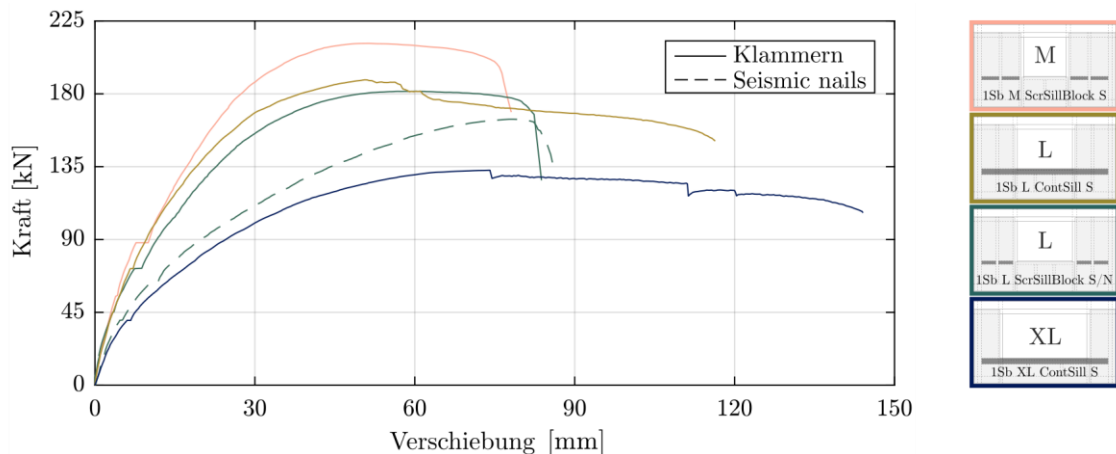


Abbildung 8: Kraft-Verschiebungskurven (Horizontalkraft versus horizontale Verschiebung am Wandkopf) der vier im AP 4 untersuchten Wandelemente.

Versuche an duktil bemessenen Wandelementen

Auch die zwei untersuchten nach dem duktilen Tragwerksverhalten bemessenen Wandelemente zeigten ein duktilen Versagen in der Verbindung zwischen Ständerwerk und Beplankung. Im Vergleich mit den nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten bemessenen Wandelementen wurden nur kleine Unterschiede festgestellt, was die Fließverschiebung und Grenzverschiebung betrifft. Aus den Versuchen im AP 4 konnte das Fazit gezogen werden, dass für das Aussteifungssystem eines duktil bemessenen Tragwerks Holzrahmenbauwände mit und ohne Fensteröffnungen kombiniert werden können. Weitere Untersuchungen in Form von zyklischen Versuchen an Wandelementen waren im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht geplant.

4.4 Arbeitspaket 5: Zweigeschossige Wände und lange, eingeschossige Wandelemente

4.4.1 Inhalt und Ziele des Arbeitspakets

Gemäss Forschungsantrag sollten im AP 5 auf Basis der Erkenntnisse aus allen vorangehenden Arbeitspaketen, jedoch insbesondere aus dem AP 4, experimentelle Grundlagen für letzte Optimierungen bei der Modellierung geschaffen werden. Den Kern des AP 5 bildete die erweiterte experimentelle Überprüfung der Verformungen und Schnittgrößen aufgrund von Versuchen an zweigeschossigen Wänden mit je einer Fensteröffnung pro Geschoss, sowie an langen, eingeschossigen Wandelementen mit zwei Fensteröffnungen nebeneinander.

4.4.2 Inhalt und Ziele der Versuche an den zweigeschossigen Wänden

Das Hauptziel der Versuche an zweigeschossigen Wänden bestand darin, zu überprüfen, ob das numerische Modell das Verhalten vertikal gekoppelter Wandelemente realitätsnah abbilden kann. Insgesamt wurden drei Prüfkörper untersucht, um die Genauigkeit des FE-Modells für den zweigeschossigen Fall zu bewerten. Die Ergebnisse des AP 3 hatten gezeigt, dass die Wandelemente, welche mit kreuzverschraubten Riegel-Lastverteilern ausgeführt wurden ein vergleichbares Verhalten aufwiesen wie die Wandelemente mit einem durchlaufenden Brüstungsrie-

gel. Daher wurde im AP 5 die Leistungsfähigkeit der gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteiler und des durchlaufenden Brüstungsriegels in Kombination mit einer XL-Fensteröffnung untersucht und die beiden Methoden zur Optimierung des Kraftflusses wurden miteinander verglichen. Zusätzlich wurde eine Konfiguration mit einer L-Fensteröffnung in Kombination mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern in das Versuchsprogramm aufgenommen. Es wurden die folgenden drei zweigeschossigen Wandkonfigurationen untersucht (Abbildung 9):

- Konfiguration 2S_L_ScrSillBlock_S: Zweigeschossige Wand mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, L-Fensteröffnung und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration 2S_XL_ScrSillBlock_S: Zweigeschossige Wand mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, XL-Fensteröffnung und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration 2S_XL_ContSill_S: Zweigeschossige Wand mit durchlaufendem Brüstungsriegel, XL-Fensteröffnung und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk.

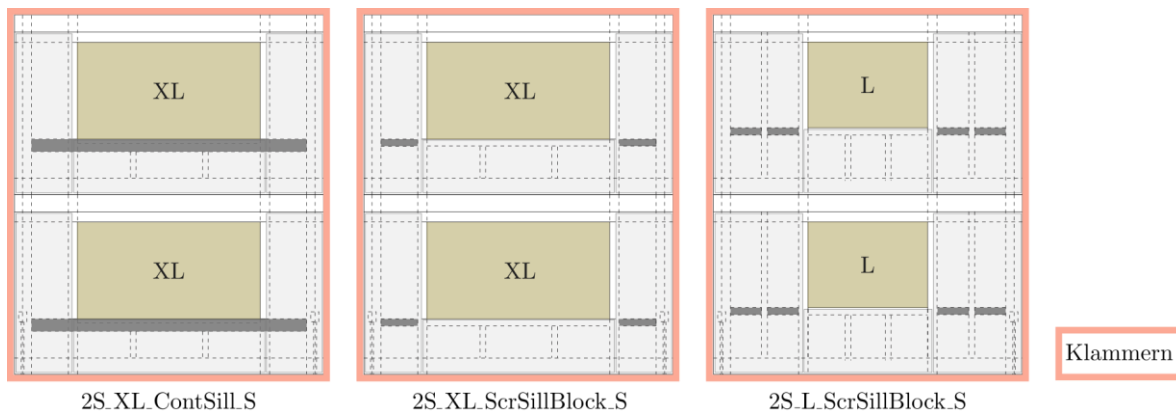


Abbildung 9: Konfigurationen von zweigeschossigen Wänden, welche im AP 5 experimentell untersucht wurden.

4.4.3 Resultate und Fazit der Versuche an den zweigeschossigen Wänden

Die Kraft-Verschiebungskurven aller drei experimentell untersuchten zweigeschossigen Wände sind in der Abbildung 10 dargestellt. Bei den Wänden mit XL-Fensteröffnungen zeigten beide Methoden zur Optimierung des Kraftflusses vergleichbare maximale horizontale Tragwiderstände und Steifigkeiten. Wie in allen Versuchen in den AP 3 und 4, versagten die Wände duktil in der Verbindung zwischen Ständerwerk und Beplankung. Bei den Wänden mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern wurde ein sekundäres Versagen in Teilen des Ständerwerks beobachtet (Versagen A in der Abbildung 10), während die Wand mit durchlaufendem Brüstungsriegel und XL-Fensteröffnung ein sekundäres Versagen der Beplankung zeigte, was auf lokal erhöhte Spannungen in den OSB/3-Platten hinweist (Versagen B in der Abbildung 10). Diese Ergebnisse stimmen mit den Beobachtungen aus der Versuchsreihe 2 (AP 4) überein. Die Konfiguration mit durchlaufendem Brüstungsriegel führt zu höheren Spannungskonzentrationen in der Beplankung als die Variante mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die Anwendbarkeit beider Methoden zur Optimierung des Kraftflusses nicht nur bei eingeschossigen, sondern auch bei zweigeschossigen Holzrahmenbauwänden.

Ein direkter Vergleich zwischen den untersuchten zweigeschossigen Wänden und den entsprechenden eingeschossigen Wandelementen lieferte zusätzliche Erkenntnisse zum Einfluss der vertikalen Kopplung auf das Tragverhalten von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen. Während die maximale horizontale Kraft nahezu unverändert blieb – was darauf hindeutet, dass das Versagen primär durch die Schubtragfähigkeit der Wandelemente bestimmt wird – zeigte sich bei den zweigeschossigen Wänden eine deutliche Reduktion der Steifigkeit. Die Kraft, die erforderlich war, um eine Wandkopfauslenkung von $h/500$ zu erreichen, betrug nur etwa 50 % der gemessenen Kraft im entsprechenden Versuch am eingeschossigen Wandelement. Diese Reduktion weist auf ein kombiniertes, schub- und momentabhängiges Tragverhalten hinsichtlich der Steifigkeit hin. Die geringere Steifigkeit der zweigeschossigen Wände im Vergleich zu den eingeschossigen Wandelementen ist unter anderem abhängig von der Nachgiebigkeit des Geschossüberganges. Allfälliger Schlupf in dieser Verbindung kann die Steifigkeit stark verringern.

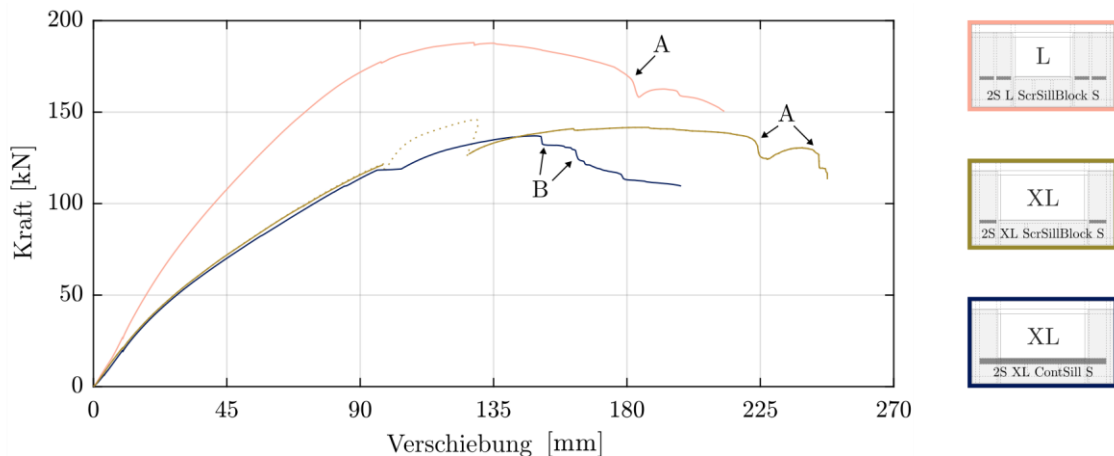


Abbildung 10: Kraft-Verschiebungskurven (Horizontalkraft versus horizontale Verschiebung am Wandkopf) der drei im AP 5 untersuchten zweigeschossigen Wände. A: Sekundäres Versagen in einem der Ständer und B: Sekundäres Versagen in der OSB/3-Platte.

4.4.4 Inhalt und Ziele der Versuche an langen eingeschossigen Wandelementen

Das Hauptziel der Versuche an den langen, eingeschossigen Wandelementen bestand darin zu überprüfen, ob das FE-Modell das Tragverhalten von Wandelementen mit mehreren Fensteröffnungen nebeneinander realitätsnah abbilden kann. Wie bei den einzelnen, eingeschossigen Wandelementen, welche in den vorangegangenen Versuchsserien untersucht worden waren, wurden auch hier die Zugverankerungen nur an den Wandenden angebracht. Aufgrund der zwei Fensteröffnungen und der erhöhten Gesamtlänge der Wandelemente unterscheiden sich jedoch die Randbedingungen wesentlich von denjenigen bei den Wandelementen mit nur einer Fensteröffnung.

Wie bei den Versuchen an den zweigeschossigen Wänden, wurden die beiden Methoden zur Optimierung des Kraftflusses in Kombination mit den XL-Fensteröffnungen untersucht. Darüber hinaus wurden drei verschiedene Fensteröffnungsgrößen sowie zwei Arten der Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk untersucht. Ziel war es, den Einfluss von zwei benachbarten Fensteröffnungen auf das Tragverhalten in Abhängigkeit von der Größe der Fensteröffnung und der Arten der Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk zu ermitteln. Da die Industriepartner die Verstärkungsmethode mit den gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern weiterhin bevorzugten – aufgrund ihrer vermeintlich einfacheren Integration in den Fertigungsprozess – wurden die Parameter Fensteröffnungsgröße und Arten der Verbindungsmittel an dieser Konfiguration untersucht. Die folgenden fünf Konfigurationen von Wandelementen wurden experimentell geprüft (Abbildung 11):

- Konfiguration Long_M_ScrSillBlock_S: Langes, eingeschossiges Wandelement mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, M-Fensteröffnungen und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration Long_L_ScrSillBlock_S: Langes, eingeschossiges Wandelement mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, L-Fensteröffnungen und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration Long_XL_ScrSillBlock_S: Langes, eingeschossiges Wandelement mit gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern, XL-Fensteröffnungen und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration Long_XL_ContSill_S: Langes, eingeschossiges Wandelement mit durchlaufendem Brüstungsriegel, XL-Fensteröffnungen und Klammern als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk;
- Konfiguration Long_L_ScrSillBlock_N: Langes, eingeschossiges Wandelement mit verschraubten Riegel-Lastverteilern, L-Fensteröffnungen und Seismic Nails als Verbindungsmittel zwischen Beplankung und Ständerwerk.

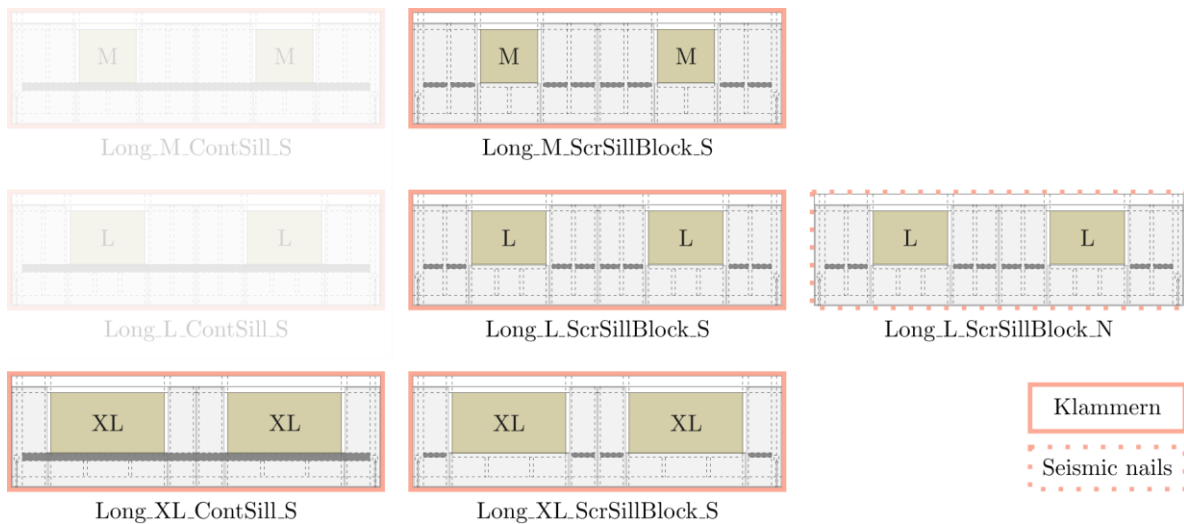


Abbildung 11: Konfigurationen mit langen, eingeschossigen Wandelementen, welche im AP 5 experimentell untersucht wurden.

4.4.5 Resultate und Fazit der Versuche an den langen, eingeschossigen Wandelementen

Die Kraft-Verschiebungskurven aller fünf experimentell untersuchten Wandelemente sind in der Abbildung 12 dargestellt. Alle Prüfkörper zeigten duktilen Versagen, wobei das Versagen in der Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk einsetzte, bevor sekundäre spröde Versagensmechanismen in der Beplankung oder in Teilen des Ständerwerks auftraten. Wie erwartet, wiesen die Wandelemente mit kleineren Fensteröffnungen einen höheren horizontalen Tragwiderstand und eine höhere Steifigkeit auf. Diese Konfigurationen zeigten durchweg spröde sekundäre Versagensmechanismen in Teilen des Ständerwerks (Versagen A in der Abbildung 12). Im Gegensatz dazu trat bei den Konfigurationen mit XL-Fensteröffnungen Versagen in den Beplankungsplatten auf (Versagen B in der Abbildung 12) – unabhängig von der verwendeten Methode zur Optimierung des Kraftflusses (durchlaufender Brüstungsriegel oder gekreuzt verschraubte Riegel-Lastverteiler). Die Leistungsfähigkeit der Verstärkungsmethode mit den gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern erwies sich als vergleichbar mit dem durchlaufenden Brüstungsriegel, was den Beobachtungen aus den vorangehenden Versuchsreihen entspricht. Die Art der Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk hatte einen deutlichen Einfluss auf das Tragverhalten. Die Wandelemente mit den geklammerten Verbindungen zwischen Beplankung und Ständerwerk zeigten ein steiferes Verhalten als jene mit Seismic Nails, womit die Ergebnisse aus dem AP 4 bestätigt wurden.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus dem AP 3 mit den Versuchen an den langen eingeschossigen Wandelementen im AP 5 zeigte, dass der horizontale Tragwiderstand der langen Wandelemente etwa doppelt so hoch war wie derjenige der einzelnen Wandelemente. Für die Konfiguration mit M-Fensteröffnungen lag die Steigerung leicht über dem Faktor 2, während sie für die XL-Fensteröffnung etwas darunter lag. Ein ähnlicher Trend zeigte sich bei der Steifigkeit, die anhand der Kraft bei einer Wandkopfauslenkung von 5 mm ($h/500$) verglichen wurde. Die Steifigkeit der langen, eingeschossigen Wandelemente lag im Bereich des 1,5- bis 1,9-Fachen derjenigen der entsprechenden einzelnen Wandelemente. Auch hier zeigten die Elemente mit M-Fensteröffnungen die grösste Steigerung, während bei Konfigurationen mit grösseren Fensteröffnungen die Steifigkeitssteigerung geringer ausfiel.

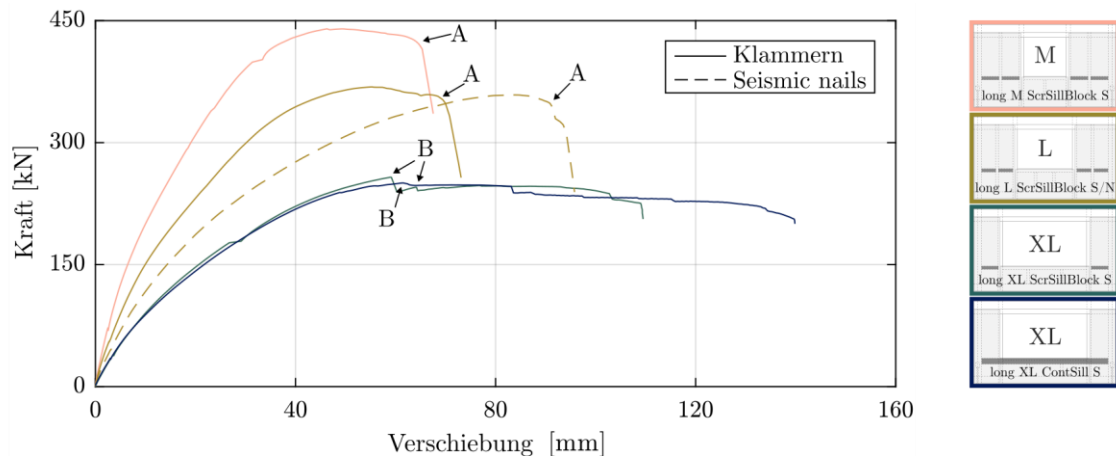


Abbildung 12: Kraft-Verschiebungskurven (Horizontalkraft versus horizontale Verschiebung am Wandkopf) der fünf im AP 5 untersuchten langen, eingeschossigen Wandelemente. A: Sekundäres Versagen in einem der Ständer und B: Sekundäres Versagen in der OSB/3-Platte.

4.5 Fazit der experimentellen Untersuchungen in den Arbeitspaketen 3 bis 5

Basierend auf den Ergebnissen der Versuche in den AP 3 bis 5 lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen zum Tragverhalten von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen ziehen:

- Beide Methoden zur Optimierung des Kraftflusses – gekreuzt verschraubte Riegel-Lastverteiler und durchlaufende Brüstungsriegel – führten im Vergleich zu konventionell ausgeführten Wandelementen mit Fensteröffnungen zu einer erhöhten Steifigkeit und einem grösseren horizontalen Tragwiderstand. Während der Tragwiderstand für beide Verstärkungsmethoden weitgehend vergleichbar ist, wiesen die Wandelemente und Wände mit durchlaufendem Brüstungsriegel eine etwas höhere Steifigkeit auf als diejenige, welche mit gekreuzt verschraubte Riegel-Lastverteilern verstärkt worden war.
- Die Grösse der Fensteröffnung hat einen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen. Grössere Fensteröffnungen führen durchgängig zu einer reduzierten Steifigkeit und einem geringeren Tragwiderstand.
- Die Art der Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk spielt eine entscheidende Rolle für die Steifigkeit der Wand. Wandelemente mit Klammern als Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk zeigten in allen Versuchsreihen ein deutlich steiferes Verhalten als jene mit Seismic Nails.
- Alle untersuchten Wandkonfigurationen versagten duktil in der Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk. Spröde Versagensmechanismen traten erst nach Erreichen der maximalen horizontalen Kräfte auf. Diese sekundären spröden Versagensmechanismen variierten je nach Wandkonfiguration: Steifere Konfigurationen mit kleineren Fensteröffnungen und gekreuzt verschraubten Riegel-Lastverteilern neigten zu einem Versagen in Teilen des Ständerwerks, während Konfigurationen mit grösseren Fensteröffnungen und durchlaufendem Brüstungsriegel eher zu einem Versagen in den OSB/3-Beplankungsplatten tendierten.

5 Numerische Untersuchungen zu den Versuchen in den Arbeitspaketen 3 bis 5

5.1 Inhalt und Ziele

Eines der Projektziele bestand darin, ein FE-Modell für die möglichst zuverlässige Vorhersage des Kraft-Verschiebungs-Verhaltens von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen zu entwickeln und anhand der Versuchsdaten aus den Versuchen an den Wandelementen und den Wänden zu verifizieren und zu kalibrieren. Das Modell soll eine Extrapolation auf verschiedene Geometrien (Grössen und Positionen der Fensteröffnungen sowie Wandabmessungen) ermöglichen und als Entwurfswerkzeug für Ingenieur Anwendungen dienen. Die Modellierung erfolgte in RFEM (Dlubal), einem in der Schweizer Holzbau-Praxis weit verwendeten Statik-Programm. Zur Bewertung der Modellgenauigkeit wurden die Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) und der Steifigkeit (GZG) mit Versuchsergebnissen verglichen. Die Steifigkeit wurde anhand der Kraft bei einer Wandverformung von $h/500$ gemäss Norm SIA 261:2020 [4] beurteilt. Die folgenden Kriterien zur Bewertung der Genauigkeit wurden angewendet:

- Tragwiderstand: Abweichung $\leq \pm 10 \%$;
- Steifigkeit: Abweichung $\leq \pm 20 \%$.

Sich in den Wänden und Wandelementen aus den Einwirkungen ergebende innere Kräfte wurden nicht direkt mit den Experimenten verglichen, da diese Kräfte in den Versuchen nicht gemessen werden konnten. Die Schnittkräfte im Modell wurden durch die Kontrolle ihrer Übereinstimmung mit den Kräften im globalen Tragwerks-Verhalten (Kräftegleichgewicht) plausibilisiert. Es wurde angenommen, dass, wenn die Vorhersage des FE-Modells innerhalb der definierten Genauigkeitsgrenzen liegt, das Modell auch auf andere Wandkonfigurationen übertragen werden kann.

5.2 Resultate und Fazit

Die numerischen Berechnungen mit dem in RFEM entwickelten FE-Modell zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen hinsichtlich des Tragwiderstands aller untersuchten Wandkonfigurationen mit einer Abweichung von weniger als 10 %, sodass dieses für die Modellierung gesetzte Ziel als erreicht betrachtet werden kann. Die Ergebnisse sind in der Grafik links in der Abbildung 13 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst. Die Genauigkeit bei der Vorhersage der Steifigkeit (Grafik rechts in der Abbildung 13 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) war jedoch deutlich geringer. Während das Ziel einer Abweichung von weniger als 20 % für alle eingeschossigen Wandelemente erreicht wurde, waren die Abweichungen bei den zweigeschossigen Wandkonfigurationen durchgehend grösser als 20 %. Da die Steifigkeit eine entscheidende Rolle beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (GZG) spielt, stellen diese grossen Abweichungen ein noch ungelöstes Problem des entwickelten FE-Modells dar.

Das RFEM-Modell berücksichtigt nur das in Versuchen gemäss EN 26891:1991 [17] ermittelte nichtlineare Verhalten der Verbindung zwischen Beplankung und Ständerwerk. Andere nichtlineare Effekte, wie Schlupf oder Lochspiel werden im Modell in keiner der Verbindungen – einschliesslich Ständerwerkverbindungen, Verankerungen oder Schubverbindungen – berücksichtigt. Diese Faktoren beeinflussen vor allem die Anfangssteifigkeit des Modells, haben jedoch nur einen geringen Einfluss auf den horizontalen Tragwiderstand. Die grösseren Abweichungen bei den zweigeschossigen Wänden sind möglicherweise auf die Geschossverbindung zurückzuführen. Das Lochspiel in dieser Verbindung (18 mm breite Löcher in den Stahlplatten mit 16 mm dicken Schrauben) dürfte die Steifigkeit in den Versuchen an den zweigeschossigen Wänden verringert haben, dies im Vergleich zu den Modellrechnungen, bei denen das Lochspiel nicht berücksichtigt wurde.

Obwohl es Parameter gäbe, welche die Genauigkeit der numerischen Berechnungen beeinflussen und gegebenenfalls verbessern könnten, wird es als schwierig angesehen, die Modellvorhersagen für alle Konfigurationen gleichzeitig mit denselben Anpassungen am Modell zu verbessern. Das Hauptproblem liegt darin, dass bei einigen Konfigurationen sowohl die Steifigkeit als auch der Tragwiderstand überschätzt, bei anderen hingegen unterschätzt werden. Die meisten Parameter beeinflussen alle Wandkonfigurationen in gleicher Weise, indem sie die Kraft-Verschiebungs-Kurve entweder insgesamt erhöhen oder verringern. Daher würde die Anpassung eines einzelnen Parameters meistens die Genauigkeit für bestimmte Konfigurationen verbessern, gleichzeitig jedoch die Vorhersagen für andere verschlechtern.

Das entwickelte Modell ist trotzdem ausreichend genau, um Empfehlungen für die Praxis in Form eines Leitfadens (AP 7b) geben zu können.

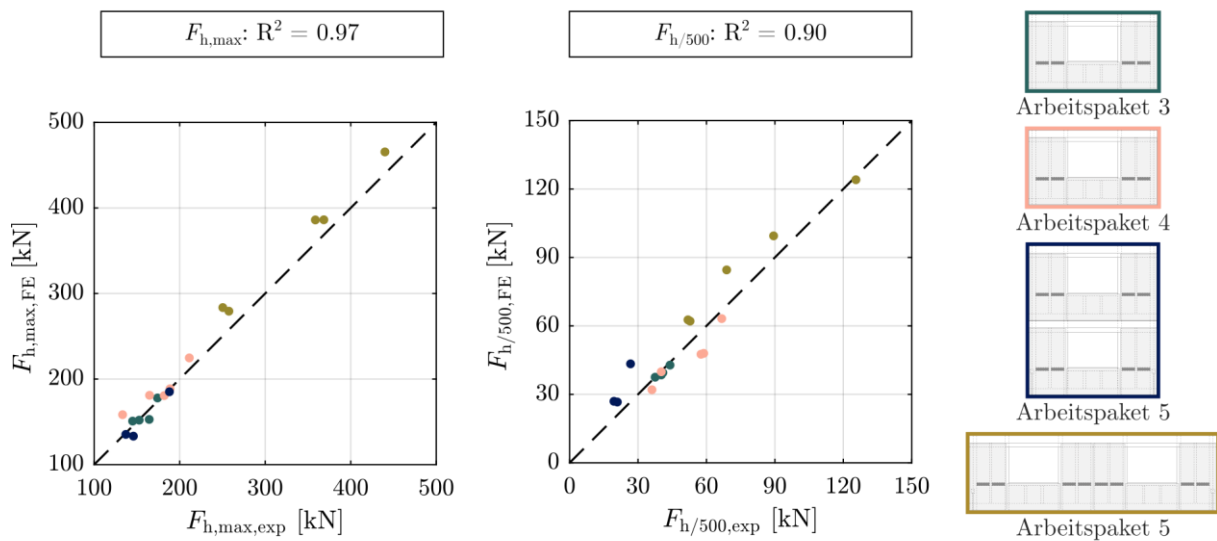


Abbildung 13: Korrelation zwischen den Versuchsergebnissen und den Ergebnissen der Berechnungen mit dem RFEM-Modell für den Tragwiderstand ($F_{h,max}$) (links) und für die Kraft, die horizontal wirkt, bei einer horizontalen Wandauslenkung von $h/500$ ($F_{h/500}$) (rechts).

5.3 Weitere Arbeiten

Neben den im Rahmen der Dissertation durch Nadja Manser durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung des numerischen Modells entstanden an der BFH-AHB in Biel/Bienne drei Bachelorarbeiten zu diesem Thema. Bei allen drei Arbeiten amtierten Martin Geiser und Lukas Kramer als verantwortliche Dozenten seitens BFH-AHB und René Steiger als Experte.

- Bachelorarbeit von Dominik Sigg (2023) [18]: Parametrisierung des RFEM-Modells mit Grasshopper sowie Erweiterung auf zwei nebeneinanderliegende Fensteröffnungen. Auf Basis dieses parametrisierten Modells wurde anschliessend eine Parameterstudie für lange, eingeschossige Wände durchgeführt.
- Bachelorarbeit von Fabio Markzoll (2025) [19]: Vereinfachung des entwickelten RFEM-Modells durch Linearisierung der nichtlinearen Eigenschaften mit dem Ziel, den Rechenaufwand zu reduzieren, ohne dabei die erforderliche Genauigkeit zu beeinträchtigen.
- Bachelorarbeit von Fabian Schlatter (2025) [20]: Parametrisierung des Modells für mehrere Wandelemente mit und ohne Fensteröffnungen, sowohl nebeneinander als auch übereinander. Ziel war es, mithilfe eines Python-Skripts und Grasshoppers ein räumliches Tragwerk in RFEM effizient zu generieren.

6 Vergleich der Versuchsergebnisse mit analytischen Berechnungsmethoden

6.1 Inhalt und Ziele

Es existieren mehrere Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Tragwiderstands und der Steifigkeit von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen. Untersuchungen an der BFH-AHB vor der Durchführung des vorliegenden Projekts haben gezeigt, dass die meisten dieser existierenden Berechnungsmethoden nicht direkt auf die in der Schweiz gebauten Holzrahmenbauwände mit Fensteröffnungen angewendet werden können [21]. Der Hauptgrund, weshalb sie nicht direkt anwendbar sind, ist, dass sie meist auf Basis experimenteller Daten entwickelt wurden, bei denen sich die Art und die Dicke der Beplankung, die Art des Verbindungsmittels und die Querschnitte

der Ständerwerkelemente von der üblichen Praxis in der Schweiz und Europa unterscheiden. Einige der existierenden Berechnungsmethoden basieren ausschliesslich auf mechanischen Modellen und wurden nie experimentell validiert.

Um das Potential und die Genauigkeit dieser existierenden Berechnungsmethoden zu beurteilen, wurden sie mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen an geklammerten Wandelementen aus den AP 4 und 5 verglichen. Eine verlässliche, einfache Berechnungsmethode zur Vorhersage des Tragwiderstands und der Steifigkeit wäre insbesondere in frühen Entwurfsphasen von grossem Nutzen, da sie es Tragwerksplanern ermöglichen würde, abzuschätzen, ob das horizontale Aussteifungssystem mit Holzrahmenbauwänden, einschliesslich den Wänden mit Fensteröffnungen, im zu planenden Bauwerk realisiert werden kann.

Es wurden die folgenden analytischen Berechnungsmethoden untersucht:

- Segmentierungsansatz (DIN EN 1995-1-1/NA:2013 [3], EN 1995-1-1:2004 [22] und FprEN 1995-1-1:2025 [6]);
- Methode nach Colling et al. [23];
- Perforated Shear Wall (PSW)-Methode ([24], [25]).

Für den Vergleich der analytisch ermittelten Steifigkeit mit den Daten aus den Experimenten wurden die Steifigkeiten in den Experimenten im Bereich zwischen 10 % und 40 % der im Versuch maximal erreichten Horizontalkraft ausgewertet, was der gängigen Auswertungspraxis entspricht. Zur Berechnung der Steifigkeit wurden die PSW-Methode sowie verschiedene Varianten der Vier-Term-Gleichung aus der Lignum Dokumentation – Erdbeengerechte mehrgeschossige Holzbauten [26] angewendet:

- Vier-Term-Gleichung für Wände ohne Fensteröffnungen, unter Berücksichtigung nur der wandhohen Segmente (Segmentierungsansatz);
- Angepasste Vier-Term-Gleichung für Wände mit Fensteröffnungen, wie sie im Force-Transfer-Around-Openings-(FTAO)-Rechner [27] implementiert ist;
- Angepasste Vier-Term-Gleichung für Wände mit Fensteröffnungen nach Colling et al. [23].

6.2 Resultate und Fazit

In der Abbildung 14 sind Korrelationsplots als Vergleich des analytisch berechneten Tragwiderstands und der Steifigkeit mit den Ergebnissen der in den AP 4 und 5 durchgeführten Versuche dargestellt. Der angepasste Segmentierungsansatz beinhaltet die Berechnung des Tragwiderstands und der Steifigkeit der seitlichen Segmente. Für die Berechnung mit dieser Methode wurde angenommen, dass jedes Segment an beiden Enden auf Zug verankert ist, während die Wandbereiche mit Fensteröffnungen vernachlässigt werden. Trotz dieser starken Vereinfachung lieferte dieser Ansatz die genauesten Vorhersagen sowohl für den horizontalen Tragwiderstand als auch für die Steifigkeit im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuche an den geklammerten Wandelementen in den AP 4 und 5. Für den horizontalen Tragwiderstand lag die durchschnittliche absolute Abweichung zwischen Berechnung und Experiment bei 12 %, wobei alle berechneten Werte konservativ waren, d. h. die Versuchsergebnisse wurden unterschätzt. Bei der Steifigkeit betrug die durchschnittliche absolute Abweichung 10 %. Dies zeigt, dass der Segmentierungsansatz eine einfache und verlässliche Abschätzung des horizontalen Tragwiderstands und der horizontalen Steifigkeit von Wänden mit Fensteröffnungen in frühen Entwurfsphasen ermöglicht. Solche vereinfachten Berechnungswerkzeuge sind in der frühen Entwurfsphase wertvoll, um abzuschätzen, ob das erforderliche horizontale Lastabtragungssystem mit den verfügbaren Holzrahmenbauwänden, sowohl ohne als auch mit Fensteröffnungen, realisiert werden kann. Allerdings können vereinfachte Methoden detaillierte FE-Modelle nicht ersetzen. Solche sind notwendig, um die für die Bemessung der einzelnen Bauteile in Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen erforderlichen Verteilungen der inneren Kräfte zu bestimmen.

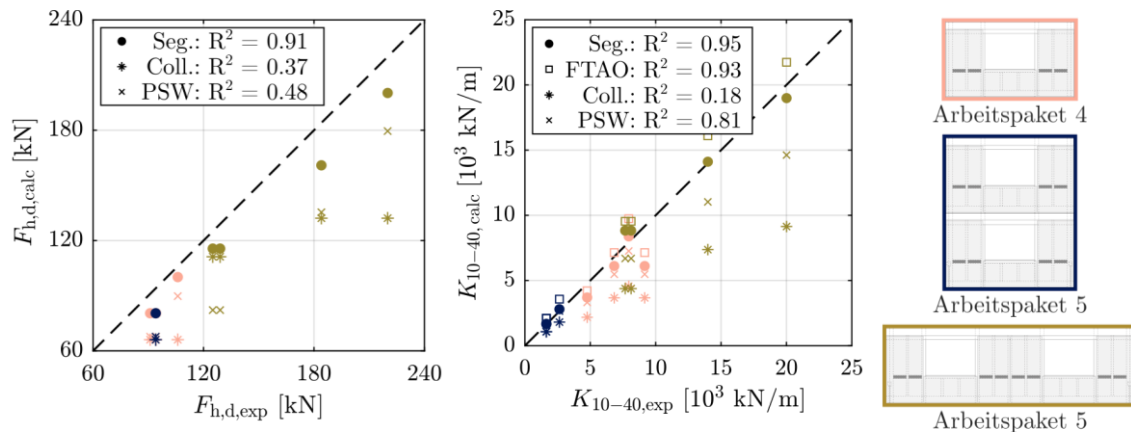


Abbildung 14: Korrelation zwischen den Versuchsergebnissen und den Ergebnissen der analytischen Berechnungen des horizontalen Tragwiderstands ($F_{h,d}$) und der horizontalen Steifigkeit (K_{10-40}) mittels unterschiedlicher verfügbarer Methoden.

7 Arbeitspaket 6: Weitere relevante Parameter für die Bemessung von Holzrahmenbauten mit Wänden mit bzw. ohne Fensteröffnungen

7.1 Inhalte und Ziele

Der Verhaltensbeiwert sowie die Tragwerksdämpfung sind massgebende Tragwerkeigenschaften in der Erdbebenbemessung, welche im Rahmen des AP 6 untersucht wurden. Die Untersuchungen wurden unter der Leitung von Martin Geiser im Rahmen von 2 Masterarbeiten an der BFH-AHB durchgeführt:

- Masterarbeit von Lukas Kramer (2023) [28]: Verhaltensbeiwert von Holzrahmenbauwandscheiben im Kontext der zweiten Generation des Eurocodes.
- Masterarbeit von Kylian Maître (2024) [29]: Amortissement des constructions bois en cas de séisme: matériaux, connexions et structures.

7.1.1 Untersuchungen zum Verhaltensbeiwert q

In der Erdbebenbemessung im Holzbau ist die Anwendung kraftbasierter Verfahren vorherrschend. Dabei ist der Verhaltensbeiwert ein wichtiger Faktor bei der Ermittlung der Einwirkung (horizontale Ersatzkraft). Bei der Bemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten muss für Wandscheiben in Holzrahmenbauweise ein hoher Überfestigkeitsfaktor angesetzt werden, damit spröde Versagensarten ausgeschlossen werden können. Dieser hohe anzusetzende Überfestigkeitsfaktor kann darauf hindeuten, dass bei der Bemessung nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten ein höherer Verhaltensbeiwert angesetzt werden könnte als dies zurzeit in den Normen angegeben ist. Daraus ergaben sich folgende Ziele im AP 6:

1. Die Ermittlung des Einflusses einer unterschiedlichen Anzahl redundanter Wandscheiben auf den Verhaltensbeiwert
2. Die Ermittlung von Verhaltensbeiwerten für unterschiedliche Überfestigkeitsfaktoren

Der Bereich zwischen keinem Überfestigkeitsfaktor $\gamma_{RD} / k_{deg} = 1,0$ und dem erforderlichen Überfestigkeitsfaktor zur Sicherstellung des zyklisch-duktilen Versagens mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ist von besonderem Interesse. Daraus könnte eine neue Methode entwickelt werden, gemäss der man mit einem höheren Verhaltensbeiwert als 1,5 rechnen kann. Dabei soll diese Methode einfacher in der Anwendung sein als die Bemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten in der Duktilitätsklasse 3. Die im AP 6 durchgeführten Untersuchungen basieren auf dem Entwurf zur zweiten Generation des Eurocodes [6], [30], [31].

Die Untersuchungen wurden auf Basis von Simulationen durchgeführt. Dabei wurden für unterschiedliche Holzrahmenbauwandscheiben die Kraft – Verschiebungskurve berechnet. Das Modell wurde mittels Vergleichs von Ergebnissen aus der Literatur verifiziert. Anhand der Kraft-Verschiebungskurve wird der verformungsbasierte Nachweis für Erdbeben geführt. Die Methodik basiert auf der Annahme, dass die verformungsbasierte Berechnung als exakte Vorhersage der Leistungsfähigkeit unter Erdbebenbeanspruchung dient. Auf dieser Basis wird anschliessend der entsprechende Verhaltensbeiwert und die Zusammensetzung der einzelnen Anteile des Verhaltensbeiwertes bestimmt. Durch den Vergleich von mehreren Verfahren aus dem Eurocode 8 ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben.

7.1.2 Untersuchungen zur Tragwerksdämpfung

Die Untersuchungen sollten den Zusammenhang zwischen Auslastung und gemessener Dämpfung aufzeigen. Darüber hinaus sollen die Faktoren identifiziert werden, welche die Dämpfung von Materialien, Verbindungen und Holzkonstruktionen beeinflussen. Anschliessend sollte die mögliche Affinität zwischen der Dämpfung einer Konstruktion und den Verformungsteilen ihrer Bauteile untersucht werden. Schliesslich sollten die Einflüsse identifiziert werden, die für die Entwicklung eines zuverlässigen Modells zur Berechnung der Dämpfung von Holzrahmenbauten relevant sind.

Für die Untersuchungen wurden Ausschwingversuche an Einmassenschwingern mit unterschiedlichen Verbindungsmitteln (Drehfeder im Einmassenschwinger) durchgeführt. Weiter wurden Ausschwingversuche an Materialien, unterschiedlichen Verbindungsmitteln als Einmassenschwinger, Holzrahmenbauwandscheiben und Gebäuden neu ausgewertet. Für die Auswertung wurde ein Curve Fitting Algorithmus verwendet. Basierend auf den Verformungsanteilen von Holzrahmenbauwandscheiben und den Dämpfungswerten der Material- und Verbindungsmitelprüfungen wurde die Dämpfung von Holzrahmenbauwandscheiben bei unterschiedlicher Auslastung vorhergesagt und mit den Versuchen verglichen.

7.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

7.2.1 Untersuchungen zum Verhaltensbeiwert q

Der Anteil aus Kraftumlagerung zwischen mehreren Wandscheiben im Grundriss in redundanten Tragwerken liegt im Bereich zwischen 1,0 und 1,2 für zwei bis 15 redundante Wandscheiben. Der im Eurocode 8 [31] vorgeschlagene Systembeiwert von 1,1 konnte für 10 oder mehr redundante Wandscheiben bestätigt werden. Der Verhaltensbeiwert für die Bemessung nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten wurde in den Berechnungen mit Werten zwischen 1,6 und 1,9 ermittelt. In diesen Werten ist sowohl der Überfestigkeitsanteil als auch der Duktilitätsanteil enthalten. Der Überfestigkeitsanteil allein erreicht den im Eurocode 8 angegebenen Wert von 1,5 nicht. Trotzdem kann auf Grund der durchgeführten Berechnungen der normativ festgelegte Verhaltensbeiwert von $q = 1,5$ für die Bemessung einer Holzrahmenbauwand nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten als bestätigt betrachtet werden.

Im Entwurf zum Eurocode 8 besteht Überarbeitungsbedarf, da zwischen der kraftbasierten und der verformungsbasierten Bemessung Diskrepanzen bezüglich der Leistungsfähigkeit bestehen. In Zukunft sollte der ansetzbare plastische Verformungsanteil in der verformungsbasierten Bemessung für alle Tragwerkstypen im Holzbau individuell bestimmt und der Verhaltensbeiwert erneut berechnet werden.

7.2.2 Untersuchungen zur Tragwerksdämpfung

Holz und Holzwerkstoffe weisen eine höhere Dämpfung auf als z.B. Stahl. Weiter nehmen mit steigender Kraft die Dämpfung, die Amplitude und die massgebende Grundschwingzeit zu. Ausschwingversuche an den Verbindungen, mit Ausnahme der Stabdübel, zeigen Dämpfungswerte, welche weit über denen liegen, die in der Literatur für genagelte Holzrahmenbauwände angegeben sind. Tatsächlich liegt die Dämpfung der getesteten Verbindungen höher als die einer Holzrahmenbauwand, welche mit derselben Verbindung konstruiert wurde. Bei geklammerten, genagelten und gedübelten Verbindungen nimmt der Dämpfungswert mit steigender Kraft ab, während bei geschraubten Verbindungen eine Zunahme der Dämpfung zu verzeichnen ist. Stabdübelverbindungen weisen die geringste Anpresskraft F_N sowie die niedrigsten Dämpfungswerte auf. Mit steigendem Anpressdruck, ersichtlich

in den Versuchen an Klammerverbindungen und Nagelverbindungen, steigt auch die Dämpfung in der Verbindung. Diese hängt also vom Kraftniveau F_F , der Dämpfung der Materialien, der Steifigkeit und dem nichtlinearen Verhalten der Verbindungen, dem Haftreibungskoeffizienten μ_s oder der kinetischen Reibung μ_c und der Verbindungsanpresskraft F_N ab.

Holzrahmenbau-Tragwerke weisen in Lastbereichen, wo geringe Verformungen auftreten, eine Dämpfung zwischen 2 % und 10 % auf, die bei großen Verformungen mehr als 15 % erreichen kann. Die Untersuchungen legen nahe, dass Holzrahmenbau-Tragwerke bei Erdbeben eine höhere Dämpfung aufweisen als Stahlbeton- oder Stahl-Tragwerke. Der grösste Teil dieser Energiedissipation erfolgt über die Verbindungen, bei denen dank eines hohen Reibungskoeffizienten und einer hohen Presskraft der Verbindungselemente Reibung in den Kontaktflächen innerhalb der Verbindung entsteht. Basierend auf den Angaben in der Literatur und den Ergebnissen der Versuche im AP 6 kann in Erwägung gezogen werden, den äquivalenten viskosen Dämpfungskoeffizienten ξ_e , der derzeit in den SIA-Normen auf 5 % festgelegt ist, für Holzrahmenbautragwerke angemessen zu erhöhen. Dies ist insbesondere im Rahmen der Erhaltungsplanung bestehender Tragwerke interessant.

8 Arbeitspaket 7: Wissenstransfer

8.1 Inhalt und Ziele

Dieses AP 7 umfasste das Verfassen der Doktorarbeit durch Nadja Manser [32] sowie die Erstellung eines Leitfadens für praktizierende Bauingenieurinnen und Bauingenieure. Ergänzend zur Dissertation wurde ein ausführlicher Versuchsbericht erstellt [33], und die experimentellen Daten wurden der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Weiter wurden die Projektergebnisse in Fachzeitschriften veröffentlicht und auf wissenschaftlichen Konferenzen präsentiert. Die Publikation der Ergebnisse stellt einen wichtigen Schritt dar, um die entwickelten Bemessungsansätze in bestehende nationale und internationale Baunormen zu integrieren.

Im Folgenden sind die Publikationen aufgeführt. Zudem wird der Aufbau des Leitfadens beschrieben, dessen Veröffentlichung für den Sommer 2026 vorgesehen ist. Gemeinsam mit begleitenden Einführungskursen soll der Leitfaden dazu beitragen, das erarbeitete Wissen effektiv in die Praxis zu transferieren.

8.2 Wissenschaftliche Publikationen und Präsentationen des Projekts

Poster Präsentation am PhD Symposium der Empa 2022

Das Forschungsprojekt wurde am Empa-internen PhD Symposium vom 24.11.2022 vorgestellt.

Holzbautag Biel/Bienne 2022

Das Projekt Holzrahmenbauwände mit Fensteröffnungen wurde im Rahmen der Referate von Martin Geiser präsentiert.

Präsentation und Konferenzbeitrag S-WIN – von der Forschung zur Praxis 2023

Die Ergebnisse der im Arbeitspaket 2 durchgeführten 12 Wandscheibenversuche und der 15 weiteren durchgeführten Wandscheibenversuche im Rahmen einer Bachelorarbeit an der BFH/AHB wurden am 10.05.2023 in Biel an der S-WIN-Tagung "Von der Forschung zur Praxis" vorgestellt und als Konferenzbeitrag auf Deutsch im Tagungsband veröffentlicht. (Titel: Ergebnisse aus Versuchen an mit OSB/3 beplankten Holzrahmenbau-Wänden [8])

Präsentation und Konferenzbeitrag World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2023

Die Ergebnisse der im AP 2 durchgeführten 12 Wandscheibenversuche wurden an der World Conference on Timber Engineering (WCTE) vorgestellt, welche vom 19. bis 22.06.2023 in Oslo stattfand und als Konferenzbeitrag auf Englisch veröffentlicht. (Titel: Timber-framed shear walls with large openings as part of the lateral force-resisting system – Optimization of the sheathing-to-framing connection layout [34])

Poster Präsentation am PhD Symposium der Empa 2023

Das Forschungsprojekt wurde am Empa-internen PhD Symposium vom 17.11.2023 vorgestellt.

Präsentation und Konferenzbeitrag Internationales Holzbau Forum (IHF) 2023

Die Ergebnisse der am AP 6a durchgeführten Untersuchungen zum Verhaltensbeiwert von Holzrahmenbauten wurden am IHF vorgestellt, welches vom 29.11 bis 01.12.2023 in Innsbruck stattfand und als Konferenzbeitrag auf Englisch veröffentlicht. (Titel: Behaviour factor for light frame timber shear walls in the context of the second generation of the Eurocode [35])

Lignarius Bericht 2023

Die Zeitschrift "Lignarius" des STE (Swiss Timber Engineers) veröffentlichte einen Beitrag über das Projekt.

Einführungskurse zur neuen technischen Dokumentation der Lignum Erdbebengerechte Holzbauten (November 2023 bis März 2024)

Das Projekt Wände mit Öffnungen wurde in 7 Einführungskursen zur technischen Dokumentation der Lignum Erdbebengerechte Holzbauten in Biel, Luzern, Zürich und Martigny mit insgesamt rund 180 Teilnehmer aus der ganzen Schweiz vorgestellt.

Präsentation der Versuche des Arbeitspakets 3 am Doktorandenkolloquium in Stuttgart 2024

Die Ergebnisse der Versuche im AP 3 wurden am 18./19.03.2024 am Doktoranden-Kolloquium an der TU Stuttgart vorgestellt. Das Publikum bestand aus Personen aus der Forschung und der Praxis. (Titel: Untersuchungen über den Beitrag von Holzrahmenbau-Wänden mit Fensteröffnungen zum horizontalen Gebäude-Aussteifungssystem [36])

Präsentation der Versuche des Arbeitspakets 2 am INTER-Meeting 57 (International Network on Timber Engineering Research) 2024

Die Ergebnisse der Versuche im AP 2 wurden am INTER-Meeting 57 (International Network on Timber Engineering Research) in Padua, 26. – 29.08.2024 vorgestellt. Das Publikum bestand aus Personen aus der Holzbau-Forschung. (Titel: OSB sheathed timber-framed shear walls with optimized performance for horizontal loading [37])

Veröffentlichung der Ergebnisse der Versuche im Arbeitspaket 2 in Fachzeitschrift

Die Ergebnisse der Versuche im AP 2 wurden im Journal "Engineering Structures" unter dem Titel "Shear resistance of Oriented Strand Board panel sheathings in timber-framed shear walls" in Engineering Structures veröffentlicht. [38]

Präsentation des Projekts am Tag der offenen Tür der Empa in Dübendorf 2024

Im Rahmen der Veranstaltung "Open door day at Empa" wurde das Forschungsprojekt vorgestellt. Das Publikum bestand aus Freunden und Familie der Empa-Mitarbeitenden, aber auch aus Personen, die in der Region wohnen. Die Besucherzahl wurde auf ca. 7000 geschätzt.

Holzbautag Biel/Bienne 2024

Das Projekt Holzrahmenbauwände mit Fensteröffnungen wurde im Rahmen der Referate von Martin Geiser präsentiert.

Präsentation und Konferenzbeitrag S-WIN – von der Forschung zur Praxis 2025

Ein Überblick über das Projekt, die experimentellen Untersuchungen an Wänden mit Öffnungen und die wichtigsten Resultate wurden am 15.05.2025 in Biel an der S-WIN-Tagung "Von der Forschung zur Praxis" vorgestellt und als Konferenzbeitrag auf Deutsch im Tagungsband veröffentlicht. (Titel: Überblick über das Projekt, die experimentellen Untersuchungen an Wänden mit Öffnungen und die wichtigsten Resultate [39])

Präsentation und Tagungsbeitrag S-WIN Tagung 2025

Die Ergebnisse der im AP 6b durchgeführten Versuchen wurden an der S-WIN-Tagung vorgestellt, welche am 15.05.2025 in Biel stattfand und als Konferenzbeitrag auf Deutsch veröffentlicht. (Titel: Dämpfung von Holztragwerken im Erdbebenfall [40])

Präsentation und Konferenzbeitrag World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2025

Die Ergebnisse der in den AP 3 und 4 durchgeführten 9 Wandscheibenversuche mit Fensteröffnungen wurden an der World Conference on Timber Engineering (WCTE) vorgestellt, welche vom 23. bis 26.06.2025 in Brisbane stattfand und als Konferenzbeitrag auf Englisch veröffentlicht. (Titel: One-storey timber-framed shear walls with window openings as part of the lateral force-resisting system [41])

Veröffentlichung zur Einordnung der Ergebnisse der Versuch im Arbeitspaket 2 in Fachzeitschrift 2025

Teile der Ergebnisse der Versuche im AP 2 wurden mithilfe von numerischen Simulationen neu interpretiert und im Journal "Engineering Structures" unter dem Titel " Interpretation of experimental investigations on framed timber shear walls using numerical investigations of Daniels Systems" veröffentlicht. [13]

Präsentation und Konferenzbeitrag 19. D-A-CH Tagung 2025

Die Ergebnisse der im AP 6b durchgeführten Versuche wurden an der D-A-CH Tagung vorgestellt, welche am 18. & 19.09.2025 in Wien stattfand und als Konferenzbeitrag auf Englisch veröffentlicht. (Titel: Damping of timber structures in earthquake situations [42])

Beitrag im Empa Quarterly / Empa Website mit Video 2025

Das Projekt wurde von Seiten der Empa in der Zeitschrift "Empa Quarterly", zusammen mit einem Beitrag auf LinkedIn und auf der Empa Webseite veröffentlicht. Dieser Beitrag umfasste weiter ein Video, das zusätzlich auch auf YouTube verfügbar ist. [43]

Baublatt Bericht 2025

Die Zeitschrift "Baublatt" veröffentlichte einen Beitrag über das Projekt.

Holzbau Schweiz Spezial 2025

Holzbau Schweiz veröffentlichte in ihrem Magazin "Spezial" einen Beitrag über das Projekt.

15 Jahre Holzbaugruppe ETH 2025

Das Projekt wurde an der Veranstaltung „15 Jahre Fachgebiet Holzbau an der ETH Zürich“ präsentiert, an der rund 80 Vertreterinnen und Vertreter der Schweizer Holzbaubranche aus Forschung und Praxis teilnahmen.

VGQ-Fachaustausch Oktober 2025

Das Projekt Holzrahmenbauwände mit Fensteröffnungen wurde im Rahmen des Referats von Martin Geiser präsentiert.

Lignarius Bericht 2025

Die Zeitschrift "Lignarius" des STE (Swiss Timber Engineers) veröffentlichte einen Beitrag über das Projekt.

8.3 Bachelor- und Masterarbeiten im Projekt

- Bachelorarbeit von Tino Attenhofer (2022) [5]: Aussteifende Holzrahmenbau-Wände mit Öffnungen Parameterstudie zur Bestimmung der Wandproportionen
- Masterarbeit von Lukas Kramer (2023) [28]: Verhaltensbeiwert von Holzrahmenbauwandscheiben im Kontext der zweiten Generation des Eurocodes.
- Bachelorarbeit von Dominik Sigg (2023) [18]: Aussteifende Holzrahmenbau-Wände mit mehreren Öffnungen - Entwicklung eines parametrischen Modellierungstools zur Ermittlung von Tragwiderstand und Steifigkeit beliebiger Wandgeometrien.
- Bachelorarbeit von Fabio Zoller (2023) [9]: Reduktionsbeiwert k_{v2} für Beplankungen aus OSB/3-Platten
- Masterarbeit von Antonella Arnold (2023) [10]: Investigations of OSB sheathed timber frame shear walls with openings
- Masterarbeit von Kylian Maître (2024) [29]: Amortissement des constructions bois en cas de séisme: matériaux, connexions et structures.
- Bachelorarbeit von Fabio Markzoll (2025) [19]: Numerische Analyse von Wandscheiben mit Öffnungen.
- Bachelorarbeit von Fabian Schlatter (2025) [20]: Tragwerksanalyse bei Holzrahmenbauten, die Wandscheiben mit Öffnungen enthalten.

8.4 Erstellung des Leitfadens für die Praxis

Der Leitfaden für die Anwendung der Erkenntnisse aus dem vorliegenden Forschungsprojekt wird in drei Stufen aufgebaut sein:

- **Stufe 1:** Vorphase
Tragfähigkeit und Steifigkeit mit einfacher Berechnung abschätzen
- **Stufe 2:** Detaillierte Bemessung für regelmässige Gebäude
Vereinfachte Nachweise, basierend auf dem entwickelten RFEM-Modell
- **Stufe 3:** Detaillierte Bemessung für unregelmässige Gebäude
Anwendung des RFEM-Modells

Für die **Stufe 1** wurde ein rund zehnteitiges Dokument erstellt, mit dessen Hilfe die Machbarkeit einer Aussteifung in Holzrahmenbauweise anhand tabellarischer Auswertungen schnell überprüft werden kann.

Für die **Stufe 2** wird ein Dokument erarbeitet, welches es unter Einhaltung gewisser Randbedingungen ermöglicht, Wandscheiben mit Öffnungen in Holzrahmenbauweise für horizontale Einwirkungen zu bemessen, ohne ein RFEM-Modell aufzubauen.

Für die **Stufe 3** wurde ein Dokument ausgearbeitet, das beschreibt, wie in der Praxis eigenständig ein RFEM-Modell aufgebaut werden kann. Es enthält detaillierte Erläuterungen zum Aufbau und zur Struktur des im Rahmen der Arbeit entwickelten RFEM-Modells.

9 Projektsitzungen und Workshops

Nachfolgend sind die Workshops und die Projektsitzungen, deren Datum, Inhalt und Teilnehmende in chronologischer Reihenfolge aufgelistet.

25.02.2022 Workshop 1 (Online)

Inhalt:

- Präsentation der wichtigsten Eckdaten des Projekts;
- Festlegen gewisser Parameter der Prüfkörper für die Versuche an den eingeschossigen Wandelementen.

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Martin Geiser, René Steiger, Nadja Manser, Lukas Kramer, Lukas Furrer;
- Swiss Timber Engineers STE: Michael Büeler, Andreas Burgherr, Katharina Müller, Niklaus Wirz;
- Holzbau Schweiz: Julian Brunner, Raphael Inauen, Markus Zimmermann.

19.08.2022 Workshop 2 (BFH-AHB, Biel)

Inhalt:

- Präsentation zum aktuellen Stand der Arbeiten im Projekt, sowie der geplanten nächsten Schritte;
- Festlegung von einer oder zwei Verstärkungsmassnahmen für die Versuche an eingeschossigen Wandelementen mit Fensteröffnungen im AP 3;
- Festlegung der Versuchsmatrix für das AP 3.

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Martin Geiser, René Steiger, Nadja Manser, Lukas Kramer, Lukas Furrer;
- Swiss Timber Engineers STE: Michael Büeler, Andreas Burgherr, Niklaus Wirz;
- Holzbau Schweiz: Raphael Inauen, Marcel Thomi, Markus Zimmermann.

04.11.2022 Projektsitzung (Online)

Inhalt:

- Vorstellung der Anpassungen am Zeitplan;
- Präsentation der Ergebnisse der Versuche im AP 2.

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Martin Geiser, René Steiger, Nadja Manser, Lukas Kramer, Lukas Furrer, Dominik Sigg, Nicolas Zoller;
- Swiss Timber Engineers STE: Michael Büeler, Andreas Burgherr, Niklaus Wirz;
- Holzbau Schweiz: Raphael Inauen, Marcel Thomi;
- BAFU: Christian Aebischer.

17.08.2023	Workshop 3 (BFH-AHB, Biel) Inhalt: • Präsentation zum aktuellen Stand der Arbeiten im Projekt, sowie der geplanten nächsten Schritte; • Festlegung der Verstärkungsmassnahme(n) für die Versuche an Wänden mit Fensteröffnungen im AP 4 und im AP 5; • Festlegung der Versuchsmatrix für das AP 4; • Grobe Planung des AP 5; • Präsentation Masterthesis Lukas Kramer (Verhaltensbeiwert q, AP6a) Teilnehmende: • Forschungsteam: Andrea Frangi, Martin Geiser, Nadja Manser, Lukas Kramer, René Steiger; • Swiss Timber Engineers STE: Claude Leyder, Silvan Stierli (als Vertreter von Andreas Burgherr), Jonas Wacker (als Vertreter von Michael Buehler), Niklaus Wirz; • Holzbau Schweiz: Marcel Thomi, Markus Zimmermann;
31.08.2023	Besprechung der Ausbildung der Prüfkörper für die Versuche im AP 4 (online) Teilnehmende: • Forschungsteam: Martin Geiser, Nadja Manser, René Steiger; • Swiss Timber Engineers STE: Niklaus Wirz als Koordinationsperson;
07.09.2023	Besprechung der Schubverankerung der Prüfkörper für die Versuche im AP 4 (online) Teilnehmende: • Forschungsteam: Martin Geiser, Nadja Manser, René Steiger; • Swiss Timber Engineers STE: Niklaus Wirz als Koordinationsperson;
09.11.2023	Besprechung der Detailausbildung des durchgehenden Riegels (online) Inhalt: • Beschluss, dass der durchgehende Riegel bei den Prüfkörpern für die Versuche im AP 4 nur bis zur Innenseite des Randständers ausgebildet wird. • Beschluss, dass die gegenseitige Ausblattung des durchgehenden Riegels und der Fensterständer in einem Verhältnis von 2/3 und 1/3 ausgeführt wird. Teilnehmende: • Forschungsteam: Nadja Manser • Swiss Timber Engineers STE: Niklaus Wirz als Koordinationsperson
20.03.2024	Präsentation des aktuellen Stands in der FE-Modellierung mit RFEM (online) Inhalt: • Das RFEM-Modell, wie es aktuell von Nadja Manser für den Abgleich zwischen numerischer Modellierung und Versuchsergebnissen verwendet wird (Forschungsmodell), wurde vorgestellt. • Ein Dokument mit allen Input-Parametern für das RFEM-Modell wurde erstellt und den Industriepartnern für die Anwendung in der Praxis zur Verfügung gestellt. Teilnehmende: • Forschungsteam: Martin Geiser, Lukas Kramer, Nadja Manser, René Steiger; • Swiss Timber Engineers STE: Claude Leyder, Florian Burkhard, Katharina Müller; • Holzbau Schweiz: Raphael Inauen, Daniel Schild, Markus Zimmermann;

24.04.2024 Workshop 4 (BFH-AHB, Biel)

Inhalt:

- Präsentation des aktuellen Stands der Arbeiten im Projekt mit Fokus auf die AP 3 und 4, sowie auf die geplanten nächsten Schritte;
- Festlegung der Versuchsmatrix für das AP 5.

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Martin Geiser, Lukas Kramer, Nadja Manser, René Steiger;
- Swiss Timber Engineers STE: Andreas Burgherr, Jonas Wacker (als Vertreter von Michael Büehler), Niklaus Wirz;
- Holzbau Schweiz: Kein Teilnehmer.

28.05.2024 Besprechung der Detailausbildung der Prüfkörper für die Versuche im AP 5 (online)

Inhalt:

- Besprechung des Vorschlages von Niklaus Wirz für die Gestaltung des Geschossüberganges bei den zweigeschossigen Wänden;
- Besprechung der Detailausbildung mit gekreuzten Schrauben bei der Verstärkung mit Schubhölzern auf der Höhe des Brüstungsriegels;
- Besprechung, ob die langen, eingeschossigen Wände zwischenverankert werden sollen, Entscheid: Nein, sie sollen ebenfalls nur am Wand-Ende auf Zug verankert werden.

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Martin Geiser, Lukas Kramer, Nadja Manser, René Steiger;
- Swiss Timber Engineers STE: Niklaus Wirz als Koordinationsperson.

11.07.2024 Besprechung RFEM-Modell (online)

Inhalt:

- Fragen von Nadja Manser zum RFEM-Modell wurden diskutiert.

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Nadja Manser;
- Swiss Timber Engineers STE: Jonas Wacker.

18.07.2024 Besprechung der Offerten für die Prüfkörper, welche im AP 5 geprüft wurden (online)

Inhalt:

- Auswertung und Besprechung der Offerten

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Martin Geiser, Nadja Manser, René Steiger;
- Holzbau Schweiz: Daniel Schild.

24.07.2024 Besprechung der Ausbildung und Herstellung der Prüfkörper für die Versuche im AP 5 (online)

Inhalt:

- Die Ausbildung der Prüfkörper wurden mit dem Holzbauer (Holzbau Oberholzer GmbH) besprochen.

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Nadja Manser;
- Holzbau Oberholzer GmbH: Roger Rüegg
- Holzbau Schweiz: Daniel Schild.

25.07.2024 – Besprechung der Prüfaufbauten für die Versuche im AP 5

24.10.2024

25.07.2025 (online)

- Inhalt: Planung des Versuchsaufbaus für die Versuche im AP 5.
- Teilnehmende: Nadja Manser, Martin Otti (BFH-AHB), Kilian Strasser (Empa).

07.08.2025 (Empa)

- Inhalt: Planung des Versuchsaufbaus für die Versuche im AP 5.
- Teilnehmende: Nadja Manser, René Steiger, Robert Widmann (Empa).

19.08.2025 (Empa)

- Inhalt: Planung des Versuchsaufbaus für die Versuche im AP 5.
- Teilnehmende: Nadja Manser, René Steiger, Kilian Strasser (Empa).

24.10.2025 (Empa)

- Inhalt: Planung des Versuchsaufbaus für die Versuche im AP 5.
- Teilnehmende: Nadja Manser, René Steiger, Kilian Strasser (Empa), Robert Widmann (Empa).

24.11.2024 Besprechung Rückmeldung RFEM-Modell (Empa)

Inhalt:

- Präsentation der Masterthesis von Kylian Maître (Dämpfung im Holzbau, AP6b)
- Präsentation der ersten Ergebnisse der zweigeschossigen Versuche.
- Sammlung und Diskussion der Rückmeldungen zur Modellierung aus der Praxis.

Teilnehmende

- Forschungsteam: Martin Geiser, Lukas Kramer, Nadja Manser, René Steiger
- Swiss Timber Engineers STE: Silvan Winterberg, Jonas Wacker, Tino Attenhofer, Fabio Markzoll, Andreas Stump
- Holzbau Schweiz: Daniel Schild, Markus Zimmermann

07.03.2025 Workshop 5 (Online)

Inhalt:

- Präsentation des aktuellen Stands der Arbeiten im Projekt mit Fokus auf das AP 5.
- Präsentation der beiden BFH-AHB-Bachelorarbeiten von Fabio Markzoll und Fabian Schlatter

Teilnehmende:

- Forschungsteam: Shay Assaf, Andrea Frangi, Martin Geiser, Nadja Manser, Fabio Markzoll, Fabian Schlatter, René Steiger
- Swiss Timber Engineers STE: Andreas Burgherr, Jonas Wacker, Niklaus Wirz
- Holzbau Schweiz: Daniel Schild

19.12.2025

Workshop 6 (Online)

Inhalt:

- Präsentation des aktuellen Stands der Arbeiten im Projekt mit Fokus auf das AP 7.
- Präsentation des weiteren Vorgehens im Projekt Wände mit Öffnungen nach offiziellem Projektabschluss

(voraussichtliche) Teilnehmende:

- Forschungsteam: Shay Assaf, Martin Geiser, Lukas Kramer, Nadja Manser, René Steiger
- Swiss Timber Engineers STE: Andreas Burgherr, Raphael Inauen, Jonas Wacker, Niklaus Wirz
- Holzbau Schweiz: Daniel Schild

Referenzen

- [1] S. Meier, "Relevanz der Bemessungssituation Erdbeben im Schweizer Holzbau. In: Tagungsband zum S-WIN Fortbildungskurs "Von der Forschung zur Praxis: neue Lösungen für den Holzbau - Erdbeben und Qualitätssicherung.", ed: Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2018.
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, "SIA-Norm 265: Holzbau," ed: SIA, Schweiz, 2021.
- [3] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, G. I. f. S. DIN, Berlin, Deutschland, 2013.
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, "SIA-Norm 261: Einwirkungen auf Tragwerke," ed: SIA, Schweiz, 2020.
- [5] T. Attenhofer, "Aussteifende Holzrahmenbau-Wände mit Öffnungen: Parameterstudie zur Bestimmung der Wandproportionen," Bachelorarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2022.
- [6] Europäisches Komitee für Normung CEN, "FprEN 1995-1-1: Final Eurocode 5-1-1 Draft for Formal Vote: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings," vol. CEN/TC 250/SC 5 N 2259, ed. CEN, Brüssel, Belgien, 2025.
- [7] Europäisches Komitee für Normung CEN, "EN 14080: Timber structures - Glued laminated timber and glued laminated solid timber - Requirements," ed: CEN, Brüssel, Belgien, 2013.
- [8] N. Manser, N. Zoller, L. Kramer, R. Steiger, M. Geiser, and A. Frangi, "Ergebnisse aus Versuchen an mit OSB/3 beplankten Holzrahmenbau-Wänden," präsentiert in der S-WIN Tagung - Von der Forschung zur Praxis, Biel, Schweiz, 2023.
- [9] N. Zoller, "Reduktionsbeiwert kv2 für Beplankungen aus OSB/3-Platten," Bachelorarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2023.
- [10] A. Arnold, "Investigations of OSB sheathed timber frame shear walls with openings," Masterarbeit, ETH Zürich, 2023.
- [11] European Committee for Standardization CEN, "EN 12369-1: Wood-based panels - Characteristic values for structural design - Part 1: OSB, particleboards and fibreboards," ed: CEN, Brüssel, Belgien, 2001.
- [12] Europäisches Komitee für Normung CEN, "EN 300: Oriented Strand Boards (OSB) - Definitions, classification and specifications," ed: CEN, Brüssel, Belgien, 2006.
- [13] L. Kramer, M. Geiser, and D. Proske, "Interpretation of experimental investigations on framed timber shear walls using numerical investigations of Daniels Systems," (in English), Engineering Structures, vol. 343, Nov 15 2025, doi: ARTN 121238 10.1016/j.engstruct.2025.121238.
- [14] U. Oberbach, "Ermittlung der dynamischen Eigenschaften von mehrgeschossigen Holzrahmenbauten mittels Ausschwingversuch," Masterarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2021.
- [15] G. Ratsch, M. Geiser, and R. Häni, "Abklärungen betreffend Steifigkeit und Tragverhalten von Holzrahmenwänden mit Öffnungen für die erdbebengerechte Gebäudeaussteifung im mehrgeschossigen Holzbau.", ed. Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2019.
- [16] L. Kramer and M. Geiser, "Tragverhalten mehrgeschossiger Holzbau - Tragverhalten und adaptive Steifigkeit von Holzrahmenwänden für erdbebengerechte Gebäudeaussteifung im mehrgeschossigen Holzbau.", ed: Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2021.
- [17] Europäisches Komitee für Normung CEN, "EN 26891: Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens," ed: CEN, Brüssel, Belgien, 1991.
- [18] D. Sigg, "Aussteifende Holzrahmenbau-Wände mit mehreren Öffnungen - Entwicklung eines parametrischen Modellierungstools zur Ermittlung von Tragwiderstand und Steifigkeit beliebiger Wandgeometrien," Bachelorarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2023.

- [19] F. Markzoll, "Numerische Analyse von Wandscheiben mit Öffnungen," Bachelorarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2025.
- [20] F. Schlatter, "Tragwerksanalyse bei Holzrahmenbauten die Wandscheiben mit Öffnungen enthalten," Bachelorarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2025.
- [21] R. M. Inauen and Y. Kälin, "Analyse des FTAO Calculators und Prüfung dessen Anwendbarkeit," Projektarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2021.
- [22] Europäisches Komitee für Normung CEN, "EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings," ed: CEN, Brüssel, Belgien, 2004.
- [23] F. Colling and P. Janssen, Aussteifung von Gebäuden in Holztafelbauart - Nach Schubfeldtheorie und erweitertem Schubfeldträgermodell. 2025.
- [24] B. K. Douglas and H. Sugiyama, "Perforated Shearwall Design Approach," American Forest & Paper Association, Washington, Amerika, 2001.
- [25] P. Line and B. K. Douglas, "Perforated Shearwall Design Method," präsentiert an der International Wood Engineering Conference, New Orleans, Amerika, 1996.
- [26] R. Brunner, P. Jung, R. Steiger, and T. Wenk, Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten (Technische Dokumentation der Lignum). Zürich: Lignum - Holzwirtschaft Schweiz, 2010.
- [27] Excel: Force Transfer Around Openings (FTAO) Calculator. (2020). APA - The Engineered Wood Association, Tacoma, Amerika.
- [28] L. Kramer, "Verhaltensbeiwert von Holzrahmenbauwandscheiben," Masterarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2023.
- [29] K. Maître, "Damping of timber constructions in earthquake situation: materials, connections and structures," Masterarbeit, Berner Fachhochschule (BFH), Biel, Schweiz, 2024.
- [30] Europäisches Komitee für Normung CEN, "prEN 1998-1-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten," ed. CEN, Brüssel, Belgien, 2022.
- [31] Europäisches Komitee für Normung CEN, "prEN 1998-1-2: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 2: Hochbauten," ed. CEN, Brüssel, Belgien, 2022.
- [32] N. Manser, "Structural behaviour of timber frame shear walls with large window openings," Doktorarbeit, ETH Zurich, Zürich, Schweiz, 31442, 2025.
- [33] N. Manser, L. Kramer, R. Steiger, M. Geiser, and A. Frangi, "DRAFT: Experimental investigations on timber frame shear walls with window openings," Institute of Structural Engineering ETH Zurich, Zürich, Schweiz, 2026.
- [34] N. Manser, R. Steiger, M. Geiser, L. Kramer, and A. Frangi, "Timber-framed shear walls with large openings as part of the lateral force-resisting system - optimization of the sheathing-to-framing connection layout," präsentiert an der World Conference on Timber Engineering (WCTE) Oslo, Norwegen, 2023.
- [35] L. Kramer, "Behaviour factor for light frame timber shear walls in the context of the second generation of the Eurocode," präsentiert an der 27. Internationales Holzbau-Forum IHF Innsbruck, Österreich, 2023.
- [36] N. Manser, R. Steiger, M. Geiser, and A. Frangi, "Untersuchungen über den Beitrag von Holzrahmenbauwänden mit Fensteröffnungen zum horizontalen Gebäude-Aussteifungssystem," präsentiert am Doktorandenkolloquium Stuttgart, Stuttgart, Deutschland, 2024.
- [37] N. Manser, R. Steiger, M. Geiser, and A. Frangi, "OSB sheathed timber-framed shear walls with optimized performance for horizontal loading," präsentiert an International Network on Timber Engineering Research (INTER), Padova, Italy, 2024.
- [38] N. Manser, R. Steiger, M. Geiser, M. Otti, and A. Frangi, "Shear resistance of Oriented Strand Board panel sheathings in timber-framed shear walls," Engineering Structures, vol. 316, 2024, doi: 10.1016/j.eng-struct.2024.118461.

- [39] N. Manser, R. Steiger, M. Geiser, L. Kramer, and A. Frangi, "Holzrahmenbau-Wände mit Fensteröffnungen für die horizontale Gebäudeaussteifung," präsentiert an der S-WIN - Von der Forschung zur Praxis, Biel, Schweiz, 2025.
- [40] M. Geiser, K. Maître, and P. Lestuzzi, "Dämpfung von Holztragwerken im Erdbebenfall," präsentiert an der S-WIN-Tagung - Aus der Forschung in die Praxis, Biel, Schweiz, 2025.
- [41] N. Manser, R. Steiger, M. Geiser, and A. Frangi, "One-storey timber-framed shear walls with window openings as part of the lateral force-resisting system," präsentiert an der World Conference on Timber Engineering (WCTE), Brisbane, Australien, 2025.
- [42] M. Geiser, K. Maître, and P. Lestuzzi, "Damping of timber structures in earthquake situations," präsentiert an der 19. D-A-CH Tagung Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, Wien, Österreich, 2025.
- [43] A. Ettlin, "Empa - Die Statik zählt." <https://www.empa.ch/web/s604/holzbau-waende-mit-fensteroeffnungen> (letzter Zugriff: 20.10.2025).