

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

InnoCrossLam – Innovative Lösungen für das zukünftige Bauen mit Brettspertholz

Arbeitspaket 5: Innovatives multifunktionales Brettspertholz

Arbeitspaket 6: Statische Bemessung

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität München (TUM)

Förderkennzeichen:

22034718

Laufzeit:

01.03.2019 bis 31.10.2022

Monat der Erstellung:

10/2022

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Zitiervorschlag Schlussbericht

Arnold, M. ; Schenk, M. ; Kainz, N. ; Dietsch, P. ; Cabrero, J. M. ; Maderebner R. ; Winter, S. (2022): *Schlussbericht zum Europäischen Forschungsvorhaben InnoCrossLam – Innovative Solutions for Cross Laminated Timber Structures; Arbeitspakete 5 und 6 (Deutschland)*. Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe; Gülzow-Prüzen.

Inhalt

I. Ziele und Gliederung des Europäischen Vorhabens	5
1. Gesamtziel	5
2. Arbeitspakete des Europäischen Forschungsvorhabens	6
3. Projektbearbeitung Deutschland.....	7
II. Kurzbericht	8
1. Aufgabenstellung	8
2. Resümee der wesentlichen Ergebnisse des Deutschen Projektpartners.....	8
2.1 Wesentliche Ergebnisse in AP5: Innovatives multifunktionales BSP	8
2.2 Wesentliche Ergebnisse in AP6: Statische Bemessung	9
3. Verwertung.....	10
3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	10
3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	10
3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	10
3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	10
3.5 Erkenntnisse von Dritten	11
3.6 Veröffentlichungen	11
III. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse im Arbeitspaket 5	13
1. Multifunktionales BSP zur thermischen Bauteilaktivierung.....	13
1.1 Allgemeine Informationen.....	13
1.2 Entwicklung, Produktion und Materialparameter der multifunktionalen Serien.....	14
1.2.1 Entwicklung der multifunktionalen BSP-Serien	14
1.2.2 Industrieller Fertigungsprozess der multifunktionalen CLT Serien.....	15
1.3 Experimentelle und analytische Untersuchungen der Festigkeits- und Steifigkeitsparameter von multifunktionalem BSP	18
1.3.1 Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul	18
1.3.2 Scheibenschubfestigkeit und Steifigkeit	19
1.3.3 Ermittlung der maximalen Knicklast	22
1.3.4 Torsionssteifigkeit.....	25
1.4 Klimatische Untersuchungen an multifunktionalem BSP	28
1.4.1 Versuchsvorbereitung.....	28
1.4.2 Klimatische Phasen der experimentellen Untersuchungen.....	29
1.4.3 Verformungsverhalten bei Feuchteänderung	30
1.4.4 Ausgleichsfeuchte.....	36
1.4.5 Rissverhalten der Außenlagen	37
1.4.6 Numerische Simulationen an 3D-FE Modellen	38
1.5 Untersuchungen zum Brandverhalten von multifunktionalem BSP	39
1.5.1 Analytische Ansätze und Untersuchungen	39
1.5.2 Experimentelle Untersuchungen	42
1.5.2.1 Versuchsvorbereitung	42
1.5.2.2 Versuchsdurchführung	44
1.5.2.3 Versuchsauswertung.....	45
1.6 Katalog Verbindungstechniken für multifunktionale Massivholz-Wandelemente.....	49

1.7	Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Forschung an multifunktionalem CLT	50
2.	Innovatives BSP mit diagonaler Lagen-Orientierung – Diagonal Laminated Timber (DLT).....	52
2.1	Allgemeine Erläuterungen.....	52
2.1.1	Ziel der Forschung an DLT.....	52
2.1.2	Bezeichnung und Abkürzung	53
2.1.3	Kontext	53
2.1.4	Ökonomie und Ökologie.....	53
2.1.5	Stand der Technik	54
2.2	Theoretische Grundlagen	55
2.2.1	Mechanik von orthotropen Laminaten.....	55
2.2.2	Schubkorrekturfaktor nach der Timoschenko-Balken-Theorie.....	55
2.2.3	Steifigkeitsparameter und effektive Steifigkeitsparameter	56
2.3	Experimentelle Untersuchungen.....	57
2.3.1	Umfang der Untersuchungen	57
2.3.2	Untersuchte Serien und Materialparameter	57
2.3.3	Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit von DLT	58
2.3.4	Biegesteifigkeit	61
2.3.5	Torsionssteifigkeit.....	62
2.3.6	Scheibenschubsteifigkeit.....	62
2.4	Verformungsanalyse und Ableitung eines Homogenisierungsgrades	65
2.4.1	Verformungsanalysen an großformatigen 2D-FE-Modellen	65
2.4.1.1	Allgemeine Informationen	65
2.4.1.2	Verformungsanalyse an 5-lagigen CLT und DLT Serien.....	65
2.4.1.3	Verformungsanalyse an 7-lagigen CLT und DLT Serien.....	67
2.4.2	Ableitung eines Homogenisierungsgrad	71
2.5	Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Forschung an DLT	72
3.	Literaturverzeichnis AP5.....	73
IV.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse in Arbeitspaket 6	77
1.	Allgemeines	77
1.1	Ziel und Gegenstand aus dem Antrag	77
1.2	Methodik und Überblick	77
2.	Einfache Modellierung und allgemeine Bemessungssituationen	78
2.1	Allgemeine Methoden der Modellierung	78
2.1.1	Allgemeines.....	78
2.1.2	γ -Verfahren.....	80
2.1.3	Schubanalogieverfahren	84
2.1.4	Starrer Verbund.....	87
2.1.5	Vergleich und Zusammenfassung der Modellierungsansätze	87
2.2	Einführung in die Bemessung von Brettsperrholz.....	88
2.2.1	Allgemeines.....	88
2.2.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT, ULS)	88
2.2.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG, SLS)	91
3.	Stand des Wissens in der Praxis	93

3.1	Digitaler Fragebogen.....	93
3.1.1	Methodik und Überblick	93
3.1.2	Information zu den Teilnehmern.....	93
3.1.3	Modellierung und Bemessung von Brettsperrholz.....	96
3.1.4	Anschlüsse und Verbindungen in Brettsperrholzkonstruktionen.....	103
3.1.5	Modellierung und Bemessung von Brettsperrholzkonstruktionen in erdbebengefährdeten Gebieten.....	105
3.1.6	Zusammenfassung der Umfrage	106
3.2	Interviews	107
3.2.1	Methodik und Überblick	107
3.2.2	Entwurf und Bemessung	107
3.2.3	Anschlüsse und Verbindungen.....	112
3.2.4	Zusammenfassung der Interviews.....	113
3.3	Zusammenfassung des Stands des Wissens in der Praxis.....	114
4.	Erweiterte Modellierung und komplexe Bemessungssituationen	115
4.1	Allgemeines.....	115
4.2	Erweiterte Modellierungs–Methoden.....	116
4.2.1	Laminattheorie	116
4.2.2	Leitfaden für die 2D-Modellierung mit der Laminattheorie	121
4.3	Erweiterte Bemessung von Brettsperrholz.....	122
4.3.1	Punktgestützte Brettsperrholzdecken.....	122
4.3.2	Brettsperrholzdecken mit Öffnungen	135
5.	Zusammenfassung der Ergebnisse in AP6: Statische Bemessung	144
6.	Literaturverzeichnis AP6.....	145
V.	Kurzbericht des Forschungsverbundes	149
1.	Project achievements.....	149
2.	Problems and their solutions (scientific and structural)	151
3.	Highlights of the collaboration (scientific and structural)	152
VI.	Anhang	153
1.	Anhang AP5.....	153
2.	Anhang AP6.....	158

I. Ziele und Gliederung des Europäischen Vorhabens

1. Gesamtziel

Die Entwicklung der letzten Jahre im Bereich mehrgeschossiger Holzbauten war bemerkenswert, Brettsperrholz spielt eine wichtige Rolle in dieser Entwicklung. Um den nächsten Schritt hin zu einer großflächigen Einführung dieser Bauweise tun zu können, sind jedoch Weiterentwicklungen und Innovationen in der Brettsperrholzbauweise notwendig. Wenn Massivholzprodukte ein ernstzunehmender Wettbewerber gegenüber mineralischen Baumaterialien wie Beton werden sollen, müssen sie Architekten und Ingenieuren eine vergleichbare Flexibilität im Einsatz bieten.

Das Hauptziel des Europäischen Forschungsvorhabens InnoCrossLam besteht darin, die Anwendbarkeit und Flexibilität von Massivholzelementen wie Brettsperrholz (BSP) für mehrgeschossige Gebäude und weitgespannte Tragwerke zu erweitern.

Der Hauptgedanke und die treibende Kraft hinter diesem Projektvorschlag ist die Weiterentwicklung der Verwendung von Massivholzprodukten wie CLT in neuen Bauanwendungen und in multifunktionalen Kontexten. Solche Entwicklungen werden durch einen transdisziplinären Ansatz erreicht, indem Themen wie Architektur und Design, Haustechnik (HVAC) und Bauingenieurwesen in die Projektarbeit integriert werden, in Kombination mit Forschung und Entwicklung, die auf der Anwendung fortschrittlicher theoretischer und experimenteller Ansätze basieren. Indem Architekten eingeladen werden und ihre Kompetenz als Motor des Projekts fungiert, werden in Zusammenarbeit mit führenden Bauingenieuren und Experten für Gebäudesysteme die Herausforderungen definiert, denen sich Planer und Industrie stellen müssen. So sollen neue praxisorientierte Lösungen für anspruchsvolle Entwurfsituationen entwickelt werden. Flexibilität ist dabei eines der Schlüsselwörter. Flexibilität im Sinne von z.B. flexiblen Grundrissen, auskragenden Strukturen, weit gespannten Systemen, effizienten Verbindungstechniken, effizienter Montage und Demontage von Bausystemen und dem Potenzial für zusätzliche Funktionalität.

Die Hauptziele des Projekts werden in sechs Arbeitspaketen (APs) behandelt, die in Kapitel I.2, Tabelle 1 aufgeführt und deren Ergebnisse als Forschungsverbund in Kapitel V zusammengefasst sind. Jedes Arbeitspaket wird von einem Europäischen Forschungspartner geleitet. Die Technische Universität München (TUM) leitet AP5 (Innovatives multifunktionales CLT), siehe Kapitel III. Die TUM trägt zusätzlich zur Bearbeitung von AP6 (Statische Bemessung) bei, siehe Kapitel IV.

Die beteiligten Forschungspartner sind:

- The Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG)
- Lund University, Sweden (LU)
- Vienna University of Technology, Austria (TUW)
- Technical University of Munich, Germany (TUM)
- University of Navarra, Spain (UNAV)

Die assoziierten Projektpartner aus Planung und Industrie sind:

- Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.
- The Association of Austrian Wood Industries
- Hermann Kaufmann & Partner ZT GmbH, Austria
- merz kley partner ZT GmbH, Austria
- Limträteknik AB, Sweden
- arrea, arhitektura d. o. o., Slovenia
- Swedish Wood, Swedish Forest Industries Federation
- White Arkitekter, Sweden
- Lignotrend Produktions GmbH
- Gaia Arkitektur AB
- CBD d.o.o.

2. Arbeitspakete des Europäischen Forschungsvorhabens

Tabelle 1 listet alle Arbeitspakete (APs) und projektbeteiligte Institutionen des Europäischen Forschungsvorhabens InnoCrossLam. Das Forschungsvorhaben hatte eine Laufzeit von insgesamt 3,5 Jahren und startete im März 2019.

Tabelle 1: Übersicht der Projektbeteiligten

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag inkl. Verlängerung)	Projektpartner
AP1 Management and transnational dissemination activities (Projektsteuerung und transnationale Öffentlichkeitsarbeit)	03/2019 bis 10/2022	Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG)
AP2 Components and Joints (Bauteile und Verbindungen)	03/2019 bis 10/2022	Lund University (LU)
AP3 Structural performance accessed by computational mechanics (Statische Leistungsfähigkeit anhand numerischer Mechanik)	03/2019 bis 10/2022	Technische Universität Wien (TUW)
AP4 Seismic behaviour (Verhalten unter seismischer Beanspruchung)	03/2019 bis 10/2022	Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG)
AP5 Innovative multifunctional CLT (Innovatives, multifunktionales Brettsperrholz (BSP))	03/2019 bis 10/2022	Technische Universität München (TUM)
AP6 Structural design (Statische Bemessung)	03/2019 bis 10/2022	University of Navarra, Pamplona (UNAV) Technische Universität München (TUM)

3. Projektbearbeitung Deutschland

Technische Universität München

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Arbeitspaket 5 (AP5):

Matthias Arnold, M.Sc.

Arbeitspaket 6 (AP6):

Martin Schenk, M.Sc.

Niklas Kainz, M.Sc.

Projektleitung und Beratung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Philipp Dietsch

(Projektleitung bis 03/20, Beratung 04/20 - 10/22)

Koordination des internationalen Verbundvorhabens

Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG)

Dr. Boris Azinović

Mitwirkende an der Erstellung des Fragebogens (AP6)

Dr. Boris Azinović • Prof. Erik Serrano • Henrik Danielsson, Ph.D. • Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Füssl • Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Lukacevic

Industriepartner zur Fertigung von Prüfkörpern

Lignotrend Produktions GmbH, D-79809 Weilheim-Bannholz

Pfeifer Holding GmbH, A-6460 Imst

Holzbau Unterrainer GmbH, A-9951 Ainet

KLH Massivholz GmbH, A-8842 Teufenbach-Katsch

Unterstützung durch studentische Hilfskräfte und Abschlussarbeiten

Studentische Hilfskräfte

Jakob Forster, B.Sc. • Johanna Jakoby, B.Sc. • Clara Hübner, B.Sc.

Abschlussarbeiten AP5

Christian Bauer, M.Sc. • Bernhard Braun, B.Sc. • Wolfgang Csokas, M.Sc. • Laura Dissler, B.Sc. • Thilo Donhauser, M.Sc. • David Fochler, M.Sc. • Jacob Forster, B.Sc. • Eileen Frölich, M.Sc. • Mirjam Fuchs, M.Sc. • Sophia Gabel, M.Sc. • Lukas Hafner, B.Sc. • Mirjam Fuchs, M.Sc. • Josip Kljajic, B.Sc. • Katharina Kögl, M.Sc. • Michael Kruse, M.Sc. • Imma Lukas, B.Sc. • Sebastian Niebauer, M.Sc. • Frederic Spreti, B.Sc. • Florian Vogel, M.Sc.

Abschlussarbeiten AP6

Simon Berkold, B.Sc. • Stjepan Lukic, B.Sc. • Clara Hübner, B.Sc. • Monika Kronthaler, B.Sc. • Martin Schenk, M.Sc. • Josef Saller, M.Sc. • Olivier Knepper, M.Sc. • Anja Husel, M.Sc. • Veronika Bauer, B.Sc. • Anna König, M.Sc.

II. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Die Arbeitspakete und Meilensteine des am Projekt beteiligten Fördermittelempfängers sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Darstellung der Arbeitspakete und Meilensteine des Fördermittelempfängers

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP5: Innovatives multifunktionales BSP		
M5.1 Detailentwürfe (Brandschutz, Schallschutz, Tragverhalten)	03/2020	D5.1 Entwurf Detailkatalog
M5.2 Analytischer Nachweis der Details	03/2021	D5.2 Bericht „Baubestimmungen und Nachweisführung“
M5.3 Experimentelle Untersuchungen	03/2022	D5.3 Leitfaden „Planung und Herstellung thermisch aktivierter BSP-Elemente“ Veröffentlichung
AP6: Statische Bemessung		
M6.1 Bestehende Modellierungsansätze	12/2019	D6.1 Bericht zum Stand der Technik
M6.2 Erweiterte Modellierungsansätze	03/2021	D6.2 Bericht zu erweiterten Modellierungsansätzen
M6.3 Bemessungsgleichungen	03/2022	D6.3 Abschlussbericht, Leitfaden, Normvorschläge

2. Resümee der wesentlichen Ergebnisse des Deutschen Projektpartners

2.1 Wesentliche Ergebnisse in AP5: Innovatives multifunktionales BSP

In Arbeitspaket 5 (AP5) wurden multifunktionale Massivholz-Wandelemente – multifunktional in Bezug auf eine thermische Aktivierbarkeit – in Richtung Anwendungsreife weiterentwickelt. Zusätzlich zum ursprünglichen Arbeitsplan wurden die mechanischen Eigenschaften von Massivholzelementen mit diagonaler Orientierung einzelner Lagen untersucht (Diagonallagenholz, Diagonal laminated timber – DLT). Diese sind innovativ in Bezug auf die Plattentragfähigkeit unter biaxialer Biegung und hinsichtlich Homogenisierungseffekten der Spannungsverteilungen über den Querschnitt.

Nach ersten analytischen Überlegungen wurden sechs verschiedene Serien von multifunktionalem BSP für die mechanischen und klimatischen Untersuchungen sowie für die Bestimmung des Feuerwiderstandes entwickelt und hergestellt (M5.1, D5.1). Die Druckfestigkeit und -steifigkeit, die Knicklast, die Scheibenschubfestigkeit und -steifigkeit sowie die Torsionssteifigkeit von multifunktionalen BSP wurden durch umfangreiche mechanische Versuchsreihen ermittelt (M5.2, M5.3, D5.2). Darüber hinaus wurde das Verformungsverhalten von multifunktionalem BSP unter Feuchteänderungen sowie eine mögliche Rissbildung in den Frontlagen (Decklagen) in Klimaexperimenten analysiert (M5.2, M5.3, D5.2, D5.3). Die Brandversuche zur Ermittlung des Beitrags der Multifunktionslagen zum Feuerwiderstand sowie des Verhaltens bei zirkulierenden Hohlkammerbränden wurden durchgeführt (M5.3). Die Ergebnisse der Brandversuche wurden mit analytischen Methoden verglichen (M5.2, D5.2). Parallel zur Forschung am multifunktionalen BSP wurden die Schubsteifigkeit, die Torsionssteifigkeit, die Biegesteifigkeit und die Scheibenschubsteifigkeit von DLT mittels experimenteller, analytischer und numerischer Untersuchungen ermittelt (M5.2, M5.3, D5.2, D5.3).

Zusammenfassend verspricht und unterstützt die Forschung innerhalb des AP5 eine effizientere zukünftige Nutzung von Massivholzelementen durch das Hinzufügen zusätzlicher Funktionalität oder diagonaler Lagenanordnungen. Die Ergebnisse der vorgestellten Forschung wurden bereits in einer hochrangigen internationalen Fachzeitschrift veröffentlicht und auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Darüber hinaus

wird derzeit eine Dissertation über die Forschungsergebnisse zu DLT fertiggestellt. Es werden Anleitungen für die Produktion, Dimensionierung und Implementierung in zukünftigen Märkten gegeben (D3.3). In naher Zukunft wird eine Reihe weiterer bereits in Arbeit befindlichen Veröffentlichungen über die Ergebnisse der in AP5 vorgestellten Forschung veröffentlicht werden.

2.2 Wesentliche Ergebnisse in AP6: Statische Bemessung

Im Arbeitspaket 6 (AP6) wurde mit Hilfe eines Online-Fragebogens, persönlicher Interviews und parallel entwickelter Dokumente – wie z. B. Veröffentlichungen (TUM+UNAV), Abschlussarbeiten (TUM+UNAV+LU) und der Beteiligung an einem Buch für Bemessungshinweise in Erdbebengebieten (UNAV+ZAG) – über den Stand der Technik der Bemessung mehrgeschossiger Gebäude in Brettsperrholz berichtet (M6.1). Die Arbeit im AP6 wurde von mehr als 150 Experten weltweit begleitet, die die Forschung und Forschungspläne maßgeblich unterstützt haben. An der Online-Umfrage und Interviews nahmen Ingenieure aus über 25 Ländern weltweit teil, darunter 15 EU-Mitgliedsstaaten sowie Überseenaationen wie Kanada und Neuseeland.

Ein gemeinsamer Workshop mit den Forschungspartnern und Industrievertretern zur Vorbereitung möglicher „Bemessungshilfsmittel“ anhand der bisher gewonnenen Ergebnissen der kollektiven Arbeit aller Partner (D6.1 und D6.2) wurde erfolgreich durchgeführt. Teilgenommen an diesem Workshop haben ca. 30 internationale Experten aus Ländern wie Österreich, Schweden und Neuseeland. Aus den Diskussionen des Workshops wurden weitere Schwerpunktthemen des Forschungsverbundes abgeleitet. Die Entwicklung praxistauglicher Bemessungshilfen konnte erfolgreich begonnen werden.

Die Erkenntnisse zu – für die Anwendung – wichtigen Kerngebieten der Forschung ermöglichten den europäischen Partnern u.a. Arbeiten an sprödem Versagen von Verbindungen und lateraler Stabilität von Brettsperrholzelementen (UNAV), sowie an Punktstützungen (TUM) und Öffnungen in Brettsperrholzdecken (TUM+UNAV) (M6.3). Die Versuche an der TUM zu Öffnungen in Brettsperrholzdecken wurden ausgewertet. Eine Veröffentlichung ist in Arbeit. Auf der Grundlage der Ergebnisse zum sprödem Versagen von Brettsperrholz-Verbindungen (UNAV) wurde der Entwurf der europäischen Bemessungsnorm angepasst (D6.3).

Der europäische Partner und Arbeitspaketleiter (UNAV) im AP6 hatte zu Projektbeginn seinerseits Schwierigkeiten auf nationaler Ebene Zuwendungsmittel zu erhalten. Auch die Arbeit der TU München war von diesen etwa ein Jahr lang dauernden Schwierigkeiten zum Teil beeinflusst. Die erfolgreiche Fristverlängerung durch ForestValue und angeschlossener Mitgliedsinstitute ermöglichte einen erfolgreichen Ausgleich mit Blick auf den Zeitverzug in der gemeinsamen Zusammenarbeit, obwohl die hierfür relevante Projektstelle der europäischen Partner in Spanien im Zeitraum 03/2022-10/2022 erneut unbesetzt geblieben war.

3. Verwertung

3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

In AP5 und AP6 keine.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

In AP5 zeigte sich durch die Produktion einer großen Anzahl von BSP Prüfkörpern, dass die Produktion von BSP Elementen mit Hohlkammern sowie von BSP mit diagonaler Orientierung einzelner Lagen im industriellen Maßstab in bestehende Produktionsstraßen integriert werden kann. Insbesondere die Erarbeitung eines Produktionsprozesses für BSP-Elemente mit Hohlräumen zusammen mit der Lignotrend Produktions GmbH zeigte, dass die Produktion von multifunktionalen BSP Prüfkörpern in bestehenden Fertigungsprozesse technisch und wirtschaftlich eingebunden werden kann.

Durch AP6 wurden vorhandene Wissenslücken in für die Praxis relevanten Forschungsgebieten der Modellierung und Bemessung mehrgeschossiger Brettsperrholzgebäude reduziert. Der Abbau von Unsicherheiten in Bezug auf die Modellierung und Bemessung solcher Konstruktionen trägt zu breiteren Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten von Brettsperrholz bei. Durch die zur Verfügung gestellten Erhöhungsfaktoren ist eine erste, einfache Vorabschätzung der Verformung von Brettsperrholzdecken mit Öffnungen im geprüften statischen System durch den Planer möglich ohne auf analytische Verfahren zurückgreifen zu müssen. Das damit skizzierte Bemessungsmodell ermöglicht die Festlegung der benötigten Querschnitte für die angestrebte Nutzung.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

In AP5 bestand die größte wissenschaftliche Herausforderung darin, die technischen und regulatorischen Anforderungen gemäß der "Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates" für ein multifunktionales BSP-Element zu erfüllen. Die hohe Anzahl der Anforderungen und die vertieften Untersuchungen zu 3 der 7 Anforderungen zeigten, dass es innerhalb von 3,5 Jahren Forschung kaum möglich ist, alle 7 Anforderungen in der notwendigen Tiefe zu erfüllen. Einige von ihnen gehören zu anderen Forschungsgebieten, wie der Bauphysik. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um zusätzliche Kennwerte der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften zu ermitteln und Aspekte der Hygiene zu untersuchen. Neben den Ergebnissen zu BSP ergaben die umfangreichen Untersuchungen zu DLT weiteren Forschungsbedarf und Arbeiten in der Normung, wie z.B. die Erweiterung der EAD 130005-00-0304, um Massivholzelemente mit Hohlräumen oder diagonal angeordneten Lagen zu erfassen. Da die Anordnung der Hohlräume zur thermischen Aktivierung sich nicht in den Randbereichen des BSP-Elementes befinden, ist die Anwendung herkömmlicher Verbindungssysteme für BSP auf thermisch aktivierte Wandelemente möglich. Bestehende Detailkataloge können verwendet werden.

Die Arbeit im AP6 wurde von mehr als 150 Experten weltweit begleitet, die die Forschung und Forschungspläne maßgeblich unterstützt haben. An der Online-Umfrage und Interviews nahmen Ingenieure aus über 25 Ländern weltweit teil, darunter 15 EU-Mitgliedsstaaten sowie Überseeationen wie Kanada und Neuseeland. Begleitdokumente Dokumente, wie z. B. diverse Veröffentlichungen (TUM+UNAV), Abschlussarbeiten (TUM+UNAV+LU) und ein Buch für Bemessungshinweise in Erdbebengebieten (UNAV+ZAG) wurden entwickelt. Auf der Grundlage der Ergebnisse zum spröden Versagen von Brettsperrholz-Verbindungen (UNAV) wurde der Entwurf der europäischen Bemessungsnorm angepasst.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Sehr erfreulich waren in AP5 waren die schnellen Fortschritte bei der zusätzlichen Forschung an Massivholzelementen mit diagonaler Lagen-Orientierung. Die ersten Untersuchungen zur Torsionssteifigkeit von multifunktionalen BSP waren vielversprechend, so dass an der TUM weitere Untersuchungen zu DLT initiiert wurden. Damit wurde die Basis für weitere Publikationen, Experimente und eine zukünftige Dissertation gelegt. Wir empfehlen dringend weitere Forschungen zu DLT in Bezug auf punktgestützte Massivholzdecken, dem Feuerwiderstand (einschließlich Untersuchungen zu Delaminierungseffekten) und dem Langzeitverformungsverhalten. Gemeinsam mit unseren Europäischen Forschungspartnern wurden weitere Anträge und Vorschläge für Forschungsprojekte ausgearbeitet, die multifunktionales BSP und DLT einschließen.

Die Forschung an DLT hebt die die Relevanz und Eignung diagonal ausgerichteter Lagen in Massivholzelementen für einen nachhaltigeren und effektiveren Umgang mit der Ressource Holz in besonderem Maße hervor. Detaillierte analytische und numerische Ergebnisse zu den Steifigkeitsparametern und das Aufzeigen der zugehörigen experimentellen Prüfverfahren ermöglichen und unterstützen die Erlangung der Marktreife von DLT.

Die Arbeit im AP6 evaluierte erfolgreich den Kenntnisstand zur Bemessung von mehrgeschossigen Brettsperrholzgebäuden in der Praxis. Dies konnte anhand eines digitalen Fragebogens und persönlicher Interviews mit ausgewählten Experten umgesetzt werden. Die beiden Fragebögen ergaben als kritischste Bemessungssituationen mit dem meisten Forschungsbedarf (i) Punktstützungen und konzentrierte Lasten, (ii) Öffnungen in Wänden und Decken und (iii) Anschlüsse und Verbindungen. Auch ergab der Fragebogen, dass unter den (iv) Materialparametern vor allem der Einfluss der Torsionssteifigkeit weithin unbekannt erscheint. Neben dem Grenzzustand der Tragfähigkeit wird aus den beiden Umfragen deutlich, dass die Themen (v) Schwingungen (Globalsystem und auf Bauteilebene), (vi) Dauerhaftigkeit (konstruktives Konzept und Langzeiteffekte) und (vii) Ausführung mit Einfluss auf die Bemessung (Feuchtigkeit und Imperfektionen) häufig Schwierigkeiten für die Praxis mit sich bringen. Dies kann durch neue Forschung an entsprechenden (a) Bemessungshilfsmitteln und (b) Anwendungsbeispielen weiter erfolgreich verbessert werden.

3.5 Erkenntnisse von Dritten

In AP 5 wurde über das gemeinsame Interesse an der Forschung an DLT sowie über den ursprünglichen Projektleiter Prof. Dietsch ein fachlicher Austausch mit der Universität Innsbruck und dem Karlsruher Institut für Technologie aufgebaut. Der Arbeitsbereich für Holzbau der Universität Innsbruck sowie der Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion des Karlsruher Instituts für Technologie verfolgen parallel zur TU München eigene Forschung am innovativen Bauprodukt DLT. Im Rahmen des Forschungsvorhabens kam es zu Kooperationen bei der Entwicklung und Beschaffung von Prüfkörpern sowie dem Austausch von Wissen. Zudem wurde ein gemeinsamer Artikel zur Torsionssteifigkeit von DLT in einem populären internationalen Journal veröffentlicht.

Arbeitspaket 6 behandelt die statische Bemessung von mehrgeschossigen Gebäuden in Brettsperrholzbauweise. Derzeit befinden sich die europäische Bemessungsnormen in Überarbeitung. Dieser Prozess wird seitens der TUM aufgrund des Vorsitzes den Normungsgremiums CEN/TC 250/SC 5 durch Prof. Winter (Leiter des deutschen Teilprojekts) eng begleitet. In den in AP6 untersuchten Schwerpunktthemen Punktstützungen und Öffnungen in BSP-Decken besteht, neben den in Kapitel IV.4 vorgestellten Arbeiten, keine Kenntnis über neue Erkenntnisse außerhalb des Verbundprojekts während der Projektlaufzeit.

3.6 Veröffentlichungen

Im Folgenden ist eine tabellarische Auflistung der Veröffentlichungen im Rahmen der jeweiligen Arbeitspakete gegeben. Zusätzlich sind Veröffentlichungen gegeben, welche sich in der Ausarbeitung oder im Review befinden. Tabelle 3 listet die Veröffentlichungen im Rahmen von AP5.

Tabelle 3: Veröffentlichungen AP5

No.	Veröffentlichung, Typ	Titel (Autor, Titel, Journal, Jahr)	DOI
1	Zeitschriftenartikel	M. Arnold, P. Dietsch, R. Maderebner, S. Winter, "Diagonal Laminated Timber—Experimental, Analytical, and Numerical Studies on the Torsional Stiffness", Construction and Building Materials, Volume 322, 126455, 2022	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126455
2	Zeitschriftenartikel (nicht veröffentlicht/ Review)	M. Arnold, P. Dietsch, S. Winter, "Diagonal Laminated Timber (DLT) – Teil 1: Bestimmung der Steifigkeitsparameter und Verformungsanalysen", (Bautechnik, Sonderheft Holzbau, voraussichtlich I/2023)	/
3	Zeitschriftenartikel (nicht veröffentlicht/ Review)	M. Arnold, P. Dietsch, S. Winter, "Diagonal Laminated Timber (DLT) – Teil 2: Teil 2: Spannungsanalysen und Markteinführung" (Bautechnik, Sonderheft Holzbau, voraussichtlich II/2023)	/
4	Konferenzbeitrag	M. Arnold, P. Dietsch, S. Winter, "Mechanical Properties of Multifunctional Cross Laminated Timber", WCTE 2020/21,	doi:10.14459/2021md1608914

5	Konferenzbeitrag (nicht veröffentlicht)	M. Arnold, P. Dietsch, S. Winter, „Hyperbolic Paraboloid Shells made of Diagonal Laminated Timber Elements“, WCTE 2023	/
6	Artikel für interessierte Kreise	M. Arnold, P. Dietsch, S. Winter, "Innovative Multifunctional CLT ", 2nd Stakeholder Article	/
7	Dissertation (nicht veröffentlicht/ Review)	M. Arnold: Mechanical Properties of Diagonal Laminated Timber (DLT) with Respect to Point-Supported Mass Timber Slabs, Technische Universität München, voraussichtlich 2023	/

Tabelle 4 listet die Veröffentlichungen im Rahmen von AP6.

Tabelle 4: Veröffentlichungen AP6

No.	Veröffentlichung, Typ	Titel (Autor, Titel, Journal, Jahr)	DOI
1	Konferenzbeitrag	Schenk M. ; González-Serna P. ; Cabrero J.M.: Future research on cross laminated timber (CLT) for multi-storey buildings – a questionnaire among engineers active in practice. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2020.	/
2	Artikel für interessierte Kreise	Azinovic, B. ; Pazlar, T. ; Danielsson, H. ; Serrano, E. ; Füssl, J. ; Lukacevic, M. ; Dietsch, P. ; Arnold, M. ; Schenk, M. ; Cabrero, J.M. ; InnoCrossLam 1st stakeholder article - Presenting the first-year progress. 2021.	/
3	Konferenzbeitrag	González-Serna, P. ; Schenk, M. ; Cabrero, J.M.: Parametric study on stress concentrations around openings in CLT plates loaded out-of-plane. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2021.	/
4	Zeitschriftenartikel	Schenk, M. ; Hübner, C. ; Cabrero, J.M. : Cross-Laminated Timber: A Survey on Design Methods and Concepts in Practice. CivilEng, Vol 3, 2022.	https://doi.org/10.3390/civileng3030036
5	Artikel für interessierte Kreise	Azinovic, B. ; Pazlar, T. ; Danielsson, H. ; Serrano, E. ; Füssl, J. ; Lukacevic, M ; Cabrero, J.M.; InnoCrossLam 3rd stakeholder article - Experimental and numerical investigations of CLT. 2022.	/
6	Konferenzbeitrag (noch nicht veröffentlicht)	Schenk, M. ; Husel A. ; Winter S.: Cross-laminated timber floors with openings – serviceability verifications, World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2023.	/

III. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse im Arbeitspaket 5

1. Multifunktionales BSP zur thermischen Bauteilaktivierung

1.1 Allgemeine Informationen

Die Bezeichnung multifunktionales BSP bezieht sich im Kontext dieser Forschungsarbeit auf BSP-Elemente, welche in einer ihrer Lagen über Hohlkammern (gefräste Kanäle) verfügen und zur thermischen Aktivierung des Bauteils genutzt werden können. Die thermische Aktivierung erfolgt über in den Kanälen zirkulierende und zuvor mittels eines Luftwärmetauschers konditionierte Luft (Abbildung 1, links). In einem vorherigen Forschungsvorhaben an der TU München wurde für das dargestellte Element der Proof of Concept erbracht [1] (Abbildung 1, rechts). Die Ergebnisse dieser Forschung sind im Rahmen einer Dissertation [1] und eines Schlussberichts [2] ausführlich beschrieben und wurden international veröffentlicht [3]. BSP Wandelemente mit Kanälen, in denen konditionierte Luft zirkuliert, ermöglichen die Konditionierung von Massivholzbauten, die den derzeit in Mitteleuropa geforderten Energiestandards entsprechen [1].

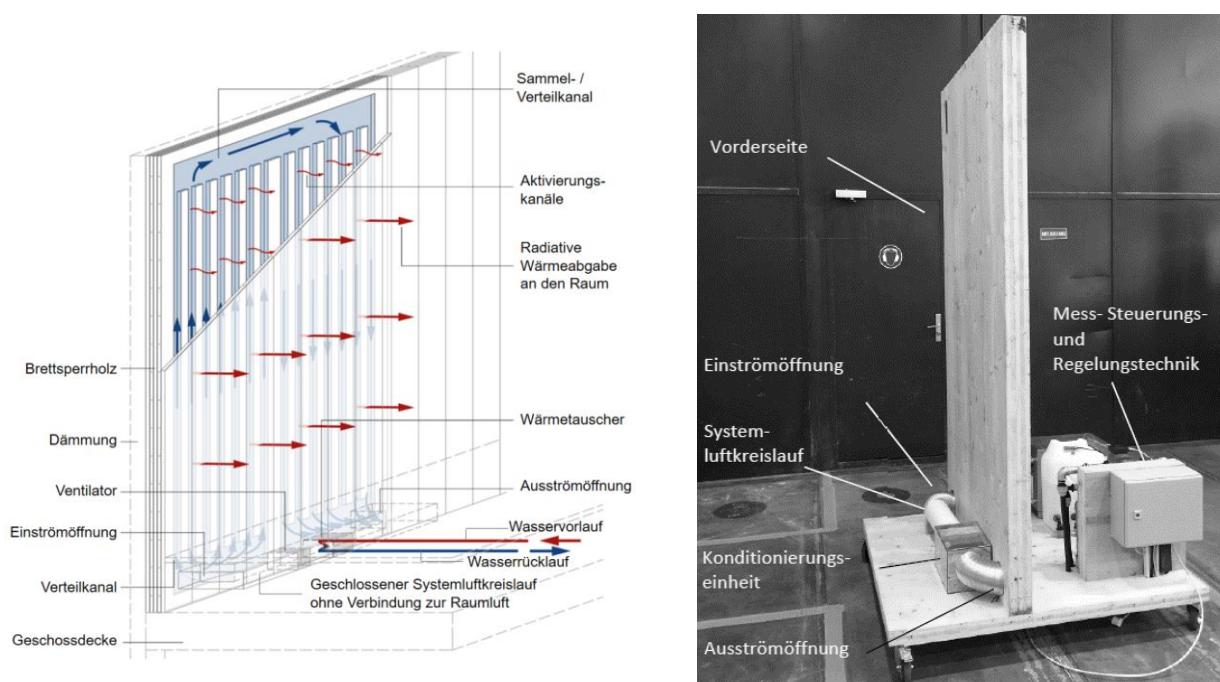


Abbildung 1: Grundprinzip der thermischen Bauteilaktivierung von Massivholzelementen durch konditionierte Luft [2] (links) und Prototyp eines multifunktionalen BSP Wandelementes [1] (rechts)

Bezogen auf die im vorherigen definierten Projektziele, gilt es für thermisch aktivierbares BSP die technischen und regulatorischen Anforderungen (Feuerwiderstand, Verformungsverhalten aufgrund von Feuchteänderung und mechanische Eigenschaften) zu erforschen sowie die Entwicklung eines wirtschaftlichen Produktionsprozesses aufzuzeigen. Die im folgenden aufgeführte Forschung orientiert sich hierbei an den sieben Grundanforderungen an Bauprodukte, entsprechend der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 [4].

Hauptaktivitäten: Untersuchung des Brandverhaltens sowie der mechanischen Eigenschaften von multifunktionalen Brettsperrholzelementen; Untersuchung des Verformungs- und Rissverhaltens der Elemente unter thermischer Beanspruchung; Numerische Simulationen und experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte; Aufzeigen von Lösungsvarianten zur Integration der Produktionsschritte für thermisch aktiviertes Brettsperrholz in laufende Produktionsprozesse.

1.2 Entwicklung, Produktion und Materialparameter der multifunktionalen Serien

1.2.1 Entwicklung der multifunktionalen BSP-Serien

Maßgebende Grundlage für die Entwicklung thermisch aktivierbarer BSP-Prototypen sind die Forschungsergebnisse von Mindrup [1]. Basierend auf den Erkenntnissen zur Robustheit (Rissverhalten der Decklage) sowie den thermischen Leistungsdaten (Intensität [W/m^2]) wurden in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern insgesamt sechs Versuchsserien mit unterschiedlichem Aufbau (Layout) entwickelt (vgl. Abbildung 2).

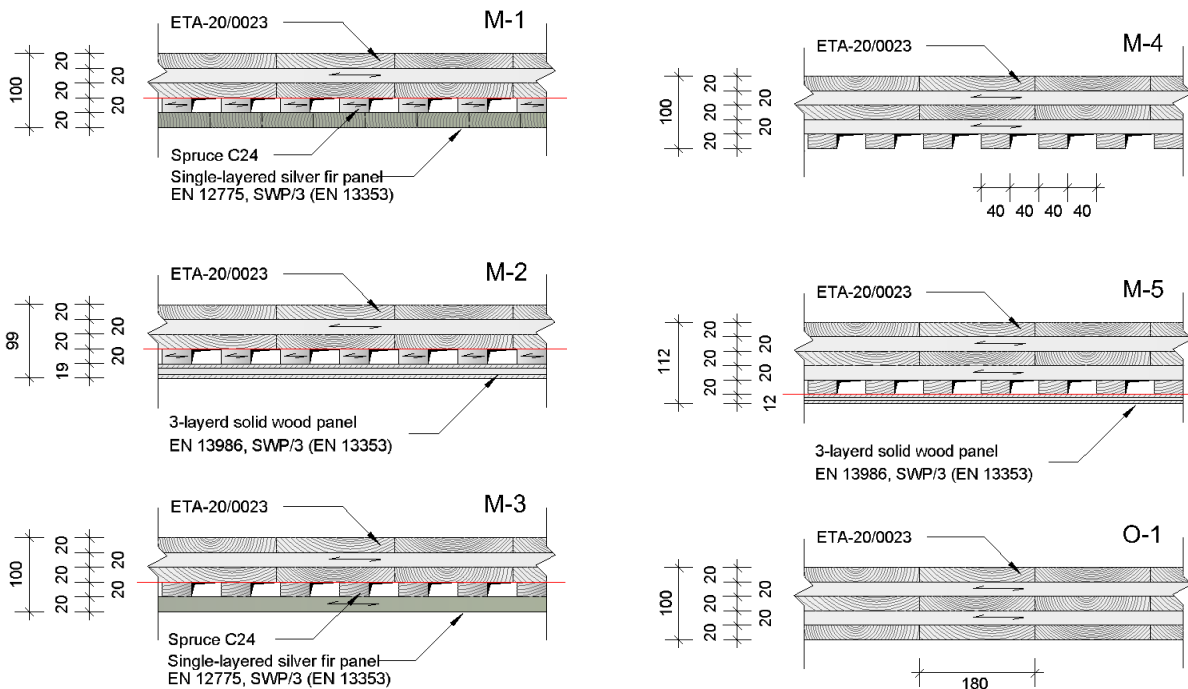


Abbildung 2: Aufbau der für die experimentellen Untersuchungen hergestellten multifunktionalen BSP-Serien

Die Basis der multifunktionalen Serien M-1 bis M-3 (Abbildung 2, links) bilden 3-lagige BSP-Elemente, welche nicht an den Schmalseiten verklebt sind. Die Dicke der einzelnen Lagen beträgt jeweils $t_i = 20$ mm, die Brettbreite ist $w = 180$ mm. Das Ende der jeweiligen BSP-Grundelemente ist durch die rote Linie in Abbildung 2 dargestellt. Auf dem BSP-Grundelement aufbauend befindet sich die Funktionslage (4. Lage) aus Nadelholz der Güte C24 (T14). In dieser befinden sich die 40 mm breiten Hohlkammern, welche durch einen jeweils 40 mm breiten Steg voneinander getrennt sind. Den Abschluss der multifunktionalen Serien M-1 und M-3 bildet eine luftdichte (schmalseitenverklebte) Massivholzlage aus Weißtanne mit der Dicke $t_i = 20$ mm. Die Außenlage der Serien M-2 besteht aus einer Mehrschicht-Massivholzplatte mit der Dicke $t_i = 19$ mm und der Güte SWP/3 (SWP - solid wood panel, 3-layered, 5-9-5 mm). Serie M-1 entspricht dem Aufbau von Prototyp B nach Mindrup [1].

Die Serien M-4, M-5 und O-1 haben 5-lagige BSP-Elemente zur Basis. Diese stammen aus der gleichen Fertigung, wie die 3-lagigen BSP-Elemente und sind ebenfalls nicht an den Schmalseiten verklebt. Die Brettbreite w beträgt 180 mm. In den multifunktionalen Serien M-4 und M-5 befinden sich jeweils in der fünften Lage des BSPs die Kanäle mit einer Breite von 40 mm. Serie M-4 besitzt keine Außenlage. Diese kann später bauseits aufgebracht werden. Je nach Art der Verwendung der Kanäle (thermische Aktivierung oder als Installationsebene) wird die Lage entsprechend nach Robustheit oder Optik gewählt und bauseits aufgeklebt oder aufgeschraubt. Alle weiteren Serien stellen Variationen der Serie M-1 dar. Die Außenlage der Serie M-5 besteht aus einer Mehrschicht-Massivholzplatte mit der Dicke $t_i = 12$ mm und der Güte SWP/3 (SWP - solid wood panel, 3-layered, 3-6-3 mm). Serie O-1 bildet die Referenzserie und besteht aus einem 5-lagigen BSP-Element ohne Kanäle.

Tabelle 5 fasst die gewählten Serien und ihren jeweiligen Lagenaufbau zusammen.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Prüfserien

Series	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	O-1
Layer	5	5	5	5	6	5
Layout	1	20	20	20	20	20
	2	20	20	20	20	20
	3	20	20	20	20	20
	4	¹⁾ 20	¹⁾ 20	¹⁾ 20	20	20
	5	²⁾ 19	³⁾ 19	²⁾ 19	¹⁾ 20	¹⁾ 20
	6	/	/	/	/	³⁾ 12

¹⁾ layer with channels; width and distance of the channels $w_{ch} = e_{ch} = 40$ mm

²⁾ 1-layered solid wood panel

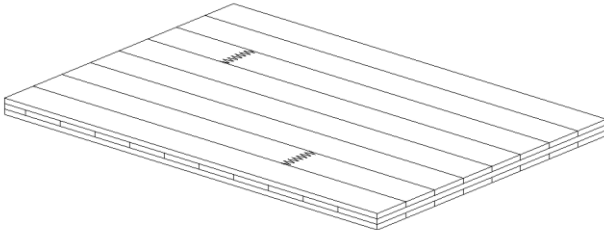
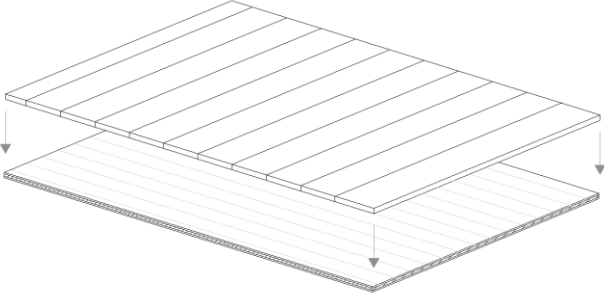
³⁾ 3-layered solid wood panel

1.2.2 Industrieller Fertigungsprozess der multifunktionalen CLT Serien

Für die Produktion der multifunktionalen BSP-Serien stellte der Industriepartner Pfeifer Timber GmbH insgesamt 30 drei- und fünflagige BSP-Elemente (1,25 m x 3,0 m) zur Verfügung. Diese BSP-Grundelemente besitzen eine Europäische Technische Zulassung, ETA-20/003 [5]. Die Fertigung der Funktions- und Decklagen, das Fräsen der Kanäle sowie das Fügen zum multifunktionalen BSP-Element wurde durch die Lignotrend Produktions GmbH durchgeführt.

Zusammen mit der Lignotrend Produktions GmbH wurde geplant, wie die Fertigung von multifunktionalem BSP mit Kanälen zur thermischen Aktivierung in die bestehenden Fertigungsprozesse technisch und wirtschaftlich eingebunden werden kann. Das Einbringen der Kanäle in der Funktionslage ist der aufwendigste Arbeitsschritt bei der Herstellung des multifunktionalen BSPs, da dieser von der herkömmlichen Produktion abweicht. Hier galt es eine zeit- und kostengünstige Lösung zu finden. Die grundlegenden Prozesse und Arbeitsschritte zur Erstellung von multifunktionalem BSP sind in Tabelle 6 skizziert und beschrieben:

Tabelle 6: Produktionsschritte für multifunktionales BSP

Skizze der Produktionsschritte	Beschreibung
	<p>1. Schritt: Herstellung der BSP-Basiselemente</p> <p>Fertigung der BSP-Basiselemente unter Beachtung des gewählten Baurastermaßes und der Wandhöhe (beispielsweise $l/b = 1,25$ m/3,00 m).</p> <p>Die Basiselemente können schmalseitenverklebt sein, müssen dies jedoch nicht sein. Die Luftdichtheit bei 3 oder mehr Lagen des BSP-Basiselements kann vorausgesetzt werden.</p>
	<p>2. Schritt: Herstellung der Funktions- und Decklagen</p> <p>Erstellen der 2-lagigen Elemente aus Funktions- und Decklage. Hierbei können zwei schmalseitenverklebte Massivholzlagen oder eine Massivholzlage und eine Mehrschicht-Massivholzplatte miteinander verklebt werden. Die Wahl der Funktions- und Decklagen beeinflussen die späteren Eigenschaften (Tragverhalten, Feuerwiderstand, Verformungsverhalten unter Feuchteänderung).</p>

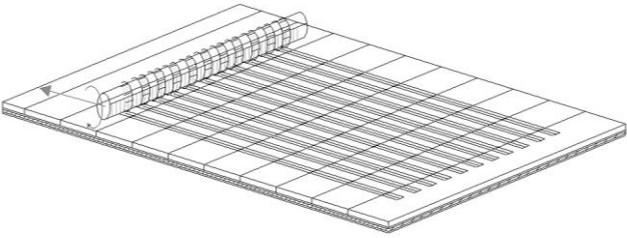
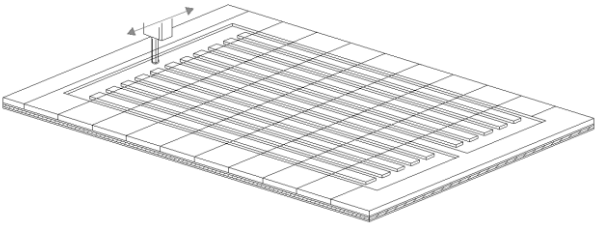
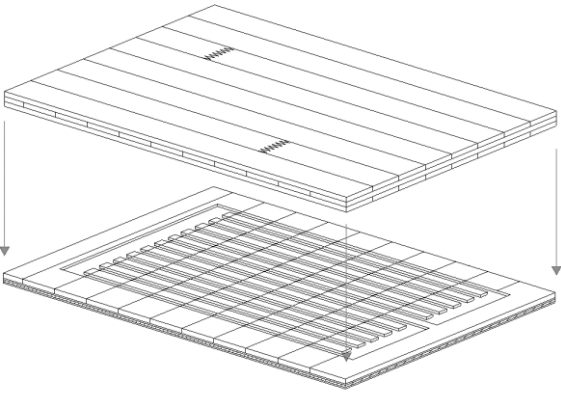
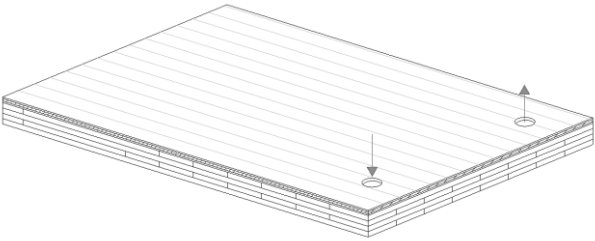
Skizze der Produktionsschritte	Beschreibung
	<p>3. Schritt: Fräsen der Längskanäle in der Funktionslage</p> <p>Über 90% der Kanäle im multifunktionalen BSP-Wandelement verlaufen parallel zueinander vom Wandkopf zum Wandfuß in der Funktionslage (Längskanäle in lokale x-Richtung, bezogen auf das Wandelement). Diese Kanäle werden mittels einer liegenden Walzenfräße – ähnlich einem Hobel – in das Element eingebracht.</p> <p>Um Zeit zu sparen, können die Längskanäle optional über die gesamte Wandlänge durchgehend gefräst werden. In diesem Fall sind in einem Zwischenschritt die Längskanäle am Wandkopf oder Wandfuß durch eingeklebte Holzeinsätze oder Montageschaum zu verschließen.</p>
	<p>4. Schritt: Fräsen der Querkanäle in der Funktionslage</p> <p>Die Verbindungskanäle am Wandkopf oder Wandfuß in Querrichtung (lokale y-Richtung) dienen der Erstellung des geschlossenen Kreislaufes für die Luftzirkulation und werden manuell oder automatisiert mit einer stehenden Walzenfräse eingebracht.</p> <p>Die Form, Richtung oder Ausrundung der Querkanäle am Wandkopf und Wandfuß kann strömungsmechanisch optimiert werden. Hierzu wurden im Forschungsvorhaben PhyTAB [6] umfangreiche Untersuchungen durchgeführt.</p>
	<p>5. Schritt: Verkleben der BSP-Basiselemente mit den 2-lagigen Elementen aus Funktions- und Decklagen</p> <p>Die BSP-Basiselemente werden mit den 2-lagigen Elementen, bestehend aus Funktions- und Decklage, verklebt. Anschließend erfolgt der finale Abbund der Elemente.</p> <p>Der Klebstoff kann vollflächig auf das BSP-Basiselement aufgetragen werden, was zu einer zusätzlichen Versiegelung der Brettstöße führt (Luftdichtheit). Jedoch verbleiben hierdurch auch Kleberückstände in den Kanälen, was die Strömungsgeschwindigkeit verringern kann. Optional kann der Klebstoff gezielt auf den Funktionslagen aufgebracht werden.</p>
	<p>6. Schritt: Montage auf der Baustelle</p> <p>Die Montage auf der Baustelle erfolgt analog zu Standard BSP-Wandelementen. Hierbei können je Nutzungseinheit auch nur einzelne Massivholzelemente über Kanäle verfügen und somit thermisch aktivierbar sein (vgl. [3], Kapitel 6.4: Leistungsbetrachtung auf Raumebene). Der Ein- und Auslass der Kanäle am Wandfuß kann bauseits mit einer Lochsäge hergestellt/eingebohrt werden. Der Anschluss an die Haustechnik (Wärmetauscher und Ventilator) erfolgt ebenfalls bauseits.</p>

Abbildung 3 zeigt einige der in Tabelle 6 beschriebenen Produktionsschritte zur Herstellung der multifunktionalen BSP-Elemente bei der Lignotrend-Produktions GmbH.



2. Schritt: Herstellung der Funktions- und Decklagen



5. Schritt: Verkleben der BSP-Grundelemente mit den 2-lagigen Elementen aus Funktions- und Decklagen



Schnitt durch die fertigen multifunktionalen BSP-Elementen (A1 = Serie M-1, A2 = Serie M.2)

Abbildung 3: Fertigung der multifunktionalen BSP-Serien bei der Lignotrend Produktions GmbH

Anders als bei den Versuchskörpern von Mindrup [12] bilden die Kanäle der für das Forschungsvorhaben InnoCrossLam produzierten Prüfkörper kein in sich geschlossenes System, sondern verfügen über Längskanäle über die gesamte Länge des jeweiligen Elementes oder Prüfkörpers gefräst. Quer zur den Fasern der Decklage verlaufende Kanäle sind nicht vorhanden; Produktionsschritt 5 wurde ausgelassen (s. Tabelle 6). Hintergrund ist, dass diese Forschung nicht die Bestimmung der thermischen und hydraulischen Leistungsdaten der Serien im Heiz- oder Kühlbetrieb beinhaltet. Die thermischen und hydraulischen Leistungsdaten von geschlossenen Zirkulationssystemen in den Funktionslagen wurden bereits durch vorherige Forschungsarbeiten ermittelt [1, 2, 3]. Für die Untersuchungen im Forschungsvorhaben InnoCrossLam wird der durch Längskanäle „geschwächte“ Querschnitt in Wandmitte betrachtet. Dieser bildet sowohl das bemessungsrelevante Schubfeld und Scheibenschubbeanspruchung, als auch den bemessungsrelevanten Bereich unter Biegezugbeanspruchung.

1.3 Experimentelle und analytische Untersuchungen der Festigkeits- und Steifigkeitsparameter von multifunktionalem BSP

1.3.1 Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

Die Lieferung der Prüfkörper erfolgte im Februar 2020. Die Prüfkörper wurden anschließend in den Klimakammern der MPA BAU der Technischen Universität München klimagerecht bis zur jeweiligen Vorbereitung/Prüfung der Serien gelagert.

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit und des E-Moduls der hergestellten Serien M-1 bis M-5 und O-1, wurden Druckversuche nach EN 408 [7] durchgeführt (Abbildung 4).

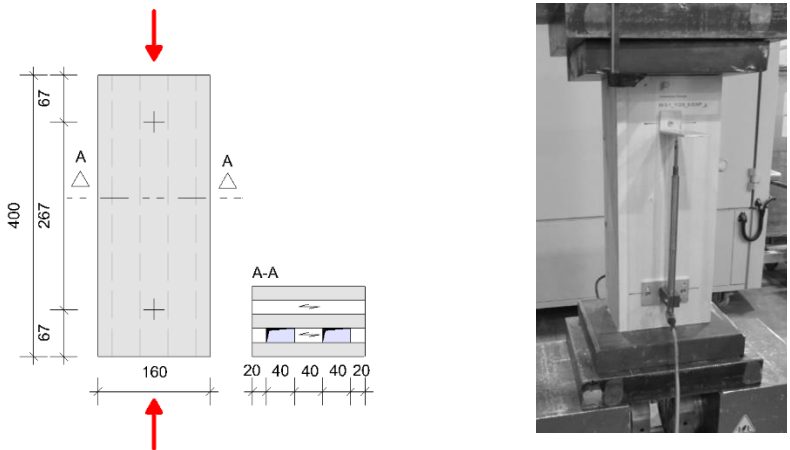


Abbildung 4: Versuchsaufbau der Druckversuche am multifunktionalen BSP, Maße in [mm]

Die Ergebnisse der Druckversuche nach EN 408 [7] sind in Abbildung 5 gegeben (Druckfestigkeit und E-Modul). Bei der Ermittlung der Druckfestigkeit und des Druck-E-Moduls werden nur die Querschnittsanteile mit Faserrichtung parallel zur Belastungsrichtung (lokale x-Richtung) berücksichtigt. Für die Referenzserie O-1 wird ein Mittelwert für die Druckfestigkeiten $f_{c,o,mean}$ von 34,3 MPa erreicht.

Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls für die Referenzserie O-1 beträgt 10 282 MPa (Abbildung 6). Im Vergleich dazu wird in ETA-20/003 [5] der Wert des E-Moduls mit 11 000 MPa angegeben. Der Maximalwert des E-Moduls wird von der Serie M-4 erreicht. Die teilweise höheren Druckfestigkeiten und E-Moduln der multifunktionalen BSP-Serien mit Kanälen lassen sich mit der hohen Qualität der Außenlagen (5. Schicht) teilweise in Kombination mit der Orientierung der Faserrichtung der Außenlage (4. Schicht) erklären.

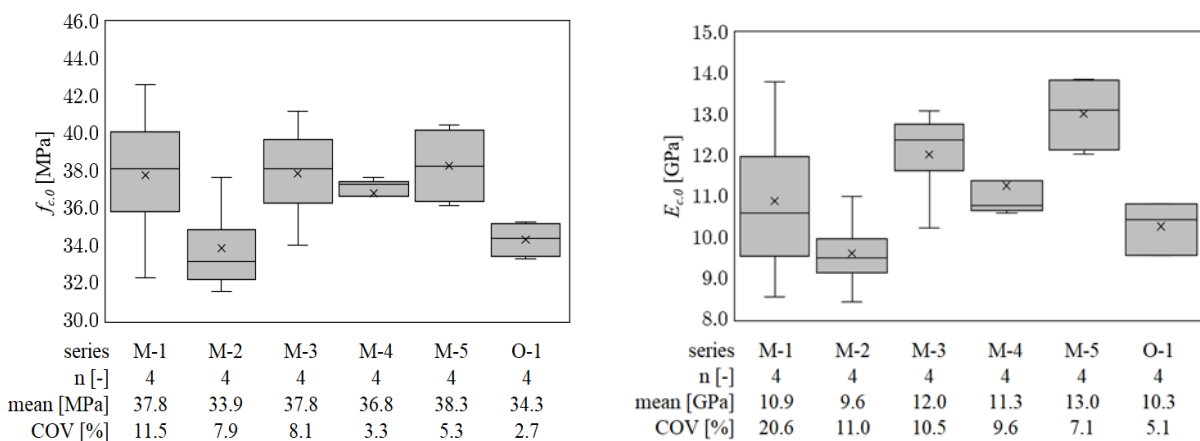


Abbildung 5: Druckfestigkeit (links) und Druck-Elastizitätsmodul (rechts) aller Serien

1.3.2 Scheibenschubfestigkeit und Steifigkeit

Die Scheibenschubversuche werden nach dem von Kreuzinger & Sieder [8] vorgeschlagenen Prüfverfahren durchgeführt, wobei drei Proben ($b/h = 500 \text{ mm}/1250 \text{ mm}$) jeder Serie unter einem Kraft-Faser-Winkel von 45° belastet werden (Abbildung 6).

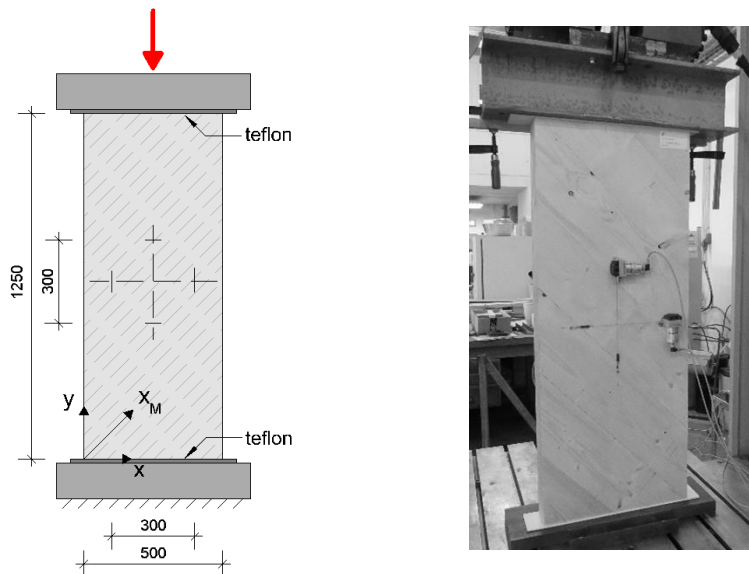


Abbildung 6: Versuchsaufbau der Scheibenschubversuche am multifunktionalen BSP, Maße in [mm]

Der Feuchtigkeitsgehalt jedes Probekörpers wurde vor der Prüfung mittels Rammelektroden in 15 mm tiefe gemessen und lag vor der Prüfung im Bereich von $12 \pm 2\%$ ($u_{mean} = 10,7\%$; $COV 4,3\%$). Am Kopf- und Fuß der Prüfkörper wird eine Teflon-Lage zwischengelegt, um die Reibung zu minimieren. Die vertikalen und horizontalen Verformungen werden auf beiden Seiten des Probekörpers über eine Länge von 300 mm mit Hilfe von Seilzug-Wegaufnehmern gemessen (s. Abbildung 6).

Um die Ergebnisse der Prüfung auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von multifunktionalem BSP zu übertragen, wird im Folgenden ein Berechnungs- und Auswertungsverfahren vorgeschlagen, das die gefrästen Kanäle berücksichtigt:

Die Versagensmechanismen der Brettsperrholzelemente geben Aufschluss über den tatsächlichen Einfluss der Kanäle auf die Scheibenschubtragfähigkeit (Tabelle 8). In Anlehnung an die Berechnungsmethode nach Brandner & Dietsch [9] wird die Scheibenschubfestigkeit für nicht schmalseitenverklebtes BSP aus der gemessenen Druckkraft F nach Gleichung (AP5-1) berechnet:

$$f_{v,net} = \frac{F}{2b \cdot d_{90}} \cdot \left(1 - \frac{E_{90}}{d_{90} \cdot E_0 + d_0 \cdot E_{90}} \right) \quad (\text{AP5-1})$$

Die Funktionslagen einschließlich der Kanäle (40/20 mm) sind nicht steif genug, um einen Sperreffekt zu erzielen, und werden daher in Gleichung (AP5-1) nicht berücksichtigt.

Das Abbrechen der Funktionslagen führt zu mehrteiligen Querschnittselementen, welche rechnerisch einzeln betrachtet werden müssen. Für die Serie M-1 ergibt sich zum Beispiel ein dreilagiges, nicht schmalseitenverklebtes BSP-Element [20-20-20] und ein zweites Querschnittselement, bestehend aus der Frontlage (SWP). Die Netto-Schubfestigkeit errechnet sich somit aus der gemessenen Druckkraft F für das jeweilige BSP-Grundelement [20-20-20] abzüglich der durch den Frontlagen aufgenommenen Kraftkomponente F^\wedge . Für die Frontlagen der Serie M-1 und M-3 ergibt sich bei einer angenommenen Schubfestigkeit für Weißtanne von $f_v = 4,0 \text{ MPa}$ eine Kraftkomponente F^\wedge von 83,4 kN (Gleichung AP5-2).

$$F^\wedge = \tau_{xM,yM} \cdot 2 \cdot A = \frac{f_v}{\left(1 - \frac{E_{90}}{E_{yM}} \right)} \cdot 2 \cdot A \quad (\text{AP5-2})$$

Die Schubmoduln (Scheibenschub) werden gemäß Gleichung (AP5-3) nach der von Kreuzinger & Sieder [8] vorgeschlagenen Methode berechnet, um den Einfluss von Verformungen durch andere Spannungen als Schubspannungen möglichst gering zu halten (beispielsweise Verformungen infolge von Druckspannungen längs zur Faser) [9].

$$G_{xM,yM} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_y} - \frac{1}{E_{xM}} - \frac{1}{E_{yM}}\right)} \quad (\text{AP5-3})$$

In Tabell 7 sind die Versagensmechanismen der untersuchten Serien aufgelistet. Bei fast allen Prüfkörpern ist im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) ein Netto-Schubversagen im BSP-Basiselement mit einem gleichzeitigen Abbruch der Funktionslagen zu beobachten.

Tabelle 7: Versagensmechanismen unter Scheibenschub

Prüfkörper	Versagensmechanismus
M-1-1	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+shear failure front layer
M-1-2	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+ channels breaking off
M-1-3	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+shear failure front layer
M-2-1	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+shear failure front layer
M-2-2	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+shear failure front layer
M-2-3	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+shear failure front layer
M-3-1	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+channels breaking off
¹⁾ M-3-2	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]
M-3-3	net-shear failure 2 nd layer [20-20-20]+channels breaking off
M-4-1	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20]+channels breaking off
M-4-2	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20]+channels breaking off
M-4-3	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20]+channels breaking off
M-5-1	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20]+shear failure front layer
M-5-2	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20]+shear failure front layer
M-5-3	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20]+shear failure front layer
O-1-1	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20-20]
O-1-2	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20-20]
O-1-3	net-shear failure 2 nd and 4 th layer [20-20-20-20-20]

¹⁾ faulty gluing of the front layer - specimen is not taken into account

In Tabelle 8 sind die berechneten Werte für die Druckkraft der mehrteiligen Querschnitte, des CLT-Grundelements F_0 (mit $f_{v,net} = 10,0$ MPa nach [10]) und der Frontlagen F angegeben. Die Summe dieser Kräfte ergibt die theoretisch Prüfkraft F_{th} . Zum Vergleich werden die Mittelwerte der während des Versuchs gemessenen Druckkräfte angegeben. Zusätzlich wird die prozentuale Abweichung zwischen dem erwarteten Wert F_{th} und dem gemessenen Wert F_{mean} angegeben. Die gute Annäherung bestätigt die Berechnungsmethode nach Brandner & Dietsch [9] unter Berücksichtigung der Kraftkomponenten der Funktions- und Frontlagen.

Tabelle 8: Berechnete und gemessenen Prüfkräfte

Series	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	O-1
¹⁾ F_0 [kN]	222.1	221.2	221.2	390.7	390.7	439.2
²⁾ F [kN]	83.4	79.2	83.4	/	50.0	/
³⁾ F_{th} [kN]	304.6	300.4	304.6	390.7	440.7	439.2
⁴⁾ F_{mean} [kN]	269.9	300.8	272.2	321.6	389.9	378.9
deviation [%]	12.9	0.1	11.9	21.5	13.0	15.9

¹⁾ force component calculated for the basic element [20-20-20] / [20-20-20-20]

²⁾ force component calculated for the front-layer

³⁾ results of the theoretical investigations

⁴⁾ results of the mechanical testing

Abbildung 7 zeigt die Netto-Scheibenschubfestigkeiten aller Serien (links) sowie die Schubmoduln, berechnet nach der Methode von Kreuzinger & Sieder [8] (rechts).

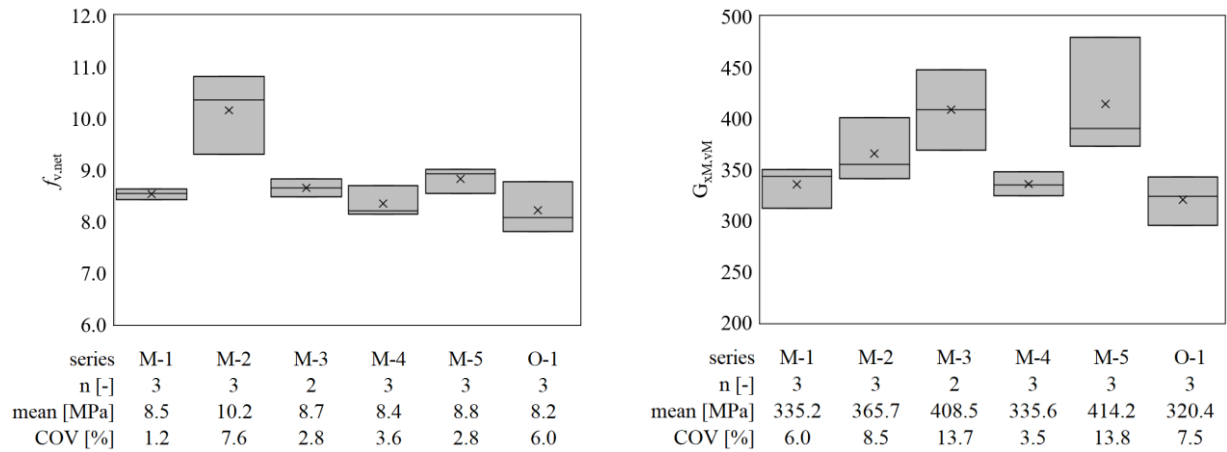


Abbildung 7: Netto-Scheibenschubfestigkeit (links) und Schubmodul (rechts) aller Serien

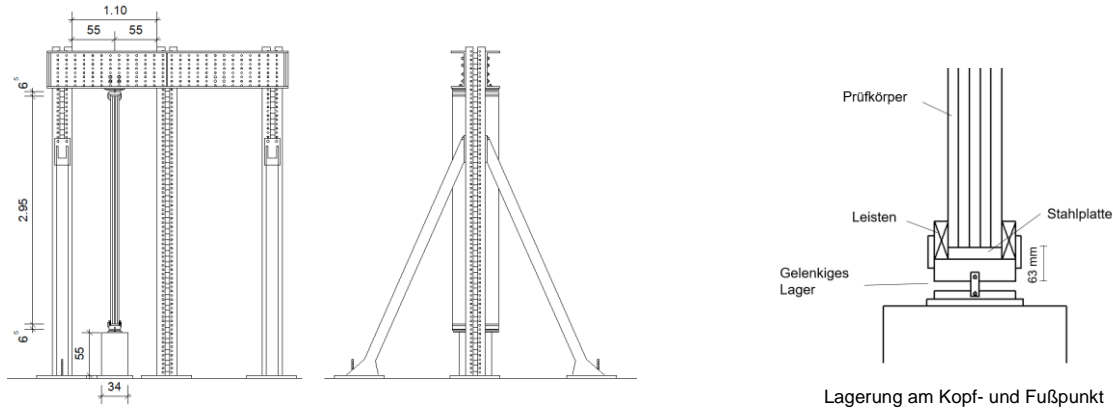
Der positive Einfluss der dreilagigen SWP ist offensichtlich und resultiert in der hohen Netto-Scheibenschubfestigkeit von Serie M-2. Aufgrund des ähnlichen Aufbaus sind die Schubfestigkeiten der Serien M-1 und M-3 nahezu identisch und liegen auf dem gleichen Niveau, wie die der Referenz BSP-Serie O-1.

Weiterführende Auswertungen finden sich in einer Master Thesis [11], welche die Versuchsvorbereitung, und -durchführung begleitete.

1.3.3 Ermittlung der maximalen Knicklast

Ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Tragfähigkeit von multifunktionalen BSP-Wandelementen ist die Knicklast. Zu diesem Zweck werden vier Wandelemente ($b/h = 500 \text{ mm}/2950 \text{ mm}$) jeder Serie bis zum Versagen durch Knicken belastet. Dabei wird die Last, die horizontale Durchbiegung sowie die Dehnungen in den Außenlagen über die Zeit dokumentiert.

Die Knickversuche wurden im Materialprüfamt der TUM in einem speziell für diese Untersuchungen entwickelten Versuchsaufbau durchgeführt. Diese besteht aus einem Versuchsrahmen mit zwei Stützen und einem Querhaupt. Die Versuchsvorbereitung und -durchführung sowie Teile der Auswertung wurden durch eine Master Thesis begleitet [12]. Abbildung 8 zeigt den Versuchsaufbau.



Lagerung am Kopf- und Fußpunkt

Abbildung 8: Darstellung des gesamten Versuchszustandes zur Durchführung von Knickversuchen an BSP, Maße in [m] und [cm] [12]

Die gelenkige Lagerung wurde speziell für Knickprüfungen angefertigt. Die Lager werden Hydraulikzylinder bzw. am Querhaupt befestigt. An die Enden der Prüfkörper werden Stahlplatten befestigt, die mit einem Nut-Feder-System in das gelenkige Lager passen und somit die Prüfkörper in ihrer Lage sichern. Die Knicklänge der Prüfkörper besteht aus dem Abstand der gelenkigen Lagerung und somit aus der Summe der Prüfkörperlänge und der Höhe der Plattenkonstruktion, die jeweils oben und unten 63 mm beträgt. Die Knicklänge beträgt somit $l = 3,076 \text{ m}$. Das Statische System sowie ein im Versuchszustand eingebauter Prüfkörper sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Verformung wird mittels drei Laser-Wegmesssensoren aufgezeichnet. Zusätzlich sind in Wandmitte beidseitig jeweils 3 Dehnmessstreifen auf den Außenlagen aufgeklebt.

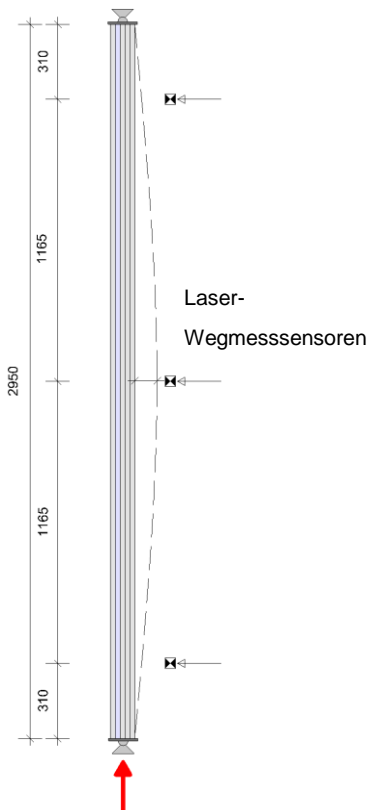


Abbildung 9: Versuchsaufbau der Knickversuche am multifunktionalen CLT [mm]

Die Prüfung wird kraftgesteuert mit einer Rate von 2 kN/s durchgeführt. Die Holzfeuchte der Prüfkörper vor der Prüfung betrug $u_{mean} = 11,9\%$ (COV 7,9%). Die drei Laser-Wegmesssensoren am Wandkopf, Wandfuß und in Wandmitte ermitteln nicht nur die Krümmung der Wandelemente über die Zeit, sondern gewährleisten auch die exakte und vertikale Positionierung aller Prüfkörper beim Einbau in den Versuchsstand. Mögliche Vorkrümmung e_0 aus der Produktion oder Lagerung der Prüfkörper werden hierbei zusätzlich gemessen und berücksichtigt (Tabelle 10). Die Prüfkörper werden in ihrer geometrischen Mitte belastet, d. h. ohne von außen aufgetragene Exzentrizität. Nur einer von vier Probekörpern der Referenzserie O-1 wird mit einer Exzentrizität von je 20 mm am Wandkopf und Wandfuß geprüft.

Um im Anschluss an die Versuche zu zeigen, dass die Berechnung der Knicklasten von Massivholzelementen mit asymmetrischem Aufbau und Kanälen auch durch theoretische Berechnungsmethoden abgedeckt ist, werden für jede Serie die erforderlichen Steifigkeits- und Festigkeitsparameter ermittelt (Tabelle 9). Der asymmetrische Aufbau führt zu einer Verschiebung des Schwerpunkts eines jeden Elements und damit zu einer inneren Exzentrizität e_0 . Diese Exzentrizität wird u.a. bei der Berechnung der Biegesteifigkeiten nach der im Nationalen Anhang zu EC5 [13] erläuterten Schubanalogieverfahren [14] berücksichtigt. Die Mittelwerte der Biegefestigkeiten werden aus den charakteristischen Festigkeitswerten der einzelnen Komponenten nach dem probabilistischen Modell des JCSS [15] abgeleitet. Es wird also eine logarithmische Normalverteilung mit einem COV von 15% angenommen.

Tabelle 9: Exzentrizität, Biegesteifigkeit, Biegefestigkeit, Druckfestigkeit und E-Modul jeder Serie

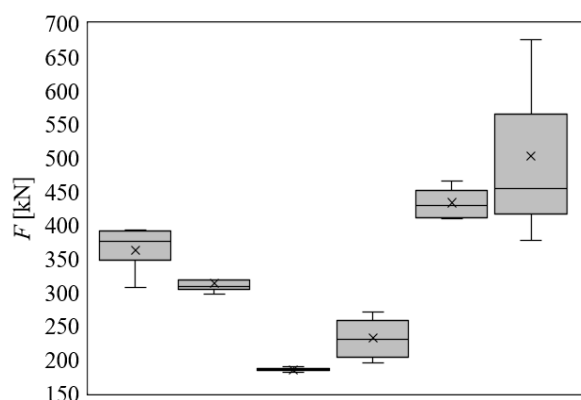
Series	¹⁾ e_0	e_1	²⁾ B_x	³⁾ f_m	⁴⁾ $f_{c,o}$	⁴⁾ $E_{c,o}$
	[mm]	[mm]	[MNm ² /m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
M-1	1.79	7.00	0.731	30.7	37.8	10.9
M-2	2.99	7.07	0.671	31.5	33.9	9.6
M-3	1.77	7.00	0.378	30.7	37.9	12.0
M-4	0.27	9.00	0.545	30.7	36.8	11.3
M-5	1.16	8.04	0.977	31.2	38.3	13.0
O-1	0.34	0.00	0.732	30.7	34.3	10.3

¹⁾ pre-curvature measured before testing

²⁾ calculated according to the shear analogy method

³⁾ calculated according to JCSS [15], ⁴⁾ determined according to EN408 [7]

Die maximale Knicklast wird in bei der experimentellen Untersuchung für die Referenzserie O-1 mit symmetrischem Aufbau erreicht (Abbildung 10). Im Vergleich zur Referenzserie O-1 erreicht die 6-lagige multifunktionale Serie M-5 mit der höchsten Biegesteifigkeit mit $F_{mean} = 434$ kN im Mittel 86% der Knicklast.



series	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	O-1
n [-]	4	4	4	4	4	3
mean [kN]	363	314	185	232	434	503
COV [%]	10.9	6.0	1.9	15.8	6.4	30.7

Abbildung 10: Experimentell ermittelte Knicklasten der multifunktionalen CLT Serien

Abbildung 11 vergleicht die experimentell ermittelten Knicklasten mit den theoretisch berechneten Knicklasten. Zu diesem Zweck wird die Knicklast für jede Serie mit drei verschiedenen Berechnungsmethoden ermittelt: Berechnung der Knicklasten nach dem Ersatzstabverfahren (k_c -method) [14], nach Theorie II. Ordnung [12]

und als Kritische Knicklast p_{ki} [12]. Abbildung 11 zeigt zusätzlich die Ergebnisse für die Serie O-1, die mit einer Gesamtexzentrizität von 40 mm geprüft wurde. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse der multifunktionalen Serien werden zusätzlich die Knicklasten einer dreilagigen Referenzserie ohne Kanäle (O-3, [20-20-20]) berechnet.

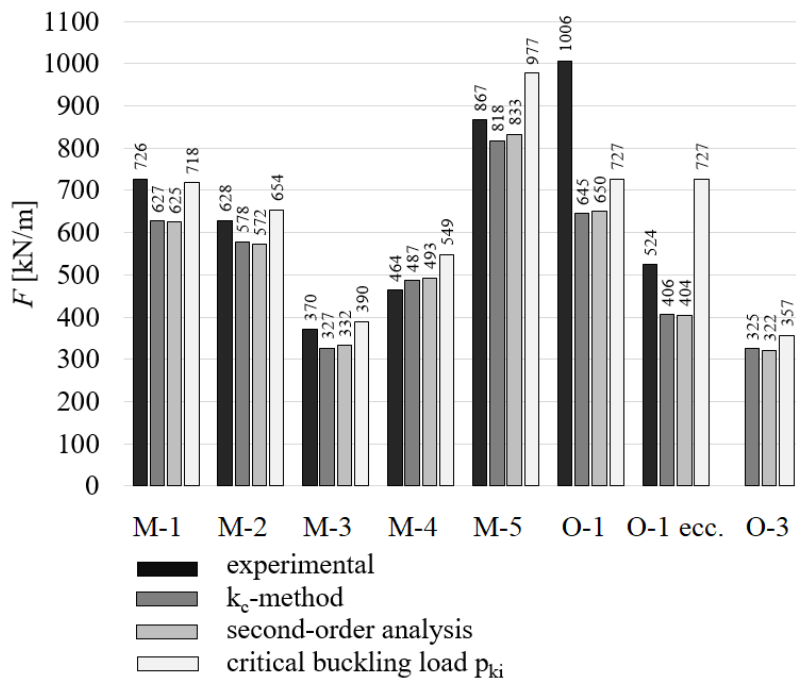


Abbildung 11: Vergleich der Knicklasten aus den experimentellen und theoretischen Untersuchungen

Das Ersatzstabverfahren (k_c -method) und Berechnung nach Theorie II. Ordnung (second-order analysis) liefern eine gute Korrelation zu den experimentell ermittelten Knicklasten für die multifunktionalen Serien M-1 bis M-5. Dies ist darin begründet, dass diese beiden Berechnungsverfahren die jeweilige Vorkrümmung und die Exzentrizität aus der Verschiebung des Schwerpunktes berücksichtigen. Für die fünflagige Referenzserie O-1 wird die maximale Knicklast durch diese Berechnungsmethoden unterschätzt. Die berechnete Kritische Knicklast p_{ki} liefert eine enge Korrelation für die multifunktionalen Serien - allerdings werden bei dieser Berechnungsmethode die Exzentrizitäten nicht berücksichtigt. Die Kritische Knicklast kann als sehr einfach und schnell zu berechnende Übersichtsrechnung verwendet werden.

Weitere Auswertungen der experimentellen und theoretischen Untersuchungen zu den Knickversuchen wie Last-Verformungs-Diagramme und grafische Darstellungen der Biegespannungsverteilung befinden sich in [12].

1.3.4 Torsionssteifigkeit

Zur Ermittlung der Torsionssteifigkeit wurde ein neuartiger Prüfaufbau entwickelt.

Quadratische Prüfkörper jeder Serie mit den Abmessungen $b/h = 1200 \text{ mm}/1200 \text{ mm}$ werden in biaxialen Biegeversuchen tordiert (Abbildung 12). Ziel ist es, die Torsionssteifigkeit der verschiedenen Probekörper aus der Verformung der Elemente unter einer externen Punktlast mittels der Arbeitssatzes zu bestimmen.

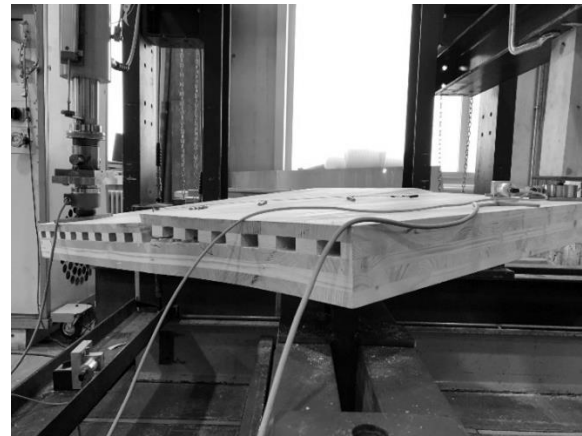
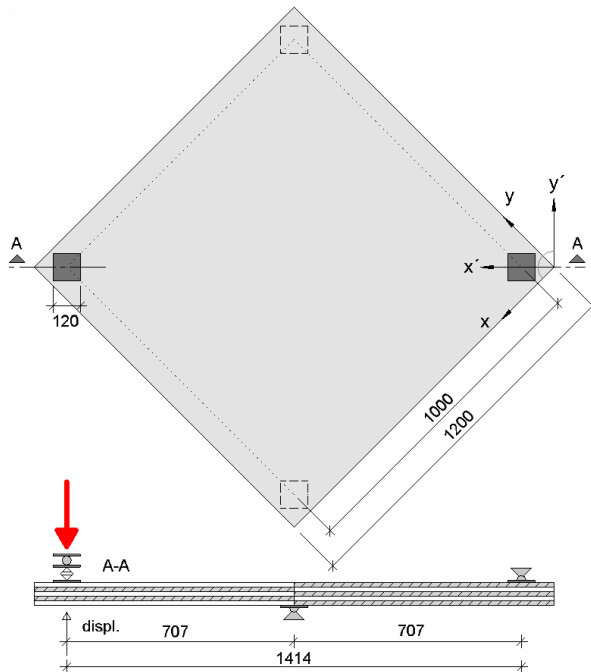


Abbildung 12: Versuchsaufbau der Torsionsversuche am multifunktionalen BSP, Maße in [mm]

Die senkrecht nach unten gerichtete Punktlast wird über einen Hydraulikzylinder auf die freie Ecke der Prüfkörper aufgebracht. Die Lasteinleitungspunkt sowie die Auflager werden durch Stahlplatten mit den Abmessungen 120/120/12 mm realisiert. Sie sind jeweils gelenkig gelagert und um 100 mm von den freien Kanten der Prüfkörper nach innen versetzt. Die Durchbiegung wird mit einem Seilzug-Wegaufnehmer unterhalb des Lasteinleitungspunktes gemessen. Der Feuchtigkeitsgehalt der 5 Serien wurde zu $u_{mean} = 11,2 \%$ (COV 7,6 %) bestimmt. Die Versuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,30 mm/s durchgeführt.

Die unter Berücksichtigung von Biege- und Schubsteifigkeitsanteilen (Reissner-Mindlin) ermittelte Torsionssteifigkeit wird als "effektive Torsionssteifigkeit" $B_{xy,eff}$ bezeichnet. Um die effektive Torsionssteifigkeit berechnen zu können, müssen die Verformungskomponenten aus Biegung und Schub mittels des Prinzips der virtuellen Verschiebungen (Kraftmethode) berücksichtigt werden. In Anlehnung an den Arbeitssatz kann diese Überlagerung nach Gleichung (AP5-4) ausgedrückt werden:

$$\delta_{ij} = \sum \frac{1}{K} \int_0^1 (\delta M_i \cdot M_i) de + \sum \frac{1}{S} \int_0^1 (\delta V_i \cdot V_i) de \quad (\text{AP5-4})$$

Abbildung 13 zeigt ein erweitertes Trägerrostmodell zur Beschreibung des Torsionsversuches. Hier werden den Trägern neben der reinen Torsionssteifigkeit auch Schub- und Biegesteifigkeiten zugeordnet.

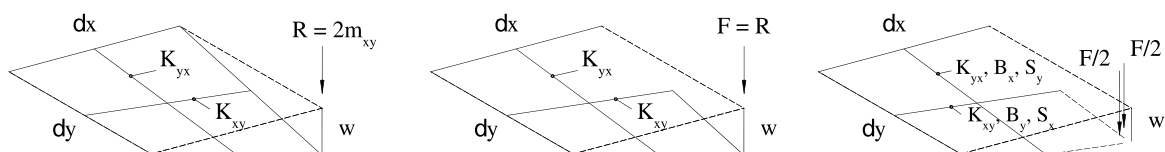


Abbildung 13: Erweitertes Trägerrostmodell des Torsionsversuches [17]

Die virtuelle Gesamtverformung entsprechend dem Trägerrostmodell in Abbildung 13 ergibt sich für alle Verformungsanteile nach Gleichung (AP5-5):

$$w\delta_{ij} = \int_0^1 \frac{\delta m_{xy} \cdot m_{xy}}{2K_{xy}} dx + \int_0^1 \frac{\delta m_x \cdot m_x}{B_y} dx + \int_0^1 \frac{\delta m_y \cdot m_y}{B_x} dy + \int_0^1 \frac{\delta V_x \cdot V_x}{S_{xz}} dx + \int_0^1 \frac{\delta V_y \cdot V_y}{S_{yz}} dy \quad (\text{AP5-5})$$

Die Schubsteifigkeiten S_{xz} und S_{yz} können der orthotropen Steifigkeitsmatrix entnommen werden (E_{55}, E_{44}). Dies gilt auch für die Biegesteifigkeiten B_x und B_y , und die Torsionssteifigkeit. Der Eintrag D_{66} der ABD Matrix repräsentiert die Hälfte der Torsionssteifigkeit B_{xy} eines Plattenelements. Eine umfangreiche Erläuterung des erweiterten Trägerrostmodells sowie der ABD Matrix kann einer Publikation von Arnold et al. [33] entnommen werden.

Die Gleichgewichtsbedingung nach Gleichung (AP5-6) gilt für die Gesamtverformung w des Elements unter Berücksichtigung der transversalen Scherverformungen.

$$\frac{F \cdot dx \cdot dy}{B_{xy,eff}} = \frac{F \cdot dx \cdot \bar{1} \cdot dy}{2D_{66}} + \frac{1}{3} \frac{F/2 \cdot dx \cdot \bar{1} \cdot dx}{D_{22}} + \frac{1}{3} \frac{F/2 \cdot dy \cdot \bar{1} \cdot dy}{D_{11}} + \frac{F/2 \cdot \bar{1}}{E_{55}} + \frac{F/2 \cdot \bar{1}}{E_{44}} \quad (\text{AP5-6})$$

Hieraus kann die effektive Torsionssteifigkeit nach Gleichung (AP5-7) berechnet:

$$\frac{1}{|B_{xy,eff}|} = \frac{1}{|B_{xy}|} - \frac{1}{6 \cdot |B_x|} - \frac{1}{6 \cdot |B_y|} - \frac{1}{2 \cdot |S_{xz}| \cdot dx} - \frac{1}{2 \cdot |S_{yz}| \cdot dy} \quad (\text{AP5-7})$$

Für die Torsion der BSP-Elemente durch eine Punktlast F (Abbildung 13) ergeben sich für die Verformungen nach Kirchhoff-Love (Gleichung (AP5-8)) und Reissner-Mindlin (Gleichung (AP5-9)) die folgenden Ansätze:

$$w_{K-L} = \frac{F \cdot dx dy}{2D_{66}} \quad (\text{AP5-8})$$

$$w_{R-M} = \frac{F \cdot dx dy}{2D_{66}} + \frac{F \cdot dx^2}{6D_{22}} + \frac{F \cdot dy^2}{6D_{11}} - \frac{F}{2E_{55}} - \frac{F}{2E_{44}} \quad (\text{AP5-9})$$

Die effektive Torsionssteifigkeit für jeden Prüfkörper wird gemäß EN 408 [7] innerhalb des linearen elastischen Bereichs $0.1F_{max}$ ($0.1F_{w100}$) und $0.4F_{max}$ ($0.4F_{w100}$) mittels linearer Regression berechnet (Abbildung 14, links). Daher wird Gleichung (AP5-8) nach B_{xy} aufgelöst (Gleichung (AP5-10)). Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den experimentell ermittelten Torsionssteifigkeiten um effektive Torsionssteifigkeiten $B_{xy,eff,exp}$, da die transversalen Schubverformungen – so wie im Falle von multifunktionalen BSP die Verformungen aufgrund der Kanäle in den Funktionslagen – in der durch den Seilzug-Wegaufnehmer gemessenen Gesamtverformung w enthalten sind. Für alle Proben, die keine Bruchlast erreicht haben (Serien O1, D3 und D4), wird die entsprechende Last F_{w100} zum Erreichen der Einheitsverformung von 100 mm anstelle von F_{max} zur Bestimmung der effektiven Torsionssteifigkeit verwendet (mit $a = 1200$ mm; $m =$ Steigung der Regressionsgeraden).

$$B_{xy,eff,exp} = \frac{F \cdot dx \cdot dy}{2w} = \frac{(0.4F_{max} - 0.1F_{max}) \cdot a^2}{2(w_{0.4F_{max}} - w_{0.1F_{max}})} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot a^2 \quad (\text{AP5-10})$$

Abbildung 14, links, zeigt die beispielhaften Kraft-Verformungs-Kurven der Torsionsversuche, exemplarisch für eine Probe aus jeder Serie des multifunktionalen BSPs. Das Diagramm in Abbildung 14, rechts, gibt die nach Gleichung (AP5-10) ermittelten Torsionssteifigkeiten an.

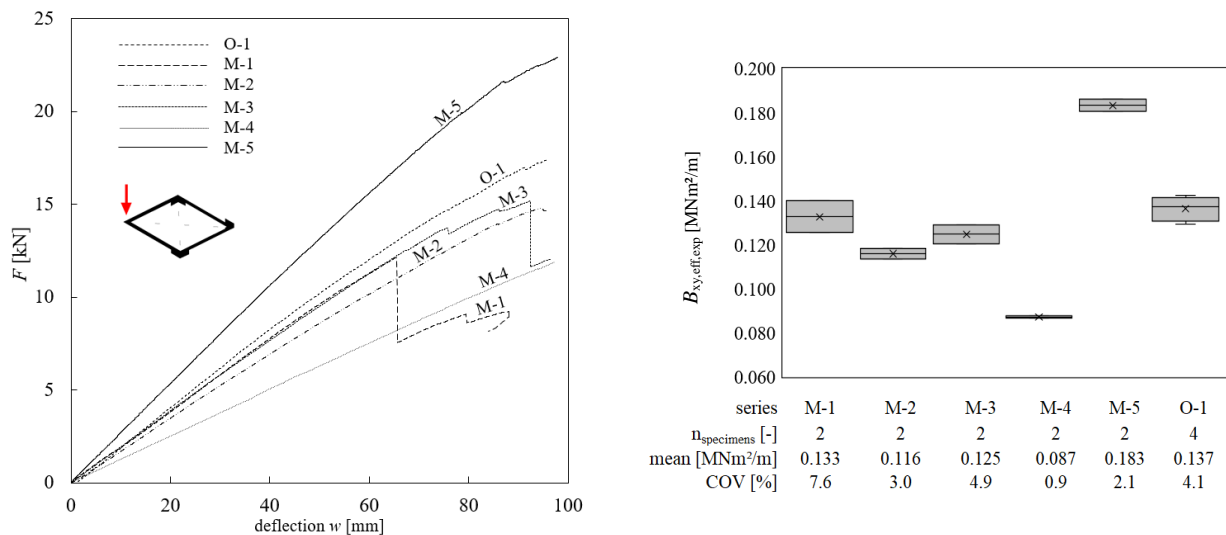


Abbildung 14: Exemplarische Last-Verformungs-Diagramme je Serie (links) und ermittelte Torsionssteifigkeit (rechts)

Die Serie M-5 mit der zusätzlichen sechsten Lage besitzt die höchste Torsionssteifigkeit. Die Serien M-1, M-2 und M-3 besitzen eine vergleichbare Torsionssteifigkeit wie die Referenzserie O-1. Die vergleichsweise geringe Torsionssteifigkeit der Serie M-4 resultiert aus den Kanälen in der Außenlage, welche durch die fehlende Sperrwirkung nicht zum Lastabtrag beiträgt. Somit wirken bei Serie M-4 nur vier Lagen unter biaxialer Biegung.

Die Torsionssteifigkeit von Wandscheiben ist hinsichtlich der Aussteifung von Gebäuden – v.a. bei der Erstellung geschlossener Gebäudekerne – von großer Bedeutung. Hinsichtlich der Verwendung von Massivholzelementen als Deckenplatten wird die Torsionsbeanspruchung bei zweiachsiger Biegebeanspruchung relevant. Weiterführende Forschung zur Torsionssteifigkeit von BSP mit diagonaler Lagen-Orientierung befindet sich unter Punkt 2 des Berichts zu AP5 (Innovatives BSP mit diagonaler Lagen-Orientierung – Diagonal Laminated Timber (DLT)) sowie in der Dissertation von Arnold [17] (voraussichtliche Veröffentlichung 2023). Die Versuchsdurchführung der Torsionsversuche an DLT und Teile der Auswertungen wurden durch eine Master Thesis [18] begleitet.

1.4 Klimatische Untersuchungen an multifunktionalem BSP

1.4.1 Versuchsvorbereitung

Ziel ist es, das Verformungsverhalten der multifunktionalen Wandelemente bei Feuchteänderungen in den Prüfkörpern zu untersuchen. Feuchteänderungen finden bei der vorgesehenen thermischen Aktivierung über den Kontakt mit der konditionierten Luft, also durch Diffusion, statt. Während des Heiz- und Kühlvorgangs treten in den Kanälen des multifunktionalen BSPs Temperaturen zwischen 15 und 45 Grad auf. Im Mai 2020 wurden 18 Prüfkörper (3 je Serie) mit den Abmessungen $b/h = 1000 \text{ mm}/500 \text{ mm}$ in einer Klimakammer im Materialprüfamt der TUM platziert (Abbildung 15). Die Prüfkörper wurden auf am Boden der Klimakammer liegende Kanthölzern gestellt, sodass die Prüfkörper von allen Seiten umströmt werden können.

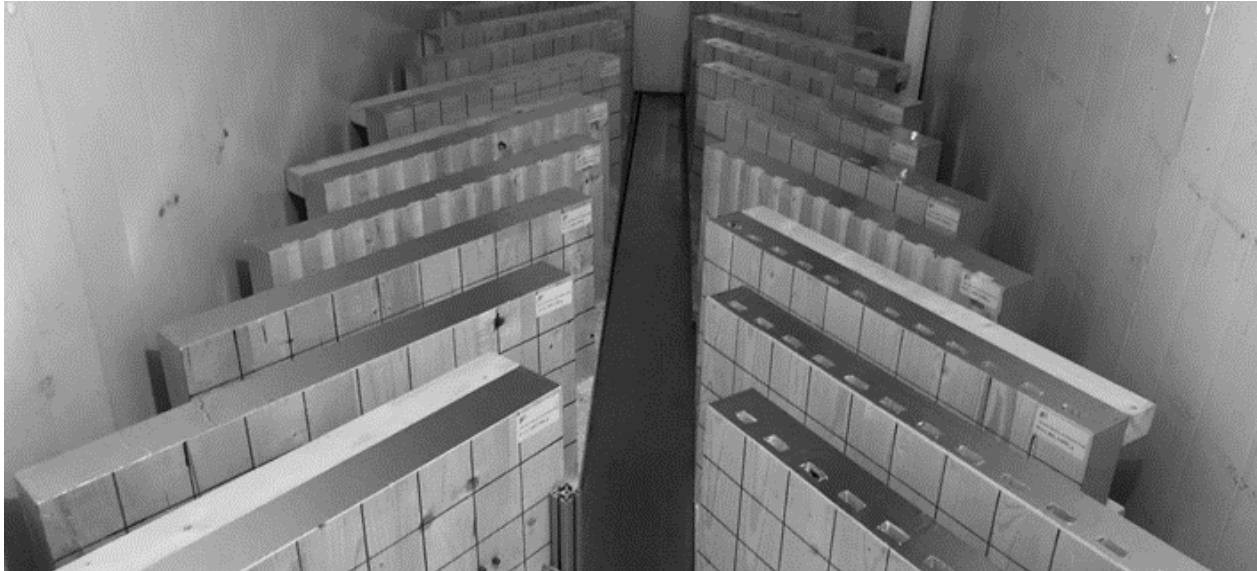


Abbildung 15: Prüfkörper des multifunktionalen BSPs zur Untersuchung des Verformungsverhaltens in einer Klimakammer

Alle Oberflächen der Prüfkörper wurden mit diffusionsdichter Aluminiumfolie beklebt – mit Ausnahme der hygrothermisch aktivierbaren Außenlage. Zusätzlich sind die Kanäle der Funktionslagen frei von Folie. Dadurch kann, wie in der späteren Einbausituation, Feuchtigkeit nur über die Außenlagen und die Kanäle in die Wandelemente diffundieren. Bei jeweils einem von drei Prüfkörpern pro Serie sind auf der Rückseite Kanthölzer angeschraubt, um feuchtebedingte Verformungen zu verhindern (Abbildung 16, links). Dieser Prüfaufbau repräsentiert ein eingebautes Wandelement, welches durch benachbarte Elemente sowie die Deckenscheiben in der Verformung beschränkt ist. Jeder Prüfkörper wurde mit vier permanenten Einschlag-Elektrodenpaaren in Tiefen von 70 mm, 45 mm, 25 mm und 15 mm ausgestattet. Damit kann der Feuchtegradient über den Querschnitt und seine zeitliche Veränderung bestimmt werden (Abbildung 16, rechts).



Abbildung 16: Vorbereitung der Prüfkörper mit diffusionsdichter Aluminiumfolie und Einschlag-Elektrodenpaare

Die Versuchsvorbereitung der Klimaversuche sowie die Versuchsdurchführung wurden von einer Bachelor Thesis [19] begleitet. Die Versuchsauswertungen und zusätzliche umfangreiche numerischen Simulationen wurden maßgeblich durch eine Master Thesis [20] begleitet.

1.4.2 Klimatische Phasen der experimentellen Untersuchungen

Über einen Versuchszeitraum von 208 Tagen wurden fünf unterschiedliche Phasen des Umgebungsklimas in der Klimakammer simuliert (Phase 1 bis Phase 5).

Der Versuch beginnt mit zwei Stabilisierungsphasen, während derer das Feuchteprofil über den Querschnitt in den unterschiedlichen Tiefen auf ein Niveau von 10 % bis 12 % angeglichen werden (Phase 1 und Phase 2). Die Anpassung geschieht moderat und über einen langen Zeitraum, um nicht vor der Heizphase Rissbildungen in den Außenlagen zu provozieren. Phase 3 simuliert die thermisch aktivierten BSP-Elemente im Heizbetrieb (40° C, 40 % rel. Feuchte). Phase 4 ist eine Übergangsphase mit größtmöglicher Feuchte- und Temperaturänderung gegenüber der vorherigen Phase, um die Elemente an die Grenzen der Anwendung zu bringen. Phase 5 simuliert den Kühlbetrieb (12,2° C, 47 % rel. LF) der Elemente. Die Versuchsdurchführung ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Die fünf klimatischen Phasen der experimentellen Untersuchung [20]

Nr.	Phase	Zeitraum (Anzahl der Tage)	Mittleres Klima
1	Stabilisierungsphase 1	06.05. – 18.06.2020 (43 Tage)	19,5 °C, 80 % rel. LF.
2	Stabilisierungsphase 2	19.06. – 31.07.2020 (43 Tage)	19,5 °C, 70 % rel. LF.
3	Heizphase	01.08. – 22.09.2020 (53 Tage)	39,0 °C, 40 % rel. LF.
4	Übergangsphase	23.09. – 18.10.2020 (26 Tage)	2,6 °C, 63 % rel. LF.
5	Kühlphase	19.10. – 30.11.2020 (43 Tage)	12,2 °C, 47 % rel. LF.

Eine Klimasonde mit Datenlogger wurde zur Aufzeichnung der Klimata während der 208 Tage innerhalb der Kammer platziert. Über sie erfolgte in regelmäßigen Abständen die Aufzeichnung der herrschenden Temperatur und relativen Luftfeuchte, welche als Mittelwert über zwölf Stunden gespeichert wurden. Anhand dieser Daten ergibt sich die Darstellung der relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur über die Zeit in Abbildung 17.

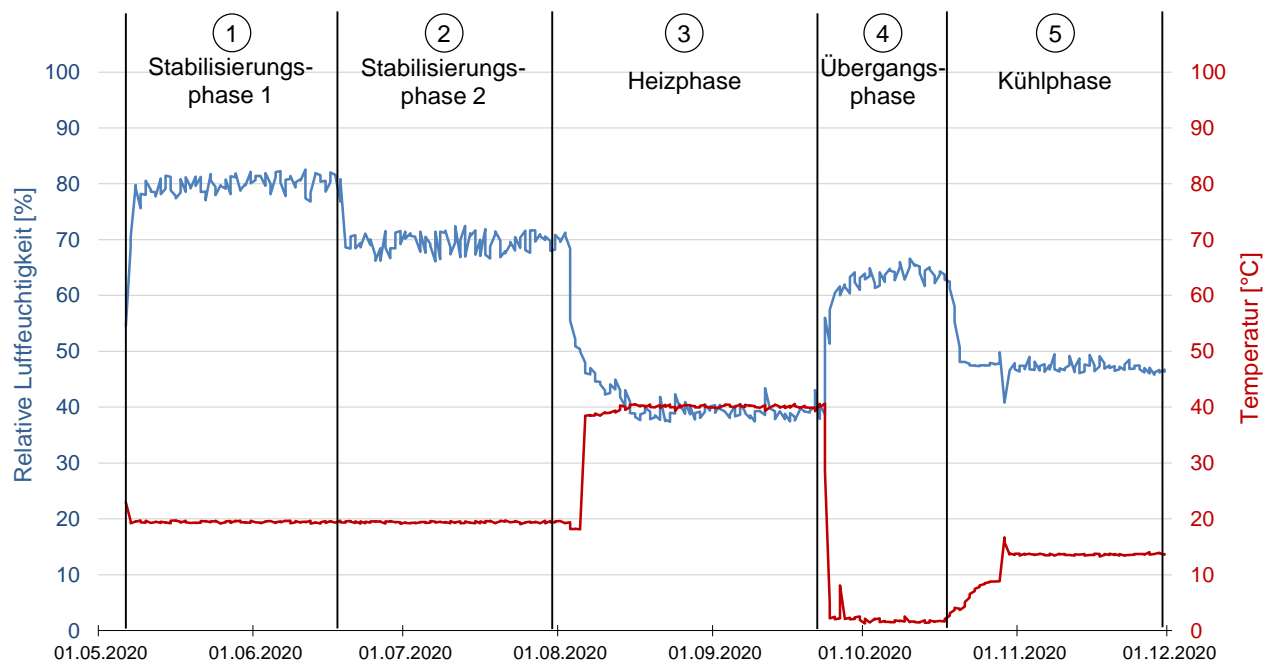


Abbildung 17: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur über den gesamten Versuchszeitraum [16; 20]

1.4.3 Verformungsverhalten bei Feuchteänderung

Die Gesamtverformung jedes Prüfkörpers im Zuge der Änderung des Feuchteprofils über den Querschnitt wird mittels des Stiches der Krümmung der Elemente gemessen. Abbildung 18 definiert die Orientierung der Krümmung und zeigt eine 3D-Skizze der hierfür zusammengesetzten Messlatte. Die Messlatte wurde durchschnittlich einmal pro Woche horizontal an die Prüfkörper angelegt, sodass die daran befestigte Messuhr die Verformung w_z aufnehmen konnte.

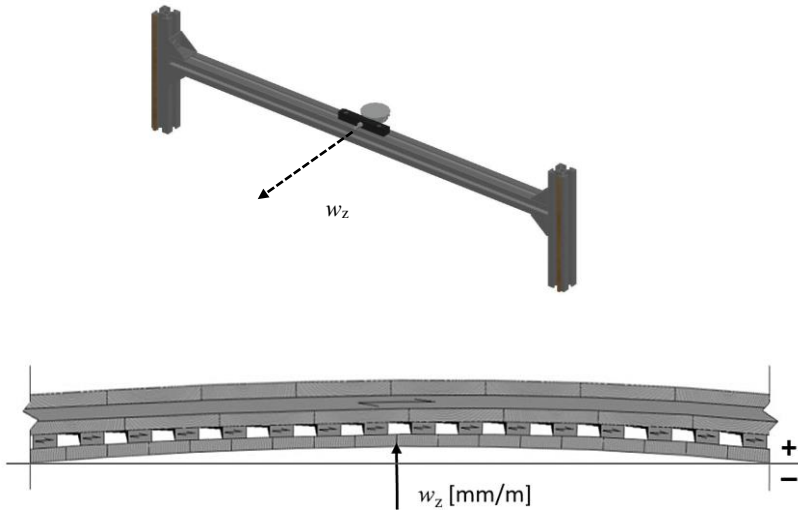


Abbildung 18: Darstellung der Messlatte zur Messung der Verformung über den Stich der Verformung (rechts)

Die Holzfeuchte als Profil über den Querschnitt wurde mittels elektrischer Widerstandsmessung durch eine GANN Hydromette HT 65 an den Einschlag-Elektrodenpaaren ermittelt. Die Messung erfolgte an den vorab genannten vier Messpunkten m , in 15, 25, 45 und 70 mm Tiefe, und wurde zusammen mit den Messungen der Verformung vorgenommen.

Abbildung 19 zeigt die exakte Lage der Messpunkte zur Bestimmung der Verformung w_{nn} sowie die exakte Position der Einschlag-Elektrodenpaare m_{nn} in den Prüfkörpern. Aus Symmetriegründen ist die Verformung in den Punkten w_{z1} und w_{z3} identisch, weshalb die während der Versuche jeweils die Verformung an den Messpunkten w_{z1} und w_{z2} bestimmt wurde. Mit der Verformungsmessung wurde nach Ende der Stabilisierungsphasen (Phase 1 und 2) und mit Beginn der Heizphase (Phase 3) begonnen.

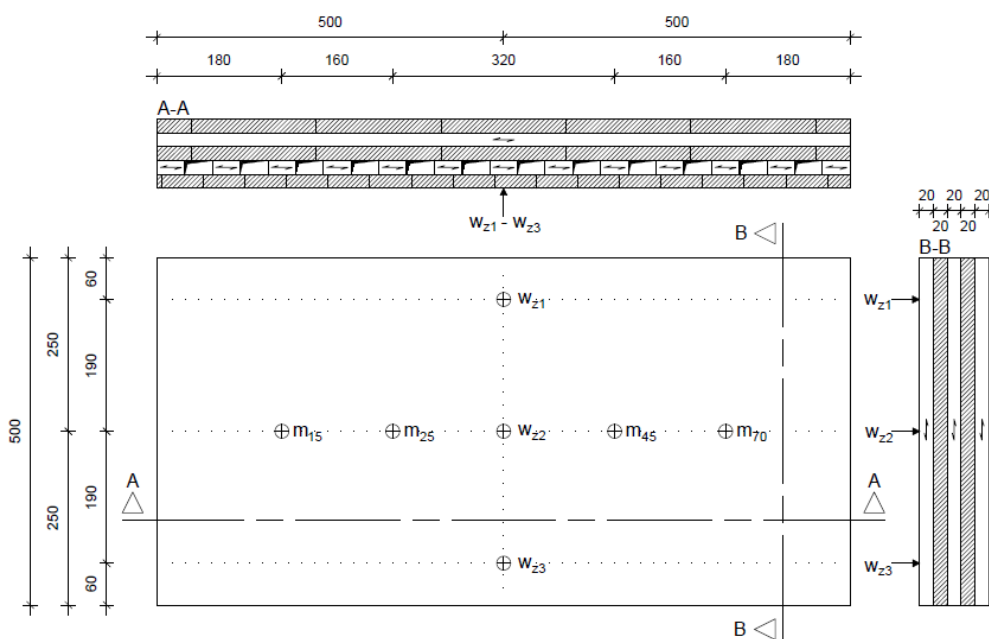


Abbildung 19: Position der Messpunkte und Elektrodenpaare in den multifunktionalen BSP-Klimaprüfkörpern, Maße in [mm]

- Serie M-1

Abbildung 20 zeigt den Verlauf der Holzfeuchte in den Tiefen 15 bis 70 mm für Serie M-1 als Funktion des zeitlichen Verlaufs der experimentellen Untersuchung. Hierzu wurden die Mittelwerte aus den Holzfeuchten aller 3 Prüfkörper einer Serie gebildet. Zudem wird in Abbildung 20 die Krümmung der multifunktionalen Serie M-1 als Funktion des zeitlichen Verlaufs der experimentellen Untersuchung gegeben. Die Werte w_{z2} und w_{z3} bilden den Mittelwert aus den beiden Prüfkörpern ohne aufgeschraubte Kanthölzer. Die Verformung des Prüfkörpers mit den aufgeschraubten Kanthölzern trägt die Zusatzkennzeichnung „(V)“ für „verhinderte Verformung“.

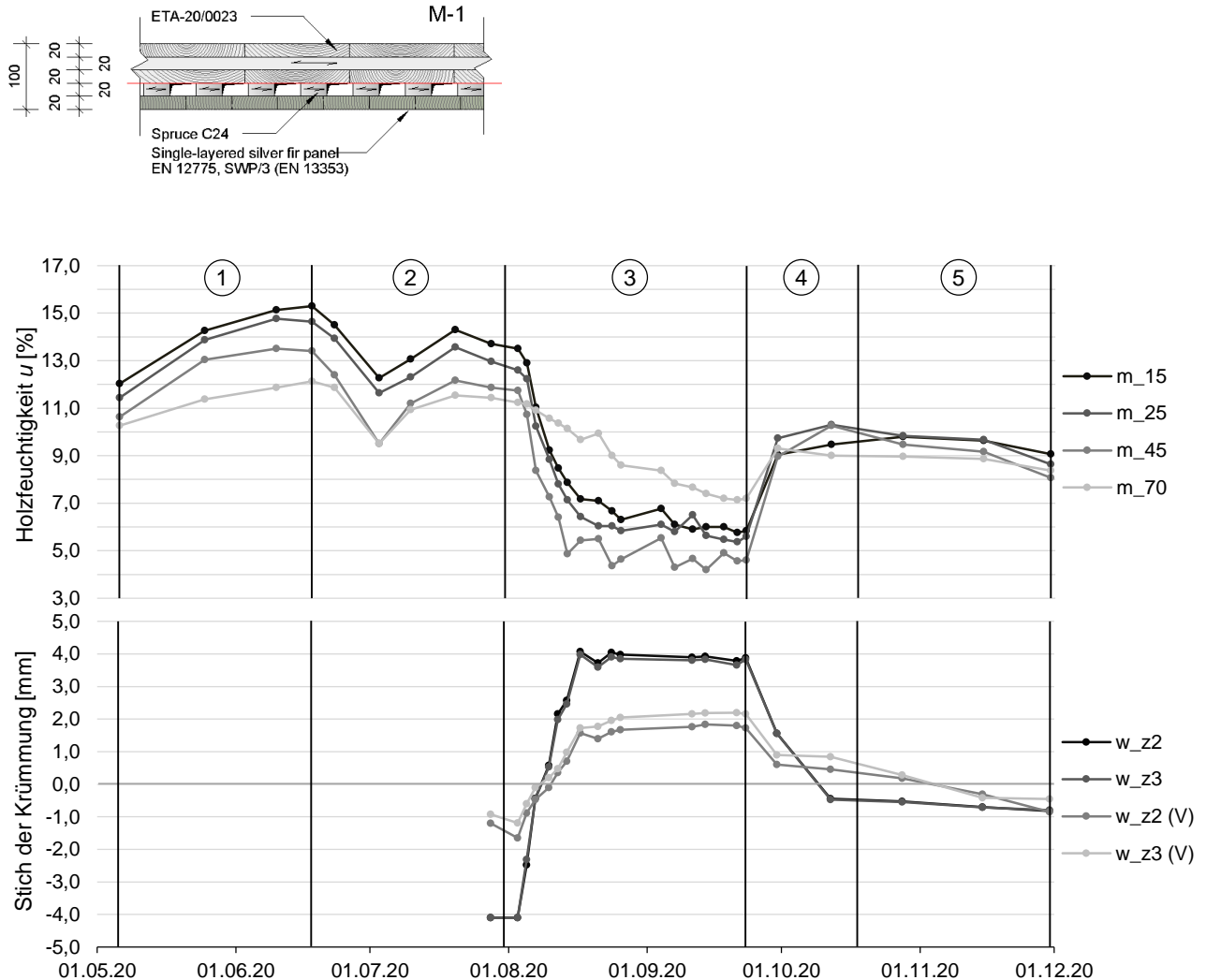


Abbildung 20: Gemessene Holzfeuchte und Stich der Krümmung der Serie M-1

Zum Ende von Phase 2 liegt die Holzfeuchte in einem Bereich von 11,4 bis 13,7 %, wobei die Messung m_{15} den höchsten Feuchtegehalt aufweist und m_{70} den niedrigsten. Trotz der beiden Stabilisierungsphasen besteht somit weiterhin ein deutliches Feuchtegefälle in den Prüfkörpern der Serie M-1. Mit dem Start der Heizperiode dreht sich das Feuchteprofil über den Querschnitt innerhalb von lediglich einer Woche um. Dies führt dazu, dass das BSP-Basiselement während der Heizperiode einen höheren Feuchtegehalt besitzt, als die Funktionslage und die Außenlage.

Die erste Messung der Verformung zeigt, dass die Prüfkörper der Serie M-1 nach beiden Stabilisierungsphasen aufgrund des großen Gefälles der Holzfeuchten eine negative Krümmung aufweisen. In der anschließenden Heizphase fällt die Holzfeuchtigkeit in m_{15} , m_{25} und m_{45} stark ab und das Gefälle der Holzfeuchte dreht sich um. Dies führt im Umkehrschluss auch zu einer positiven Krümmung des Prüfkörpers während der Heizperiode, bedingt durch die große Schwindverformung der Außenlage quer zur Faserrichtung.

Mit Phase 4 erfolgt eine erneute Befeuchtung der Front- und Funktionslagen, was zu einer nun relativ einheitlichen Holzfeuchteverteilung innerhalb des Querschnitts führt. Folglich stellt sich die Krümmung zurück; die Prüfkörper erreichen einen unverformten Zustand.

Die Verformung des Prüfkörpers mit verbotener Verformung (V) folgt dem Verlauf der frei gelagerten Prüfkörper, jedoch in weniger ausgeprägter Form.

- Serie M-2

Abbildung 21 zeigt die Holzfeuchte in den tiefen 15 bis 70 mm sowie die Krümmung der multifunktionalen Serie M-2 als Funktion des zeitlichen Verlaufs der experimentellen Untersuchung.

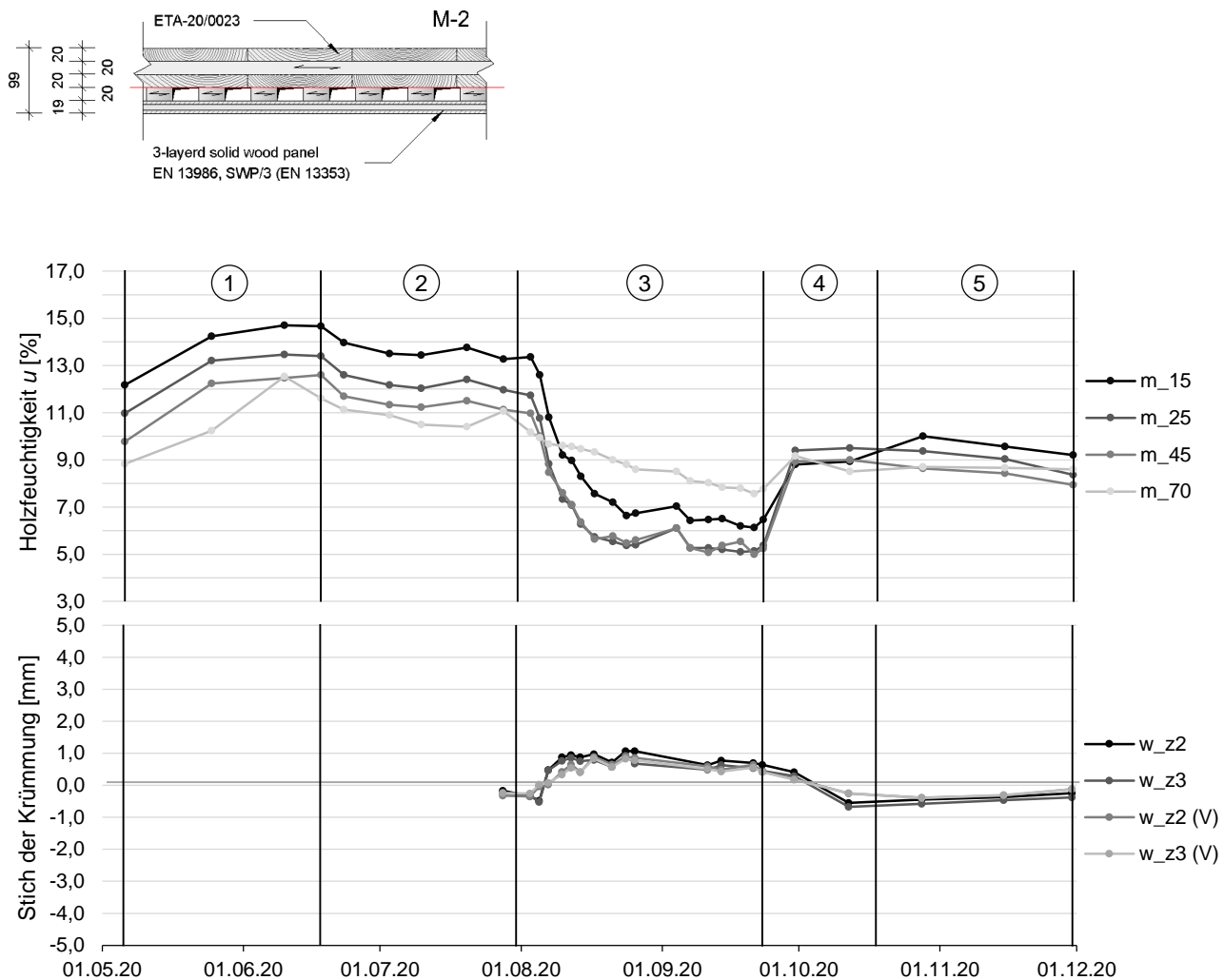


Abbildung 21: Gemessene Holzfeuchte und Stich der Krümmung der Serie M-2

Der Verlauf des Feuchtegefälles der Serie M-2 gleicht dem der Serie M-1 in Abbildung 20. Dies spiegelt das erwartete Ergebnis wieder, da die Außenlagen beider Serien aus Nadelholz bestehen und ähnliche Dicken aufweisen. Die Mehrschicht-Massivholzplatte verändert das Sorptionsverhalten gegenüber der einlagigen Massivholzlage der Serie M-1 nicht signifikant.

Die Verformungen von Serie M-2 hingegen unterscheiden sich deutlich von denen der Serie M-1. Nach dem Start der Heizphase (Phase 3) dreht sich die Krümmung der Elemente zwar ebenfalls um; die Krümmungen sind mit einer Anfangsverformung von -0,5 mm und einer Verformung von maximal +1,0 mm während Phase 3 deutlich geringer, als bei Serie M-1 (-4,0 auf +4,0 mm bei M-1).

Dieses Verformungsverhalten zeugt von der hohen Robustheit der Außenlage aus der Mehrschicht-Massivholzplatte. Durch deren 3-lagigen Aufbau besitzt die Außenlage einen eigenen Sperreffekt gegen Verformungen infolge Feuchteänderung. Die Außenlage besitzt in sich eine Querkugbewehrung. Anders als bei Serie M-1 kann sich bei ähnlichem Feuchtegefälle nur eine geringere Verformung einstellen.

Die Verformungskurven (Krümmungen) der Serien M-3, M-4 und M-5 als Funktion des zeitlichen Verlaufs ähneln denen der Serie M-2 und sind in Anhang AP5-1 gegeben.

- Serien O-1

Abbildung 22 zeigt die Holzfeuchte in den Tiefen 15 bis 70 mm sowie die Krümmung der orthogonalen Referenzserie O-1 als Funktion des zeitlichen Verlaufs der experimentellen Untersuchung.

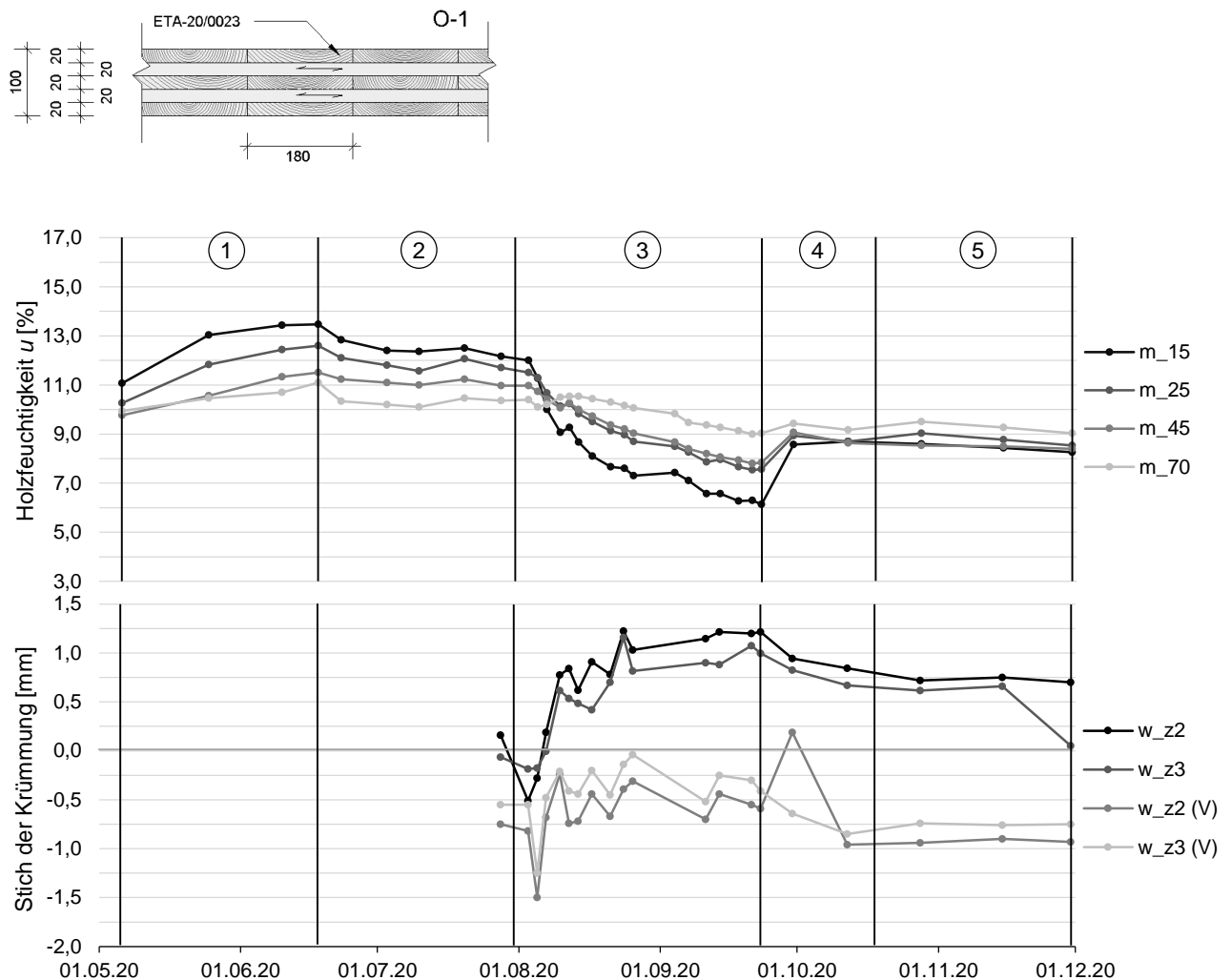


Abbildung 22: Gemessene Holzfeuchte und Stich der Krümmung der Referenzserie O-1

Die Serie O-1 dient als Referenz und ist ein herkömmliches BSP-Element, ohne Kanäle und Schmalseitenverklebung. Folglich wirken sich Änderungen der klimatischen Bedingungen nur über die raumzugewandte Oberfläche auf das Bauteil aus; Feuchteaustausch kann nur über die Außenlage und nicht über Kanäle geschehen. Dies zeigt sich auch am Feuchteprofil über den Querschnitt und dessen Änderung beim Durchlaufen der verschiedenen Klimaphasen.

Während m_{15} klar den sich ändernden äußeren Einwirkungen folgt, ist die Änderung der Holzfeuchte an den Messpunkten m_{25} und m_{45} weitaus weniger ausgeprägt, als bei den multifunktionalen Serien (vgl. Abbildungen 20 und 21). Bei Betrachtung von m_{70} fällt auf, dass in der Messtiefe von 70 mm die Holzfeuchte über den gesamten Zeitraum hinweg nahezu konstant bleibt.

Die Heizphase führt zu einer Abnahme der Holzfeuchte in der Außenlage von 12,0 % auf 6,1 % und spiegelt sich deutlich in einer Schwindverformung der ersten beiden Lagen – und somit positiven Krümmung des Prüfkörpers der O-1 Serie – wieder. Der Stich der Krümmung an den Messpunkten w_{z2} und w_{z3} verändert sich während der Heizphase von etwa -0,4 mm auf +1,2 mm.

Die Befeuchtung in der vierten Phase führt aufgrund der großen Trägheit der Referenzserie nur langsam zu einer Rückstellung der positiven Krümmung.

Um das Verformungsverhalten der verschiedenen Serien direkt miteinander vergleichen zu können, sind in Abbildung 23 die Verläufe der Holzfeuchte, gemessen in 15 mm Tiefe (m_{15}), sowie die Verformungen w_{z2} und w_{z2} (V) aller sechs Prüfserien dargestellt. Jeder Serie ist eine eigene Farbe zugewiesen.

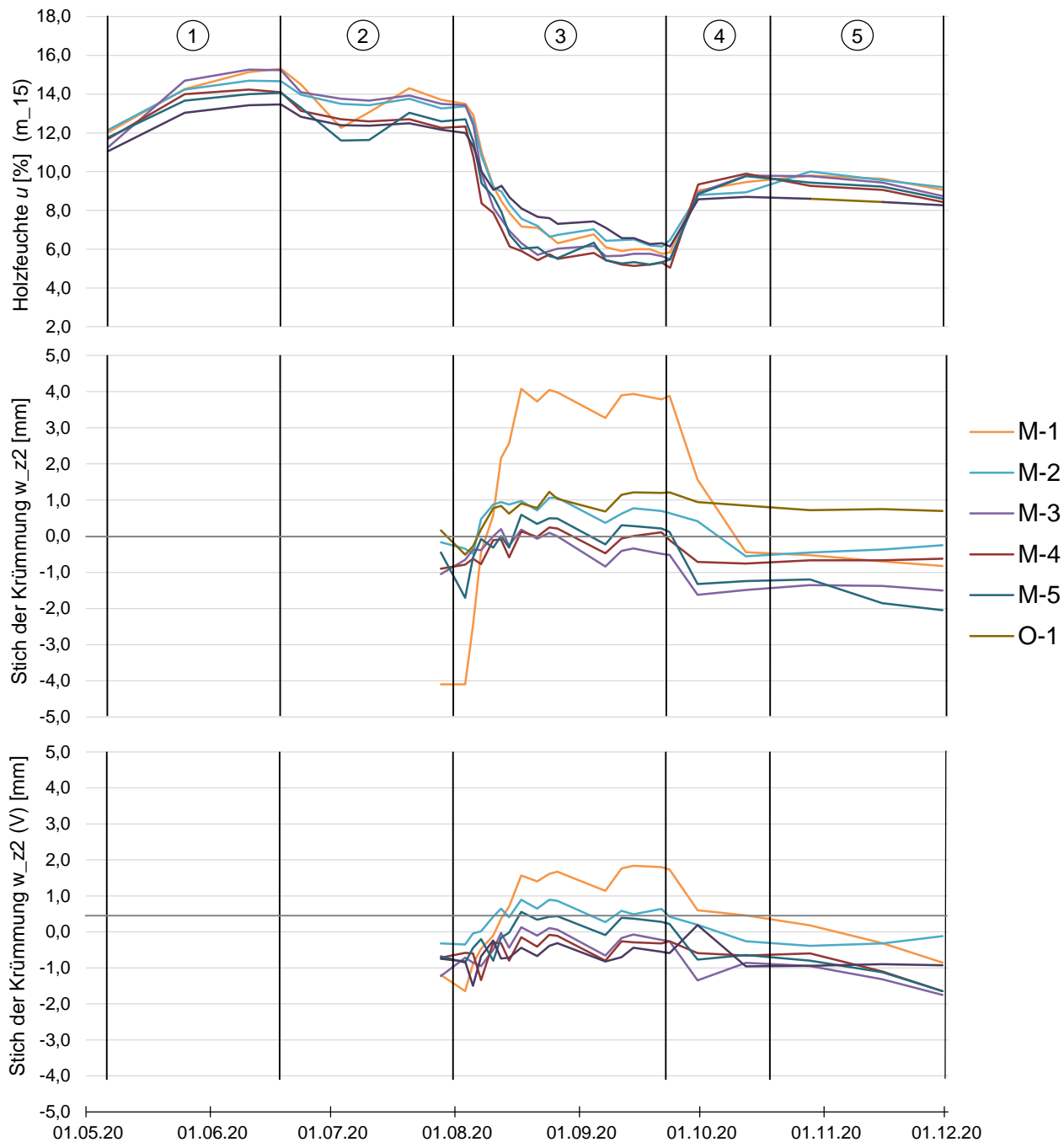


Abbildung 23: Vergleich der sechs Serien hinsichtlich der Holzfeuchte in der Außenlage (m_{15}) sowie dem Stich der Krümmung in der Mitte der Prüfkörper (w_{z2} und w_{z2} (V)) [20]

Während Phasen der Befeuchtung ist die Referenzserie stets die unterste und im Laufe der Heizphase die oberste Kurve. Folglich führen die Luftkanäle bei den multifunktionalen Elementen zu einer stärkeren Trocknung, bzw. Befeuchtung, des Holzes, als dies bei den Standardelementen der Fall ist.

Am stärksten ausgeprägt ist dieses Verhalten bei den Serien M-1 und M-3, also jenen Prüfkörpern, die eine Decklage aus Weißtanne besitzen. Diese Ausprägung der Feuchtigkeitsverläufe aufgrund der Decklagen lässt sich jedoch nicht direkt auf die Verformungen übertragen.

Die Krümmung eines Bauteils hängt, wie zuvor beschrieben, stark mit der Feuchteverteilung über den gesamten Querschnitt zusammen. Allerdings ist auch bei der Verformung w_{z2} die Serie M-1 am auffälligsten, da die gemessenen Werte um ein Vielfaches größer sind als jene der anderen Prüfkörpertypen. Der Grund hierfür ist die Decklage aus Nadelholz-Brettern mit vertikaler Faserrichtung, welche die maximale Schwindverformung in die gemessene Richtung hervorruft. Im Vergleich dazu zeigt die Serie M-3 eine deutlich

geringere Krümmung. Hier sind die Weißtannen-Lamellen horizontal angeordnet. Folglich sind die Verformungen über die Höhe des Bauteiles am größten, was jedoch durch die Messungen nicht abgebildet wird. Auch die Serien M-2 und M-5 verkrümmen sich weniger stark, da ihre Mehrschicht-Massivholzplatten als Decklagen deutlich geringere Quell- und Schwindmaße aufweisen, als die der einlagigen Massivholzplatte.

Die sechslagigen Prüfkörper der Serie M-5 sind steifer als der fünfplagige Aufbau der anderen Serien, sodass die Verformungen entsprechend geringer sind. Lediglich die Serie M-4 weist eine noch kleinere Verformung auf, was sich mit dem gänzlichen Fehlen einer Decklage begründen lässt.

Die Krümmung der Prüfkörper mit eingeschränkter Verformbarkeit (V) folgen für alle Serien den jeweiligen Prüfkörpern ihrer Serie mit freier Lagerung, sind jedoch deutlich weniger stark ausgeprägt. Die Verformungen konnten durch die aufgeschraubten Kanthölzer reduziert, jedoch nicht verhindert werden. Wie sich dies auf die möglicherweise induzierten Zwangsspannungen und somit das Rissverhalten der Frontlage auswirkt, wird in Abschnitt 1.4.5 näher untersucht.

1.4.4 Ausgleichsfeuchte

Bei der Betrachtung der Holzfeuchten in Abbildung 24 fällt auf, dass sich die Verläufe in jeder Phase an einen spezifischen Wert annähern. Dabei handelt es sich um die Ausgleichsfeuchte, welche sich aus der Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit über Gleichung (AP5-11) berechnet (mit T = Temperatur [K] und φ = Relative Luftfeuchtigkeit [-]).

$$u_{air} = 0,01 \cdot \left(\frac{-T \cdot \ln(1 - \varphi)}{0,13 \cdot \left(1 - \frac{T}{647,1}\right)^{-6,46}} \right)^{\frac{1}{110 \cdot T^{-0,75}}} \quad (\text{AP5-11})$$

Anhand der Klimadaten aus Abbildung 17 wurde die Ausgleichsfeuchte nach Gleichung (AP5-11) für jede Phase berechnet und als schwarze Linie (u_{ber}) in Abbildung 24 dargestellt. Ebenfalls abgebildet sind die Holzfeuchten in 15 mm tiefe (m_{15}) jeder Serie (graue Linien), da diese aufgrund Ihrer oberflächennahen Lage mit der errechneten Ausgleichsfeuchte vergleichbar sind. Aus diesen 6 Werten je Phase wurde ein Mittelwert gebildet und als gestrichelte schwarze Linie in das Diagramm eingetragen

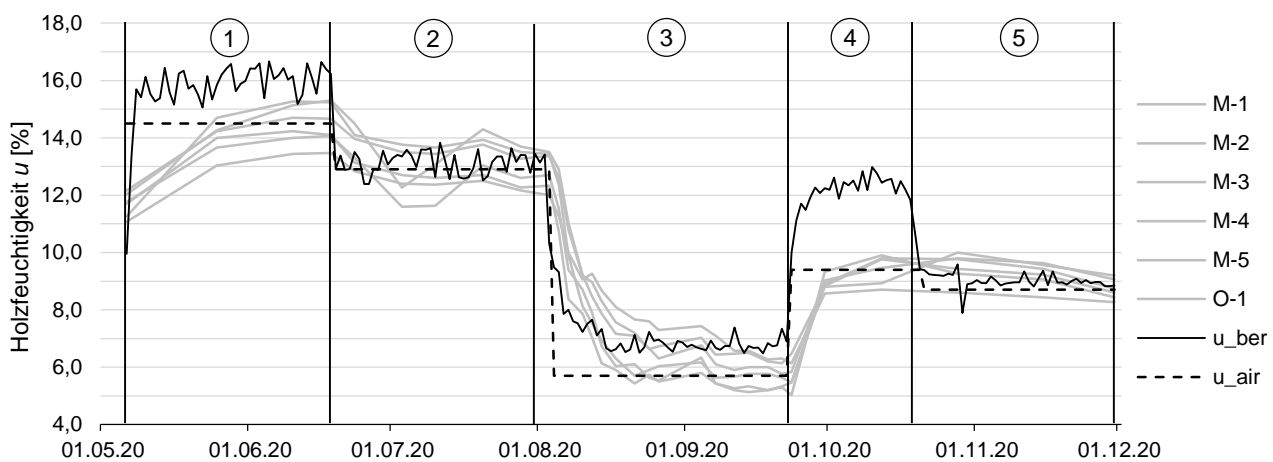


Abbildung 24: Darstellung der rechnerischen Ausgleichsfeuchte im Vergleich zum Verlauf der Holzfeuchte in 15 mm Tiefe (m_{15}) der untersuchten Prüfkörper [20]

Mittelwerte der Ausgleichsfeuchten in den Außenlagen der Prüfserien, getrennt für jede Phase [20]:

- Phase 1: $u_{air} = 14,5 \%$
- Phase 2: $u_{air} = 12,9 \%$
- Phase 3: $u_{air} = 5,7 \%$
- Phase 4: $u_{air} = 9,4 \%$
- Phase 5: $u_{air} = 8,7 \%$

Mit Ausnahme von Phase 4 zeigt sich eine gute Übereinstimmung der rechnerischen Ausgleichsfeuchte und den Mittelwerten der Holzfeuchten in den Außenlagen. Dies kann an der kurzen Dauer von Phase 4. Die rechnerische Ausgleichsfeuchte kann sich aufgrund der Systemträgheit des Sorptionsprozesses nicht einstellen, bzw. noch nicht in 15 mm tiefe einstellen. Für zukünftige oder weiterführende Forschungsarbeiten wird empfohlen, die Dauer jeder Phase auf mindestens 45 Tage festzulegen.

1.4.5 Rissverhalten der Außenlagen

Der Wechsel der Krümmung während Heiz- und Kühlbetrieb sowie eine verhinderte Verformung im eingebauten Zustand der multifunktionalen Wandelemente können zu Zwangsspannungen und Rissen in den Außenlagen führen.

Vor Klimaphase 1 (Versuchsstart) und nach der Klimaphase 3 (Heizbetrieb) wurden die Prüfkörper auf Risse in den Außenlagen untersucht. Die Risse wurden markiert (rot) und dokumentiert, um Rückschlüsse auf die Robustheit und Luftdichtheit der multifunktionalen BSP-Elemente im Heiz- und Kühlbetrieb zuzulassen. Tabelle 11 gibt einen Überblick über die sichtbaren Risse in den Außenlagen aller Prüfkörper nach der Heizphase (Klimaphase 3).

Tabelle 11: Gemessene Risse in den Außenlagen nach der Heizphase

Prüfkörper	n [-]	Beschreibung der Risse
M-1-1	0	/
M-1-2	0	/
M-1-3(V)	1	-Breaking of edge-glued lamella joint (0.15 mm)
M-2-1	0	/
M-2-2	2	-Shrinkage cracks (0.15 mm, 0.10 mm)
M-2-3(V)	1	-Central shrinkage crack (0.20 mm)
M-3-1	1	
M-3-2	3	-Breaking of edge-glued lamella joints (0.15 mm, 0.55 mm)
M-3-3(V)	3	-Breaking of edge-glued lamella joint (0.70 mm) -Central shrinkage cracks (0.20mm, 0.40 mm)
M-4-1	0	/
M-4-2	0	/
M-4-3(V)	0	/
M-5-1	0	/
M-5-2	0	/
M-5-3(V)	2	-Central shrinkage cracks (0.25 mm, 0.55 mm)
O-1-1	1	-Central shrinkage crack (1.00 mm)
O-1-2	5	-Central shrinkage cracks (0.40-1.40 mm)
O-1-3 (V)	7	-Central shrinkage cracks (0.50-1.60 mm)

▪ Serie M-1

Die beiden frei verformbaren Prüfkörper M-1-1 und M-1-2 der Serie M-1 wiesen keine Risse auf. Zusammen mit den zuvor dokumentierten Beobachtungen kann daraus geschlossen werden, dass dieser Prüfkörpertyp große Verformungen zulässt, ohne zu reißen. Demzufolge weist die Decklage aus Weißtanne eine hohe Robustheit – auch hinsichtlich Zugspannungen quer zur Faser – auf. Zu beachten ist, dass der Prüfkörper M-1-3 (V) induzierten Spannungen die Zugfestigkeit der Klebefuge an den Schmalseiten der Lamellen überschritten haben. Das Ergebnis ist die Öffnung einer Lamellenfuge an zwei Stellen mit einer Breite von 0,15 mm. Die Einfärbungen in Abbildung 25 machen die mittig über einem der Luftkanäle verlaufenden Risse sichtbar.



Abbildung 25: Exemplarisches Rissbild in der Außenlage des Prüfkörpers M-1-3(V) nach Phase 3

- Serie M-2

Bei Serie M-2 waren die Prüfkörper M-2-1 und M-2-2 frei verformbar. Nach der Heizphase waren an M-2-1 keine Risse festzustellen. In der Massivholzplatte des Bauteils M-2-2 sind zwei Risse mit einer Rissweite von 0,1 und 0,15 mm vorhanden. Auffällig ist, dass die Risse nur durch die erste Lage der Mehrschicht-Massivholzplatte laufen. Die Luftdichtheit ist weiterhin gegeben. Prüfkörper M-2-3 (V) ist ebenfalls gerissen. Hier liegt ein 0,2 mm breiter Riss im äußeren Bereich des Elements. Auch dieser Riss ist nur oberflächlich und reicht nicht durch die gesamte Außenlage.



Abbildung 26: Exemplarisches Rissbild in der Außenlage der Serie M-2-3 (V) nach Phase 3

Die Rissbilder aller weiteren Prüfkörper mit Rissen in der Außenlage nach der Heizphase können Anhang A2 entnommen werden. Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass sowohl die verwendeten Massivholzplatten aus Weißtanne für die Außenlage der Serien M-1 und M-3, als auch die Mehrschicht-Massivholzplatten für die Außenlagen der Serien M-2 und M-5 über eine große Robustheit gegenüber thermischen Stress, also feuchteinduzierten Verformungen und Spannungen, besitzen.

1.4.6 Numerische Simulationen an 3D-FE Modellen

Um Rückschlüsse auf induzierte Spannungsverteilung aufgrund des asymmetrischen Feuchteprofils während der Heiz- und Kühlprozesses ziehen zu können, wurden mit Hilfe der Software ANSYS umfangreiche numerische Simulationen zum Feuchtetransport im multifunktionalem BSP bei zyklischem Heiz- und Kühlbetrieb durchgeführt. Die Versuchsdaten aus den Klimaversuchen dienten hierbei der Validierung der Finite-Elemente-Volumenmodelle (FE-Volumenmodell).

Abbildung 27 zeigt exemplarisch ein verformtes FE-Volumenmodell der Serie M-2 zum Ende der Heizphase (Phase 3).

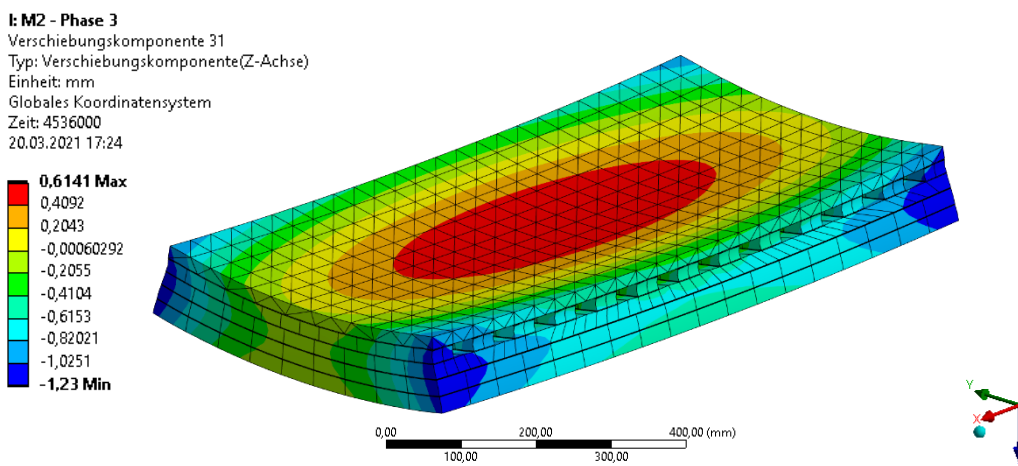


Abbildung 27: Berechnete Verformung in z-Richtung in [mm] (23-fache Überhöhung) des freien Prüfkörpers der Serie M-2 am 23.09.2020, dem Ende der dritten Phase [20]

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen können [20] entnommen werden.

1.5 Untersuchungen zum Brandverhalten von multifunktionalem BSP

1.5.1 Analytische Ansätze und Untersuchungen

Um das Verhalten des multifunktionalen BSPs im Brandfall zu untersuchen sowie den Einfluss der Kanäle auf die Feuerwiderstandsdauer und den Raumabschluss zu bestimmen wurden umfangreiche analytische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Versuchsvorbereitung, die Versuchsdurchführung sowie Teile der Versuchsauswertung wurden durch eine Masterarbeit [21] begleitet.

Um die raumabschließende Feuerwiderstandsdauer der multifunktionalen Serien (Abbildung 2) im Vorfeld abzuschätzen, werden zunächst rechnerische Voruntersuchungen durchgeführt. Nach Eurocode 5 (EC5) [22], gibt es kein Nachweisverfahren der Feuerwiderstandsdauer für Brettsperrholzelemente. Deshalb werden die analytischen Ansätze bezogen auf den Abbrand von stabförmigen Elementen auf Flächenelemente übertragen und gegebenenfalls modifiziert. Einen analytischen Ansatz zur Bestimmung des Raumabschlusses bildet das Verfahren nach Schleifer [23].

Die Berechnung der Feuerwiderstandsdauer bis zum Durchbrand der Elemente wird im Folgenden anhand von Serie M-1 exemplarisch erläutert.

Für den eindimensionalen Abbrand von Nadelholz ergibt sich gem. DIN EN 1995-1-2 [22] eine Abbrandrate von $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$. Somit ist die erste Lage nach 31 Minuten abgebrannt und der Abbrand der zweiten Lage beginnt (Gleichung (AP5-12)).

$$20 \text{ mm} \div 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 31 \text{ min} \quad (\text{AP5-12})$$

Nach Abbrand der Außenlage wird der Restquerschnitt zwischen den Hohlkammern dreiseitig brandbeansprucht und zur Bestimmung des Abbrands ist die ideelle Abbrandrate für Vollholz aus Nadelholz von $\beta_n = 0,8 \text{ mm/min}$ anzusetzen. Der Restquerschnitt ist nach 25 Minuten vollständig abgebrannt (Gleichung (AP5-13)).

$$20 \text{ mm} \div 0,80 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 25 \text{ min} \quad (\text{AP5-13})$$

Bei der dritten Lage handelt es sich um die erste Schicht des dreilagigen BSP-Basiselements, weshalb auch hier als Bemessungswert der Abbrandrate $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$ angesetzt werden müsste. Allerdings ist das BSP-Element durch die Außenlage, bestehend aus der Weißtannen-Massivholzplatte, als geschütztes Bauteil zu betrachten, weshalb für die erste Lage gem. DIN EN 1995-1-2 [22] für eine Tiefe von 25 mm die doppelte Abbrandrate von $\beta_0 = 1,30 \text{ mm/min}$ angesetzt wird. Nachdem die erste Lage lediglich eine Stärke von 20 mm (< 25 mm) aufweist, wird die erhöhte Abbrandrate für die gesamte Schicht angewandt (Gleichung (AP5-14)):

$$20 \text{ mm} \div 1,30 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 15 \text{ min} \quad (\text{AP5-14})$$

Somit zeigt sich, dass die Restquerschnitte zwischen den Kanälen vollständig abgebrannt sind, bevor sich die fünfte Lage entzündet. In Abbildung 28 ist dargestellt, wie sich das Bauteil in Bezug auf den Abbrand über die Zeit der Versuchsdurchführung nach den zuvor ermittelten Zeitwerten verhält.

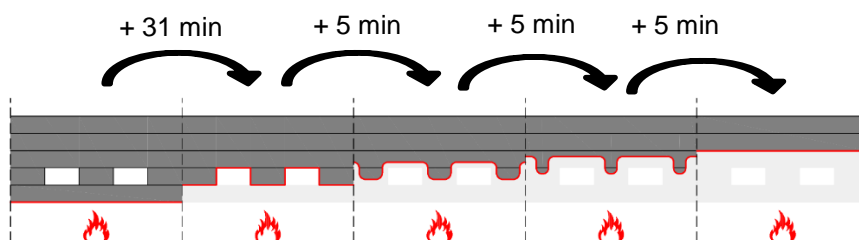


Abbildung 28: Schematische Entwicklung des Elements M1 im Brandfall [12]

Bereits durchgeführte Brandversuche mit Brettsperrholzelementen haben gezeigt, dass sich insbesondere bei polyurethanverklebten Bauteilen die einzelnen Holzkohleschichten ablösen [24]. Dies ist auf ein frühzeitiges Versagen des Polyurethanklebstoffes, was als Delaminierung bezeichnet wird, zurückzuführen. Die zusätzliche Brandlast führt kurzzeitig zu höheren Temperaturen und dadurch zu einem schnelleren Abbrand. Deshalb wird der Abbrand der weiteren Lagen im BSP-Element mit einer erhöhten, eindimensionalen Abbrandrate von $\beta_0 = 0,90 \text{ mm/min}$ nach Teibinger berechnet [25] (Gleichung (AP5-15)).

Eine doppelte Abbrandrate von 1,30 mm/min, wie von Klippel [24] empfohlen, wendet Teibinger [25] nur bei polyurethanverklebten Decken- bzw. Dachelementen an, da hier das Abfallen der Schichten mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eintritt, während Delaminierungseffekte bei Wandelementen weniger ausgeprägt beobachtet wurden [24].

$$20 \text{ mm} \div 0,90 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 22 \text{ min} \quad (\text{AP5-15})$$

Sowohl die vierte als auch die fünfte Lage weisen somit eine Feuerwiderstandsdauer von 22 Minuten auf (s. Tabelle 12).

Tabelle 12: Analytisch ermittelte Feuerwiderstandsdauer (Durchbrand) von Serie M-1 [21]

M-1	Material	Stärke	Abbrandrate	Feuerwiderstandsdauer
A	Weißtanne (Bretter 20/80 mm, vollflächig)	20 mm	0,65 mm/min	31 min
B	Fichte C24 (Latten 20/40 mm, d = 40 mm)	20 mm	0,80 mm/min	---
C	Pfeifer BSP [5]	20 mm	1,30 mm/min	15 min
D	Pfeifer BSP [5]	20 mm	0,90 mm/min	22 min
E	Pfeifer BSP [5]	20 mm	0,90 mm/min	22 min
				90 min

Abbildung 29 gibt den Abbrand des Querschnittes von Serie M1 als eine Funktion der Zeit.

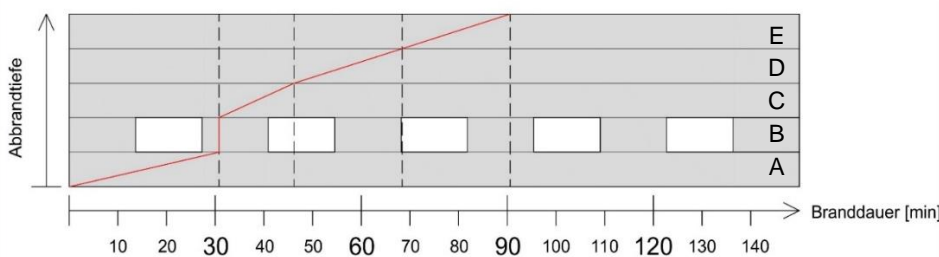


Abbildung 29: Verlauf des Abbrands als eine Funktion der Branddauer für Serie M-1 [21]

Schleifer [23] veröffentlichte 2009 im Rahmen ihrer Dissertation ein neues Berechnungsverfahren für mehrschichtige Holzbauteile. Während die Parameter des Berechnungsmodells nach EC5 [22] auf Versuchen beruhen, wurde das nach Schleifer erarbeitete Berechnungsmodell primär aus numerischen Simulationen abgeleitet.

Grundsätzlich wird bei dem Berechnungsverfahren nach Schleifer [23] die letzte, brandabgewandte Bauteilschicht als raumabschließende Schicht betrachtet und alle davorliegenden Schichten als isolierende Kapselschichten. Dabei wird immer der maßgebende Wärmedurchgang betrachtet.

Für die Prüfserien mit Kanälen (M1 bis M5) bedeutet dies, dass jeweils die Funktionslage bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Zunächst werden für die einzelnen Schichten die sogenannten Grundschutzzeiten $t_{prot,0}$ bzw. für die letzte Schicht die Grundisulationszeit $t_{ins,0}$ bestimmt. Die Gleichungen (AP5-16) und (AP5-17) dienen der exemplarischen Berechnung dieser für Serie M-1 (mit h_i = Dicke der Massivholzplatte [mm]).

Erforderliche Grundschutzzeiten für Massivholz, $d = 20$ mm:

$$t_{prot,0,MH} = 30 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} = 30 \cdot \left(\frac{20}{20}\right)^{1,1} = 30 \text{ min} \quad (\text{AP5-16})$$

Erforderliche Grundisulationszeit Massivholz, $d = 20$ mm:

$$t_{ins,0,MH} = 19 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4} = t_{ins,0,MH} = 19 \cdot \left(\frac{20}{20}\right)^{1,4} = 19 \text{ min} \quad (\text{AP5-17})$$

Nachdem sich die Prüferien M1, M3, M4 und O1 aus den gleichen Schichten zusammensetzen und somit auch die gleichen Grundschutz- und Grundisoliationszeiten gelten, können die oben ermittelten Werte der auf die Prüferien M3, M4 und O1 übertragen werden. Detaillierte Berechnungen für alle Serien (zusätzlich für eine Bekleidung mit 2x30 mm Gipskarton sowie für die Annahme von Hohlkammerbränden) kann [12] entnommen werden. Abbildung 30 gibt eine Übersicht der berechneten Feuerwiderstandsdauer hinsichtlich Abbrand (EC5 [22]) und Raumabschluss (Schleifer [23]) bei innenseitiger Brandbeaufschlagung und ohne Bekleidung [21].

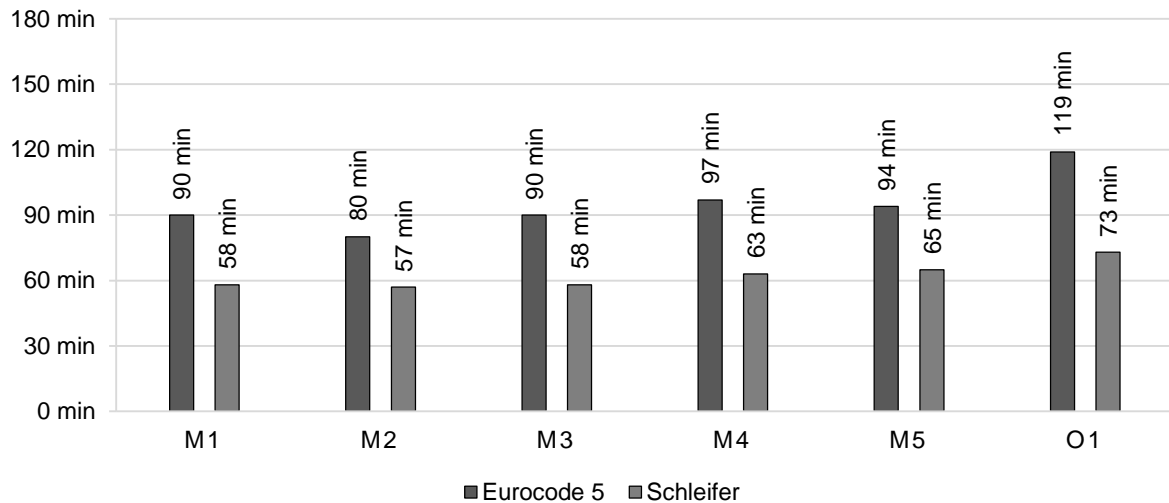


Abbildung 30: Übersicht der berechneten Feuerwiderstandsdauer hinsichtlich Abbrand (EC5 [22]) und Raumabschluss (Schleifer [23]) bei innenseitiger Brandbeaufschlagung ohne Bekleidung [21]

Während der im nachfolgenden Kapitel beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurde die Feuerwiderstandsdauer der Prüferien auch für einseitig (brandzugewandt) mit 2 x 15 mm GKF beplankte Prüfkörper durchgeführt. Abbildung 31 gibt daher eine Übersicht der berechneten Feuerwiderstandsdauer hinsichtlich Abbrand (EC5 [22]) und Raumabschluss Schleifer [23] bei innenseitiger Brandbeaufschlagung mit 2 x 15 mm GKF-Bekleidung jeder Serie [21].

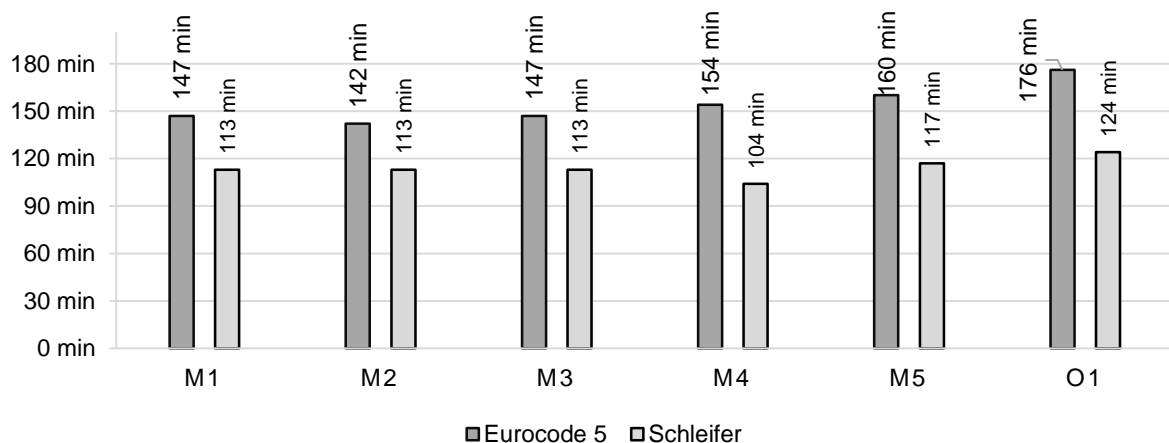


Abbildung 31: Übersicht der berechneten Feuerwiderstandsdauer hinsichtlich Abbrand (EC5 [22]) und Raumabschluss (Schleifer [23]) bei innenseitiger Brandbeaufschlagung und Bekleidung 30 mm GKF [21]

1.5.2 Experimentelle Untersuchungen

1.5.2.1 Versuchsvorbereitung

Als Versuchsstätte wurde das Brandprüflabor der Holzforschung München gewählt. Das Labor ist als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle durch das Deutsche Institut für Bautechnik bauaufsichtlich anerkannt. Der Standort Schwabing-West in der Winzererstraße 45, 80797 München, verfügt über einen Brandofen für Feuerwiderstandsprüfungen nach DIN 4102 [26] bzw. DIN EN 1363 [27] und DIN EN 1364 [28]. Die lichten Maße des Wandprüfofens betragen $b/h = 3,0 \text{ m}/3,0 \text{ m}$.

Als tragende Konstruktion, in welche die Prüfkörper eingebaut werden, wurde in Absprache mit der Prüfstelle eine Holzrahmenkonstruktion gewählt. Um in jedem Fall einen Durchbrand der Tragkonstruktion zu verhindern, erhalten die Ständer eine dreilagige Bekleidung aus je zwei Lagen von $t = 18 \text{ mm}$ und einer Lage von $t = 15 \text{ mm}$ GKF Feuerschutzplatten. Als zu prüfende Serien wurden anhand der rechnerischen Voruntersuchungen M-1, M-2 und M-5 sowie O-1 als Referenzserie bestimmt. Serie M-3 gleicht bezüglich dem Brandverhalten Serie M-1 und Serie M-4 ist aufgrund fehlender Außenlage über den Kanälen für die Versuchsdurchführung nicht relevant. Der Einbau der Prüfserien in die Holzrahmenkonstruktion in der Öffnung des Wandprüfofens erfolgt nach Abbildung 32.

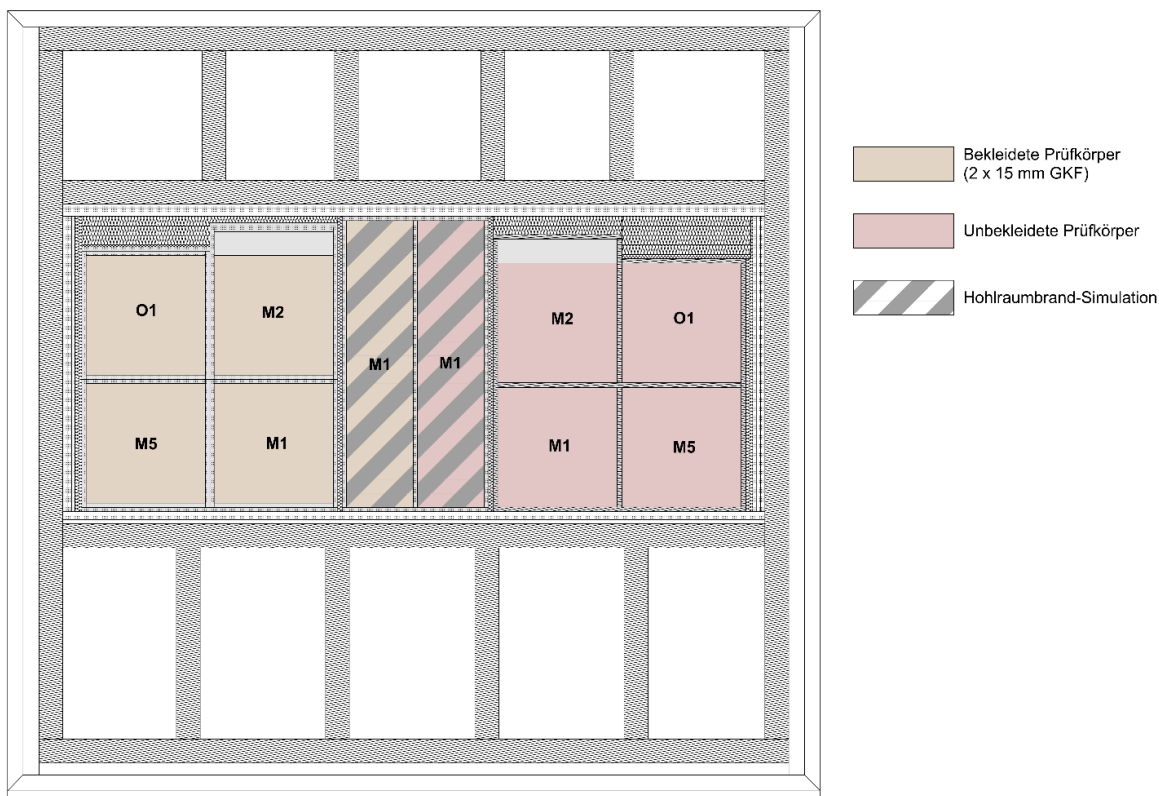


Abbildung 32: Skizze der Anordnung der Prüfkörper in der Öffnung des Wandprüfofens (Ansicht der feuerzugewandten Seite) [21]

Als Bekleidung der Hälfte aller Prüfkörper wurden zwei Lagen GKF-Feuerschutzplatten mit einer Dicke von jeweils 15 mm gewählt (rot hinterlegt in Abbildung 32). Um beurteilen zu können, ob sich die Wandbauteile im Bereich eines Deckenanschlusses im Brandfall anders verhalten, werden jeweils bei den Prüfkörpern der Serie M-2 eine 20 cm auskragende Decke aus einem Massivholzelement angebracht.

Da beispielsweise im Falle eines technischen Defekts oder bei nicht geschotteten Durchdringungen auch das Szenario eines Hohlraumbrandes auftreten kann, wird auch dieses Szenario experimentell untersucht. Hierzu werden diese Prüfkörper um 40 mm in Richtung brandzugewandter Seite aus der Holzständerkonstruktion gerückt, sodass die heißen Brandgase direkt in die Hohlräume ziehen können und dadurch ein solcher Hohlraumbrand simuliert wird (grau schraffiert in Abbildung 32). Die beiden Prüfkörper, die der Simulation eines Hohlraumbrandes dienen, messen jeweils $b/h = 0,28 \text{ m}/1,20 \text{ m}$. Prüfkörper welche der gewöhnlichen einseitigen Brandbeanspruchung ausgesetzt werden besitzen eine Abmessung von jeweils $b/h = 0,50 \text{ m}/0,50 \text{ m}$.

Abbildung 33 zeigt die Fertigung der Brandprüfkörper mit dem Einbringen der Thermoelemente (links) sowie den eingebauten Zustand im Wandprüfofen (rechts). Eine umfangreiche Beschreibung des Fertigungsprozesses sowie eine Fotostrecke befinden sich in [21].



Abbildung 33: Fertigung der Prüfkörper (links) und Ansicht der feuerzugewandten Seite nach Einbau aller Prüfkörper in die Öffnung des Wandprüfofens (rechts)

Für die Brandversuche wurden in die Prüfkörper Thermoelemente des Typs K zur Temperaturmessung eingebracht. Um keine verfälschten Messergebnisse zu erhalten, wurden die Thermoelemente analog zu Klippel [29] mindestens 50 mm parallel zu den Lamellen eingebracht. Hierfür werden die Probekörper 50 mm unterhalb der Bauteilmitte horizontal geteilt. Anschließend werden im Abstand von jeweils 20 mm in Bauteilmitte Löcher eingebohrt, die mind. 50 mm tief sind (s. Abbildung 33, links). Nachdem die Drähte in die Bohrlöcher eingebracht wurden, werden die Drähte in gefrästen Kanälen zur feuerabgewandten Seite weggeführt, die Kanäle mit Brandschutzsilikon verspachtelt und der Probekörper wieder verklebt

Bei den Probekörpern zur Simulation eines Hohlraumbrandes werden zusätzlich am unteren und oberen Rand Thermoelemente eingebohrt. Um die Temperaturentwicklung im Bereich der Deckenanschlüsse beobachten zu können, werden jeweils beim Prüfkörper der Serie M-2 ebenfalls am oberen Rand Thermoelemente eingebaut. Die Randabstände betragen jeweils rund 10 cm. In den Prüfkörpern zur Simulation der Hohlraumbrände und im unbedeckten Prüfkörper der Serie M-1 wurde an allen Messstellen eine zweite, um 4 cm versetzte Reihe an Thermoelementen eingebohrt. Dadurch ist es möglich, die Temperaturentwicklung im Bereich der Hohlräume und im Bereich der Leisten über die gesamte Bauteiltiefe zu vergleichen.

In Anlage WP5-3 sind die Messstellen der Thermoelemente im Prüfaufbau und deren Anzahl und Einbringtiefe über den jeweiligen Querschnitt in grafisch dargestellt.

Die Messstellen sind mit den Buchstaben A bis W gekennzeichnet und bestehen aus bis zu sechs Messpunkten, wobei sich der letzte Messpunkt auf der feuerabgewandten Bauteiloberfläche befindet und bei den Messstellen der Deckenanschlüsse (A und R) nicht gemessen wird (Abbildung A13).

Die Thermoelemente erhalten zur eindeutigen Identifikation eine zweistellige Bezeichnung „x.y“, wobei für „x“ der Buchstabe der entsprechenden Messstelle (A bis W) einzusetzen ist. Für „y“ ist die Nummer der Lage, die sich vor dem Thermoelement befindet oder, falls das Thermoelement in einem Kanal eingebracht wurde, „cav“ für Cavity einzusetzen. Die Messpunkte, die sich hinter der Bekleidung, unmittelbar auf der Bauteiloberfläche befinden, werden mit y = 0 beschrieben.

Die Holzfeuchte der Elemente wurde vor der Versuchsvorbereitung und nach dem Einbau der Prüfkörper in den Wandprüfofen mittels elektrischer Widerstandsmessung bestimmt und lag bei allen Prüfkörpern im Bereich $u_{15mm} = \pm 12\%$.

1.5.2.2 Versuchsdurchführung

Die Brandprüfung wurde unter der Einheitstemperaturkuve nach ISO 834 [30] im Wandprüfofen durchgeführt. Die Prüfdauer beträgt 90 Minuten. Während der gesamten Prüfung wurde die Temperaturkurve mittels 6 Thermoelementen innerhalb des Ofens in 10 cm Entfernung zur brandbeanspruchten Oberfläche aufgezeichnet und gegebenenfalls angepasst. Abbildung 34 zeigt die gemessene Temperaturkurve je Thermoelement (grau) sowie deren Mittelwert (schwarz). Der ermittelte Mittelwert deckt sich mit der Einheitstemperaturkuve nach ISO 834 [30].

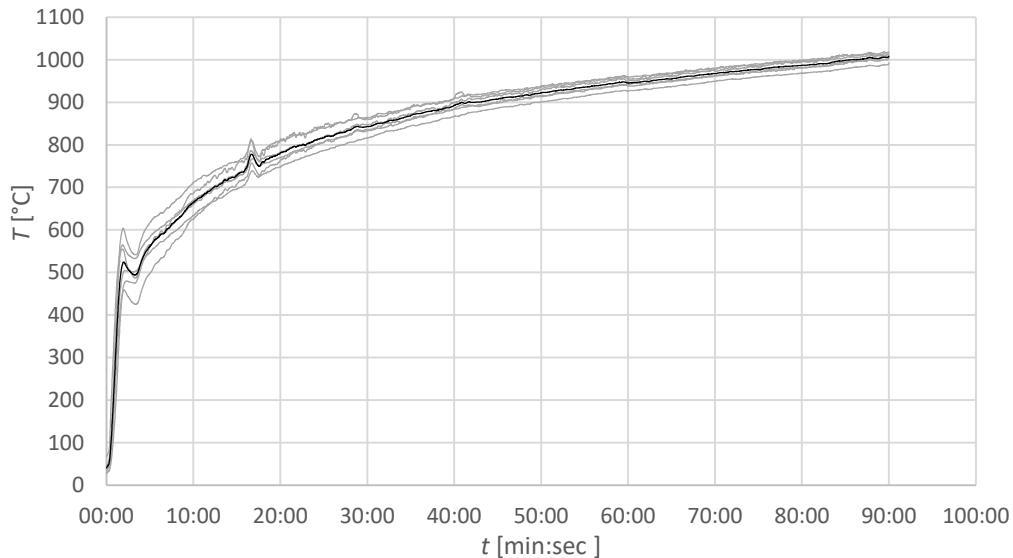


Abbildung 34: Gemessene Zeit-Temperaturkurven im Ofen (grau) sowie deren Mittelwert (schwarz)

Nachdem für die Serien zur Simulation eines Hohlraumbrandes nach den analytischen Berechnungsverfahren bereits nach etwa 60 Minuten ein Durchtritt von Rauchgas sowie ein Durchbrand erwartet wird, können diese Prüfkörper auf der raumzugewandten Seite mittels einer GFK-Feuerschutzplatte nach dem Durchtritt von Flammen abgedeckt werden (Abbildung 35, rechts). Dies stellt sicher, dass die Versuchsdauer von 90 Minuten erreicht werden kann.

Abbildung 35 zeigt den Durchbrand nach 60 Minuten in den Prüfkörpern der Serie M-1 mit Simulation eines zirkulierenden Hohlkammerbrandes und ohne Bekleidung (links). Rechts ist der Durchbrand von Serie M-2 ohne Bekleidung zu erkennen. Hier war kurz vor Ende der Prüfung, nach 89 Minuten, ein Durchtritt von Flammen zu erkennen. Nach 90 Minuten wurde die Messung gestoppt und mit dem Ablöschen begonnen.



$t = 60 \text{ min}$



$t = 90 \text{ min}$

Abbildung 35: Durchführung der Brandversuche mit Durchbrand nach 60 min (links) und 90 min (rechts)

1.5.2.3 Versuchsauswertung

- Vergleich der Serien O-1 und M-1 ohne GKF-Bekleidung

Abbildung 36 zeigt die mittels der Thermoelemente hinter jeder Lage gemessenen Zeit-Temperatur in der Referenzserie O-1, ohne GKF-Bekleidung, während der Temperatureinwirkung nach ISO 834 [30]. Der Verlauf der in Abbildung 36 dargestellten Kurven entspricht dem für ein fünflagiges BSP-Element in vergleichbaren Brandversuchen [29] gängigen Verlauf und validiert den Prüfaufbau zusätzlich. Es lässt sich erkennen, dass die Zündtemperatur von 300 Grad hinter der Außenlage ($t_i = 20$ mm) nach 30 Minuten erreicht wird. Dies entspricht der analytischen Lösung.

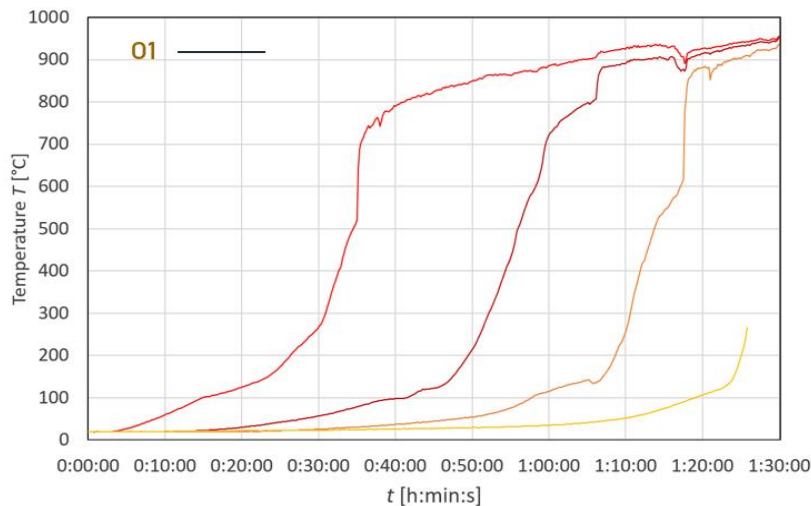


Abbildung 36: Zeit-Temperaturkurven in verschiedenen Tiefen (Messstellen) der Serie O1 (rechts) bei einseitiger Brandbelastung und ohne Bekleidung

Abbildung 37 vergleicht die Zeit-Temperaturkurven der multifunktionalen, thermisch aktivierten Serien M-1 (gestrichelte Linien) mit der Referenzserie O-1. Die Zeit-Temperaturkurven bestätigen die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung sowie die analytische Lösung. Bei Serie M1 kam es nach 69 Minuten zum Durchtritt von Rauchgasen und nach 90 Minuten zum Durchbrand zwischen den nicht schmalseitenverklebten Lamellen (nahezu zeitgleich mit Serie M-2).

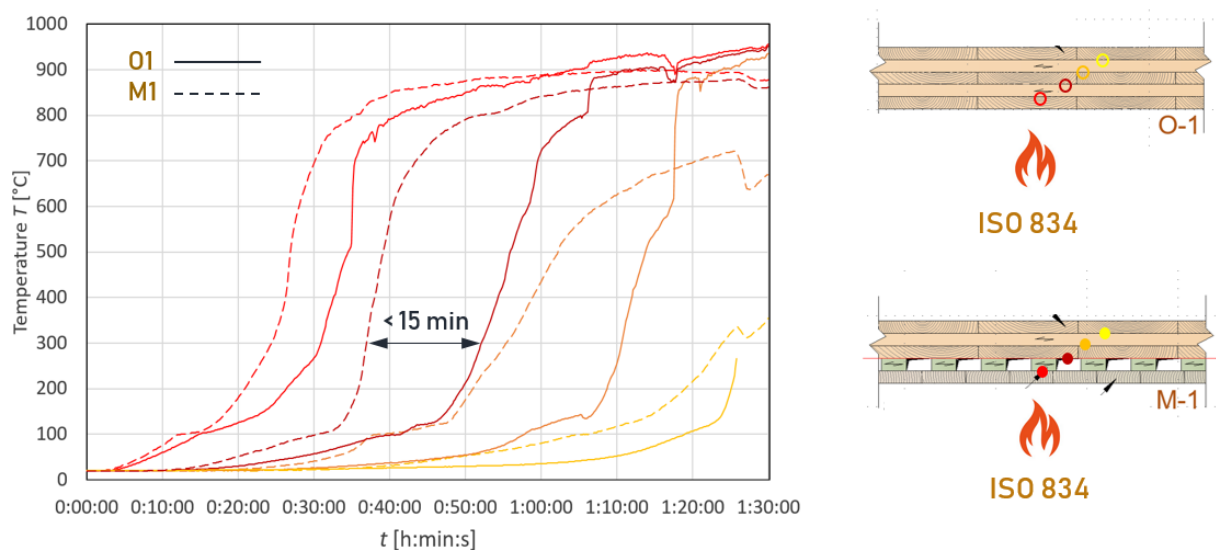


Abbildung 37: Zeit-Temperaturkurven in verschiedenen Tiefen (Messstellen) der Serien M-1 (gestrichelt) und O-1 (durchgezogen) bei einseitiger Brandbelastung und ohne Bekleidung

Die analytische Lösung liess auf einen Durchtritt von Rauchgasen nach 58 Minuten sowie einem Durchbrand nach 90 Minuten schließen (vgl. Abbildung 37). Für die BSP-Serie O1 wurde nach ca. 80 Minuten ein Durchtritt

von Rauchgasen beobachtet. Wie der Zeit-Temperaturkurve im Messprotokoll [21] an Messstelle V, Messpunkt V4, entnommen werden kann, wurde bei Minute 85 eine Temperatur von 250°C vor der letzten Lage gemessen (vgl. Abbildung 37). Hierbei kam es zu dem Durchtritt von Rauchgas, der Flammpunkt wurde jedoch noch nicht erreicht.

Insgesamt reduziert sich die Feuerwiderstandsdauer des thermisch aktivierten BSP-Elements gegenüber dem herkömmlichen BSP-Element um 15 min (Abbildung 37).

- Untersuchungen zu Hohlkammerbränden in den Kanälen

Abbildung 38 vergleicht exemplarisch die Zeit-Temperaturkurven der Serien M-1, ohne Beaufschlagung eines Hohlkammerbrandes, mit den Zeit-Temperaturkurven unter zusätzlicher Beaufschlagung durch einen zirkulierenden Hohlkammerbrand (gepunktete Linie). Beide Prüfkörper sind an der raumzugewandten (und damit der brandzugewandten Seite) unbedeckt und somit auch an ihrer jeweiligen Außenlage durch die ETK nach ISO 834 [30] einer Temperatureinwirkung ausgesetzt.

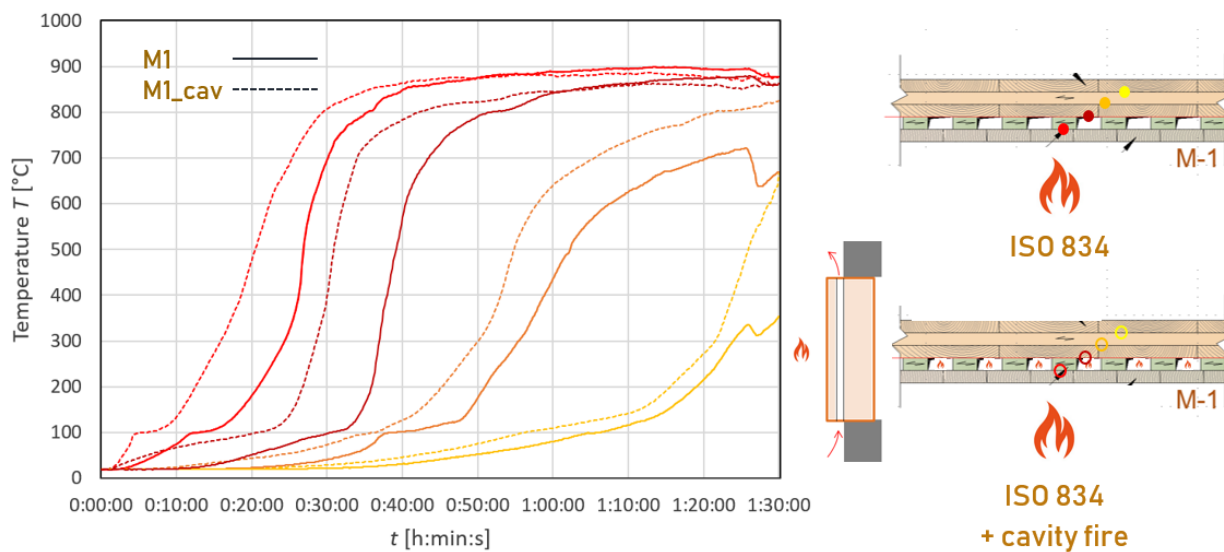


Abbildung 38: Zeit-Temperaturkurven in verschiedenen Tiefen (Messstellen) der Serien M1, ohne Hohlkammerbrand (links) und mit Hohlkammerbrand (rechts) bei zusätzlicher einseitiger Brandbelastung und ohne Bekleidung

Der direkte Vergleich zeigt, dass es im Falle eines zusätzlichen Hohlkammerbrandes zu einer erheblichen Verringerung der Feuerwiderstandsdauer kommt. Bereits 30 Minuten nach Versuchsbeginn wird innerhalb der Hohlkammer eine Temperatur weit über dem Flammpunkt von Holz gemessen, was bedeutet, dass die 3. Lage bereits nach 30 Minuten teilweise abgebrannt war. Die Zirkulation in der Hohlkammer (Kamineffekt) begünstigt den raschen Abbrand (nachfolgende Untersuchung).

Im Prüfkörper M1 mit Hohlkammerbrand (M1_cav) kommt es bei der Versuchsdurchführung nach 45 Minuten zum Durchtritt von Rauchgasen und nach 60 Minuten zum Durchbrand. Die Messung der Temperaturkurve kann diese Beobachtung in Teilen bestätigen. Der Durchtritt der Flammen nach 60 Minuten wurde zunächst in der Fuge zwischen Prüfkörper und Gipskartonumrandung festgestellt (s. Abbildung 35), weshalb die gemessene Zeit-Temperaturkurve – welche auf einen Durchbrand nach etwa 70 Minuten schließen lässt – plausibel erscheint.

Wie aus Abbildung 32 hervorgeht, sind die Prüfkörper zur Untersuchung von Hohlkammerbränden in den Kanälen 1,20 m hoch. Zudem verfügen diese Prüfkörper über Thermoelemente am Wandfuß, in Wandmitte (abgegriffene Messpunkte für die Zeit-Temperaturkurven M1_cav in Abbildung 38) sowie am Wandkopf. Dies ermöglicht die Beobachtung der Temperaturentwicklung und –Verteilung bei einem möglicherweise zirkulierendem Hohlkammerbrand in den Kanälen – umgangssprachlich „Kamineffekt“.

Abbildung 39 vergleicht die Zeit-Temperaturkurven der Serie M-1 am Wandfuß, in Wandmitte und am Wandkopf für die Beaufschlagung einer Temperatureinwirkung nach ISO 834 auf die Außenlagen sowie eines Hohlkammerfeuers (nach Erreichen des Flammpunktes der Pyrolysgase) unterhalb des Einlasses zu den Kanälen. Die Temperaturkurven am Wandfuß sind gepunktet, die in Wandmitte gestrichelt und die am Wandkopf als durchgängige Linie dargestellt.

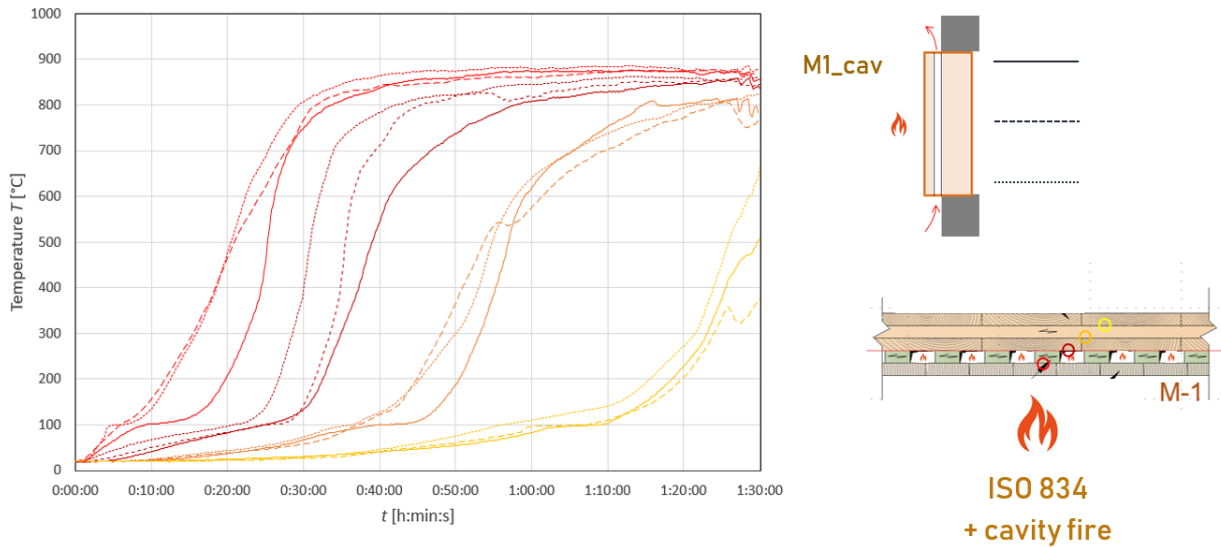


Abbildung 39: Zeit-Temperaturkurven in verschiedenen Tiefen (Messstellen) der Serien M1, ohne Hohlkammerbrand (links) und mit Hohlkammerbrand (rechts) bei zusätzlicher einseitiger Brandbelastung und ohne Bekleidung

Zu Beginn des Versuchs ($t < 10 \text{ min}$) ist die Temperatur am Wandkopf etwas geringer als am Wandfuß. Im Verlauf der Prüfung, und noch bevor der erste Lage abgebrannt ist ($t < 30 \text{ min}$) ist die Temperatur am Wandfuß deutlich größer, als die am Wandkopf. Ein möglicher Kamineffekt – bedingt durch den Abzug der Rauchgase am oberen Ende des Wandprüfofens – lässt sich nicht erkennen.

- Vergleich der Serien O-1 und M-1 mit 30 mm GKF-Bekleidung

Abbildung 40 vergleicht die Zeit-Temperaturkurven der multifunktionalen, thermisch aktivierten Serien M-1 (gestrichelte Linien) mit der Referenzserie O-1. Beide Prüfkörper sind mit 30 mm GKF-Feuerschutzplatten beplankt. Die Zeit-Temperaturkurven zeigen einen merklichen Temperaturanstieg hinter der Außenlage nach ca. 60 Minuten. Diese Messung entspricht der analytischen Lösung. Die 30 mm GKF gewährleisten eine Schutzzeit von 60 Minuten.

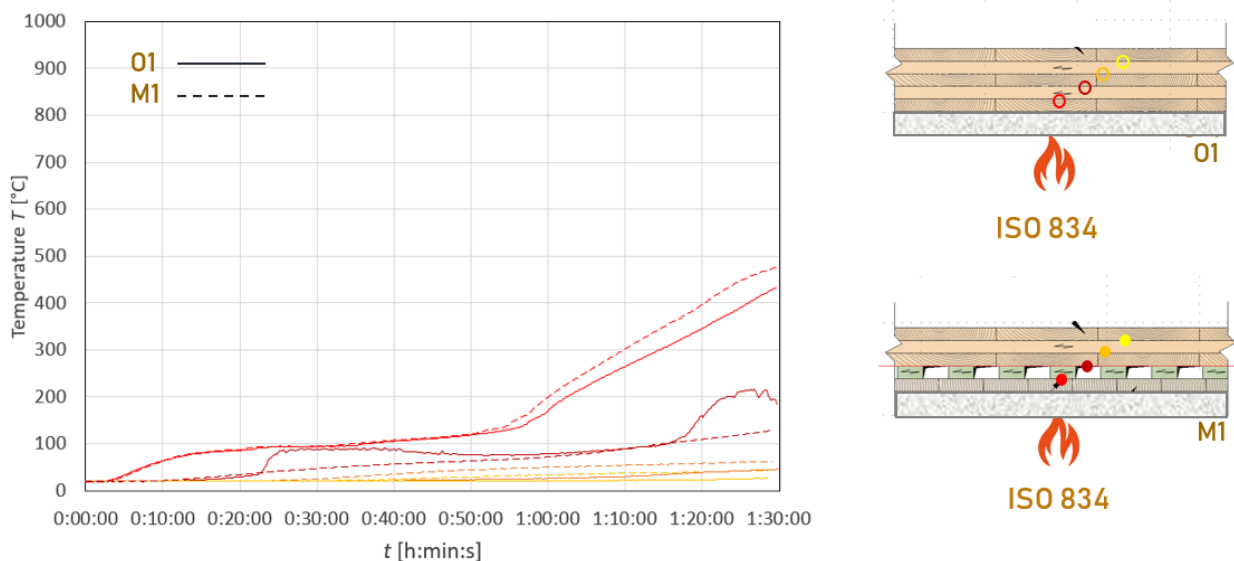
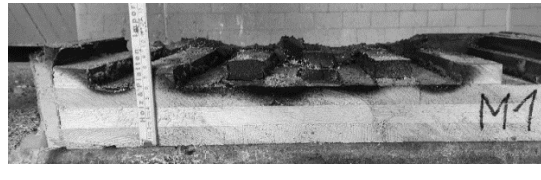

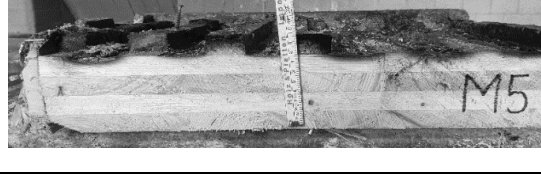
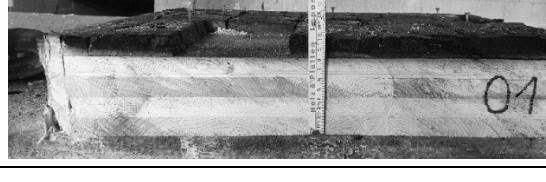


Abbildung 40: Zeit-Temperaturkurven in verschiedenen Tiefen (Messstellen) der Serien M1, ohne Hohlkammerbrand (links) und mit Hohlkammerbrand (rechts) bei zusätzlicher einseitiger Brandbelastung und ohne Bekleidung

Ziel dieser Untersuchung ist jedoch nicht der Nachweis einer Brandschutzbeplankung, sondern die Beurteilung des Abbrandverhaltens der darunterliegenden Prüfkörper. Anders als bei den unbeplankten Prüfkörpern, bleibt bei den GKF geschützten Prüfkörpern nach Versuchsende ($t = 90 \text{ min}$) ein Großteil des Querschnittes erhalten (s. Fotos in Tabelle 13).

Vergleicht man die Restquerschnitte der Serie M-1 mit dem der Serie M-2, so wird deutlich, dass die Mehrschicht-Massivholzplatte von Serie M-2 eine höhere Feuerwiderstandsdauer aufweist.

Tabelle 13: Restquerschnitte der mit 30 mm GKF beplankten Prüfkörper nach 90,0 min (ISO 834 [30])

Serie und Beplankung	Restquerschnitt	Fotos der Restquerschnitte nach der Prüfung
Serie M-1 + 30 mm GKF, nach 90,0 min ISO 834 [30]:	$t = 60 \text{ mm}$	
Serie M-2 + 30 mm GKF, nach 90,0 min ISO 834 [30]	$t = 60 \text{ mm}$ + 20 mm Stege + X	
Serie M-5 + 30 mm GKF, nach 90,0 min ISO 834 [30]	$t = 65 \text{ mm}$	
Serie O-1 + 30 mm GKF, nach 90,0 min ISO 834 [30]	$t = 80 \text{ mm} + X$	

Weiterführende Untersuchungen und Auswertungen, sowie eine Fotodokumentation und die Messdaten sind in [21] hinterlegt. Untersuchungen zu Brandschutzklappen an den Lufteinlässen und Luftauslässen sowie Untersuchungen mit aufschäumenden Brandschutzdichtungen befinden sich in [1].

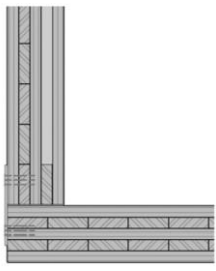
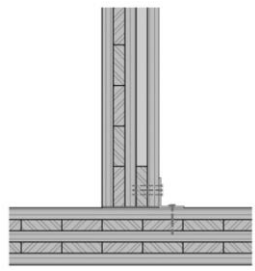
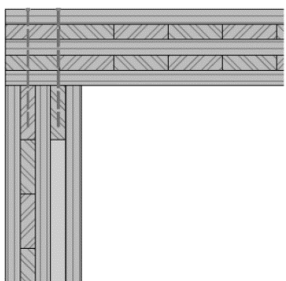
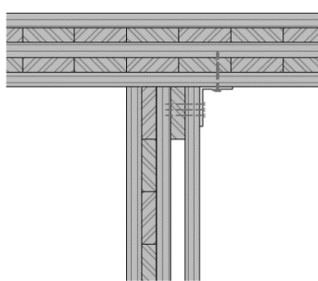
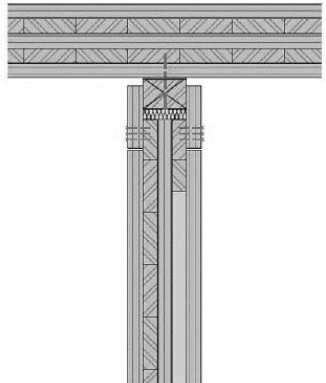
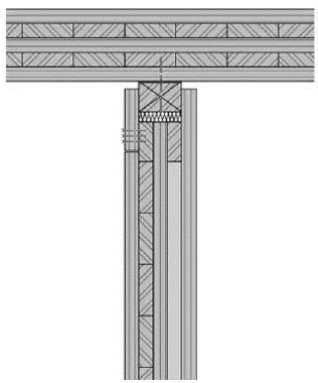
1.6 Katalog Verbindungstechniken für multifunktionale Massivholz-Wandelemente

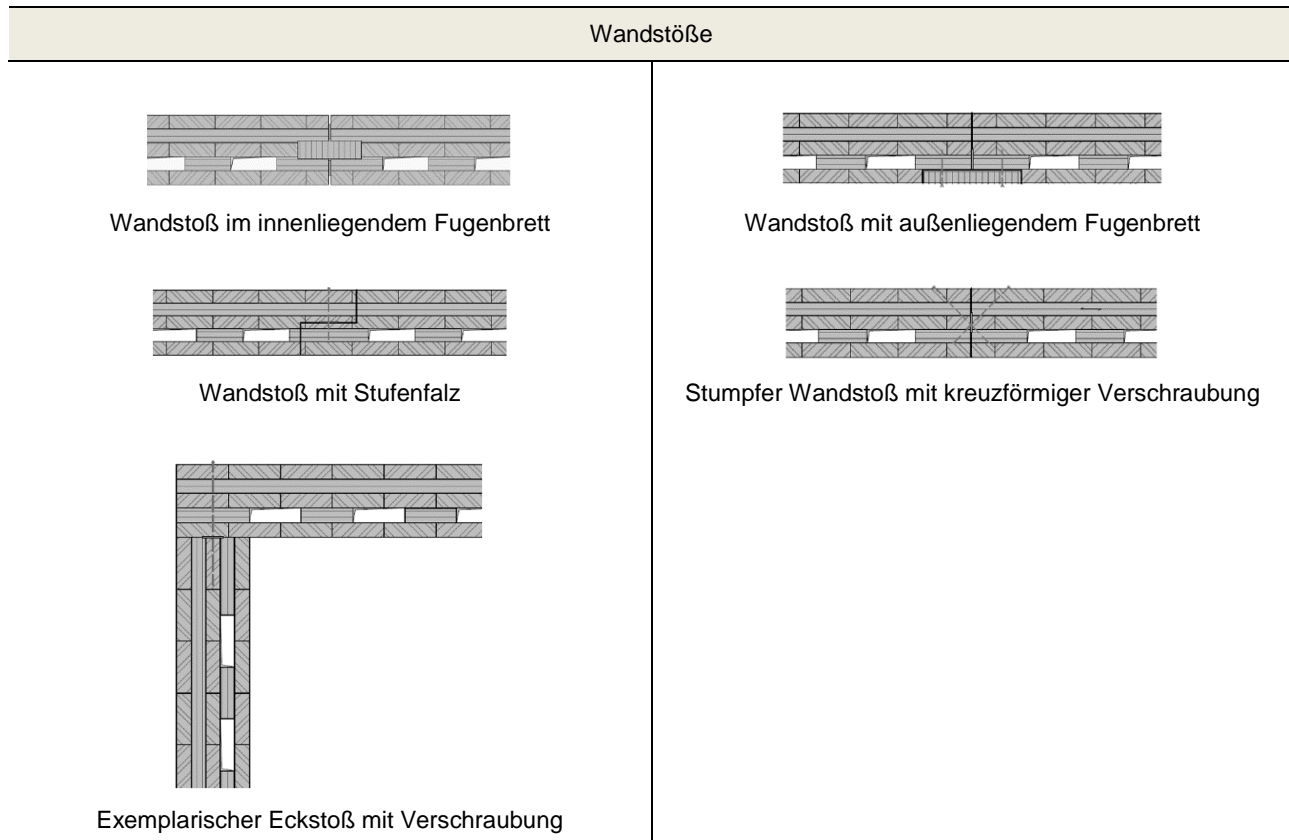
Im Forschungsvorhaben PhyTAB [6] wurden in enger Abstimmung mit dem Forschungsvorhaben InnoCrossLam Mustersystemlösungen und Musterdetails für multifunktionale BSP-Elemente erarbeitet.

Ziel ist, für herkömmliche BSP-Elemente geeignete Verbindungsmitteln und Verbindungstechniken auf die multifunktionalen BSP-Elemente zu übertragen oder entsprechend anzupassen. Prinzipiell gilt, dass die bemessungsrelevanten Spannungen im Regelbereich – also im Bereich der Wandmitte, welcher durch die Kanäle geschwächt ist – auftreten. Am Wandfuß und Wandkopf befinden sich bei thermisch aktivierten BSP-Elementen die Sammel-Verteiler-Kanäle (s. Tabelle 6, Schritt 4). Die vertikalen und horizontalen Kanäle umgibt seitlich jedoch weiterhin ein konstruktiver und ungeschwächter „Rahmen“, welcher unter anderem zur Anbringung von Befestigungsmitteln genutzt werden kann [6].

Tabelle 14 fasst einige der Musterdetails für thermisch aktivierbare Massivholzelemente (multifunktionales BSP) zusammen.

Tabelle 14: Musterdetails für Verbindungen, getrennt nach Anschlussort

Verbindungen am Wandfuß	
 <p>Stoß am Wandfuß mit Verplattung auf der hydrothermisch nicht aktivierten Oberfläche [6]</p>	 <p>Stoß am Wandfuß mit Verbindungsmittel auf der hydrothermisch aktivierten Bauteilseite [6]</p>
Verbindungen am Wandkopf (tragendes Wandelement)	
 <p>Stoß am Wandkopf mit Befestigung durch Verschraubung in der Decke [6]</p>	 <p>Stoß am Wandkopf mit Verbindungsmittel auf der hydrothermisch aktivierten Bauteilseite [6]</p>
Verbindungen am Wandkopf (nicht-tragendes Wandelement)	
 <p>Beidseitig ausgesparte außenliegende Lage am Wandkopf mit nachträglicher Beplankung zur Lagesicherung des Bauteils [6]</p>	 <p>Einseitig ausgesparten außenliegende Lage am Wandkopf (Z-Falz) mit nachträglicher Beplankung zur Lagesicherung des Bauteils [6]</p>



Die dargestellten Regeldetails zeigen, dass sich nahezu alle für herkömmliche BSP-Wandelemente gängigen Verbindungstechniken auf multifunktionale BSP-Wandelemente übertragen lassen.

1.7 Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Forschung an multifunktionalem CLT

Multifunktionales BSP erschließt im Massivholzbau neue Anwendungsgebiete und erhöht durch erweiterte Funktionalität die Wertigkeit von Massivholzelementen. Im Vergleich zu konventionellem BSP, dessen Vorteile sich vor allem auf die mechanischen Eigenschaften beschränken, eröffnet multifunktionales BSP eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche und Möglichkeiten - etwa die Integration von Haustechnik oder die Raumkonditionierung durch thermische Aktivierung.

Die wichtigsten Ergebnisse der Forschung an multifunktionalem BSP sind:

- Die Verringerung der Querschnittsfläche durch die Kanäle hat nicht zwangsläufig eine Reduktion der Druckfestigkeit und -Steifigkeit des Gesamtquerschnittes zur Folge.
- Bei der Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit und -steifigkeit führen die Kanäle zu einem Abbruch der Funktionslage und damit zu einem Netto-Schubversagen des verbleibenden BSP-Basiselements. Aufgrund der hohen Qualität der schmalseitenverklebten Außenlagen liegt die Scheibenschubsteifigkeit der multifunktionalen Gesamtquerschnitte jedoch auf gleichem oder höherem Niveau als die von herkömmlichen BSP.
- Die Knicklasten der multifunktionalen Serien sind geringer als die der Referenzserie, u.a. weil die Kanäle zu einer Verschiebung des Schwerpunkts der Elemente und damit zu einer inneren Exzentrizität führen. Mit einer mittleren Knicklast von 0,61 MN/m erweisen sich die untersuchten multifunktionalen Serien jedoch als ausreichend tragfähig, um als tragende Wandelemente eingesetzt zu werden. Die Knicklast ist um ein Vielfaches höher als die von Holztafelwänden vergleichbarer Dicke.
- Die umfangreichen Klimatests zeigen deutlich, dass die Qualität und Robustheit der Außenlage von entscheidender Bedeutung für das Verformungsverhalten und das Rissbild bei wechselndem Heiz- und Kühlbetrieb der Elemente ist. Es ist daher ratsam, für die hygrothermisch aktivierten Außenlagen hochwertige einlagige, besser mehrlagige, Massivholzplatten zu verwenden.
- Die Untersuchungen zum Brandverhalten haben gezeigt, dass sich die Feuerwiderstandsdauer von BSP mit Hohlkammern ziemlich genau über bereits bekannte analytische Berechnungsmethoden bestimmen lässt.
- Im Vergleich zu herkömmlichen BSP-Elementen reduziert sich die Feuerwiderstandsdauer von multifunktionalen BSP Elementen mit vergleichbarem Lageraufbau um etwa 30 Minuten.

Das Potenzial von multifunktionalem BSP ist offensichtlich. Der Verzicht auf sichtbare Radiatoren schafft einen architektonischen Mehrwert und erhöht den Komfort. Die Integration der Herstellung einer großen Anzahl von multifunktionalen Prüfserien in die Fertigung herkömmlicher BSP-Elemente hat gezeigt, dass die Produktion von multifunktionalem BSP wirtschaftlich und im industriellen Maßstab erfolgen kann.

2. Innovatives BSP mit diagonaler Lagen-Orientierung – Diagonal Laminated Timber (DLT)

2.1 Allgemeine Erläuterungen

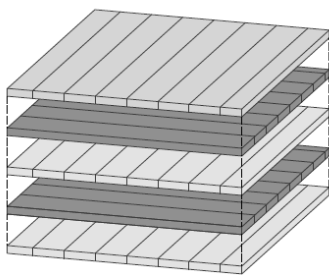
2.1.1 Ziel der Forschung an DLT

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entwicklung von diagonal verklebtem Brettsperrholz (Diagonallagenholz, Diagonal Laminated Timber – DLT), ein Laminat aus Massivholz-Lagen welche zur Erhöhung der Steifigkeitseigenschaften in einem bestimmten Winkel zueinander angeordnet werden. DLT stellt somit eine anwendungsoptimierte, innovative Weiterentwicklung von Brettsperrholz (BSP, Cross Laminated Timber – CLT) dar und erreicht bei gleichem Materialeinsatz deutlich verbesserte mechanische Eigenschaften. In Kapitel 2 dieses Berichts wird herkömmliches, orthogonal verklebtes BSP mit seiner englischen Bezeichnung CLT abgekürzt, diagonal verklebtes BSP wird mit DLT abgekürzt. Beide Bezeichnungen implizieren die geometrische Anordnung der einzelnen Lagen zueinander. Kapitel 2 beinhaltet die analytischen Herleitung der Steifigkeitsmatrix sowie die experimentelle Charakterisierung der Steifigkeitsparameter. Die Untersuchungen wurden an spezifischen DLT Serien durchgeführt, welche durch die Ausrichtung von Lagen unter Winkeln von $\pm 45^\circ$ bzw. $\pm 30^\circ$ ($\pm 60^\circ$) gekennzeichnet sind.

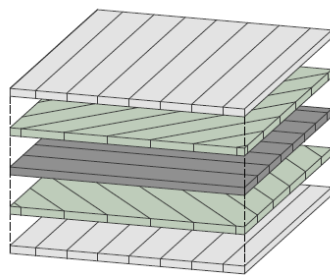
Die Forschung an DLT hebt die Relevanz und Eignung diagonal ausgerichteter Lagen in Massivholzelementen für einen nachhaltigeren und effektiveren Umgang mit der Ressource Holz in besonderem Maße hervor. Dabei wird DLT herkömmliches CLT nicht verdrängen, sondern zu einer Erweiterung der Produktpalette im Massivholzbereich führen. DLT eignet sich für anspruchsvolle Anwendungen in Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG), wie beispielsweise bei Durchbiegungen infolge kombinierte Torsions- und Biegebeanspruchungen und Schwingungen, als auch in Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT), beispielsweise aufgrund konzentrierter Spannungen durch Punktlagerungen oder Deckenfeldern mit großen Öffnungen.

Ziel ist die Entwicklung und Implementierung eines Massivholzelementes mit verbesserten mechanischen Eigenschaften für Platten unter zweiachsiger Biegung und konzentrierter Lasteinleitung. Diese Beanspruchung liegt beispielsweise bei punktgestützten Decken vor. DLT stellt eine anwendungsoptimierte Weiterentwicklung von CLT dar. Herkömmliches CLT besteht aus einzelnen Nadelholz Lamellen, die kreuzweise miteinander verklebt werden; dies geschieht in Winkeln von 0° und 90° . Bei DLT hingegen werden die Lagen unter einem von 0° und 90° abweichenden Winkel θ miteinander verklebt. Für jede $-\theta$ -Lage gibt es einer $+\theta$ -Lage innerhalb des Laminats (Abbildung 41).

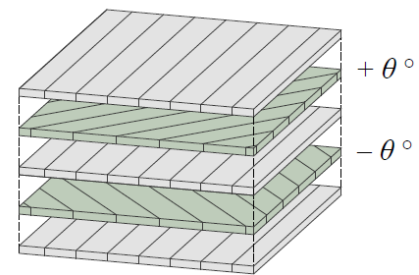
Cross Laminated Timber (CLT)



Diagonal Laminated Timber (DLT)



mainly
for biaxial load transfer



mainly
for uniaxial load transfer

Abbildung 41: Beispielhafter Aufbau von 5-lagigen CLT- und DLT-Elementen [17]

Die diagonale Orientierung einzelner Lagen verspricht deutlich erhöhte Steifigkeiten in Scheiben- und Plattenebene. So sind für DLT unter gleicher Belastung und statischem System geringere Verformungen als bei CLT zu erwarten. Darüber hinaus verspricht die diagonale Orientierung einzelner Lagen eine weitere Homogenisierung der orthotropen Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften. Dies kann positive Auswirkungen auf die Spannungsverteilung bei konzentrierter Lasteinleitung haben. Zusätzlich entstehen durch die diagonale Anordnung der Lamellen Vorteile auf die Tragfähigkeit von Schraubenverbindungen insbesondere bei Anordnungen an den Schmalseiten. Ziel der analytischen, experimentellen und numerischen Untersuchungen ist, die Steifigkeitseigenschaften von DLT in Abhängigkeit von Anzahl und Orientierung der Lagen zu bestimmen.

2.1.2 Bezeichnung und Abkürzung

Im mehrgeschossigen Holzbau werden zumeist CLT-Elemente für Wand und Deckenscheiben sowie aussteifende Gebäudekerne eingesetzt. Dabei ist die Konstruktion der Decken oftmals auf einachsige Lastabtragung ausgelegt. Die Haupttragrichtung (x-Richtung) des CLT Deckenelementes folgt der einachsigen Spannrichtung des statischen Systems. Folglich werden CLT Decken in der Regel linear auf Wänden oder Trägern gelagert.

Die Abkürzung DLT wird auch für Dowel Laminated Timber verwendet, eine Brettstapeldecke, deren Lamellen mit Dübeln aus Weich- oder Hartholz zusammengefügt werden [33]. Eine alternative und allgemeinere Bezeichnung für Dowel Laminated Timber ist Doweled Wood – abgekürzt zu DW.

2.1.3 Kontext

Im mehrgeschossigen Holzbau werden zumeist CLT-Elemente für Wand und Deckenscheiben sowie aussteifende Gebäudekerne eingesetzt. Dabei ist die Konstruktion der Decken oftmals auf einachsige Lastabtragung ausgelegt. Die Haupttragrichtung (x-Richtung) des CLT-Deckenelementes folgt der einachsigen Spannrichtung des statischen Systems. Folglich werden CLT-Decken in der Regel linear auf Wänden oder Trägern gelagert.

Punktgestützte Flachdecken im Massivholzbau sind aufgrund der geringer Schubtragfähigkeit der Querlagen und den hierdurch zumeist erforderlichen Verstärkungsmaßnahmen (Vollgewindeschrauben, Stahlsystemverbinder) bis heute noch eher selten [4; 5], werden aber auf Grund der Möglichkeiten der flexibleren Grundrissgestaltung ähnlich wie im Betonbau vermehrt zum Einsatz kommen. Der zweiachsige Lastabtrag führt zu Torsion und damit zu einer doppelten Krümmung κ_{xy} der Decke (Abbildung 42). Folglich sollte eine punktgestützte Massivholzdecke neben einer hohen Schubsteifigkeit S_{xz} und S_{yz} auch eine möglichst hohe Torsionssteifigkeit B_{xy} aufweisen.

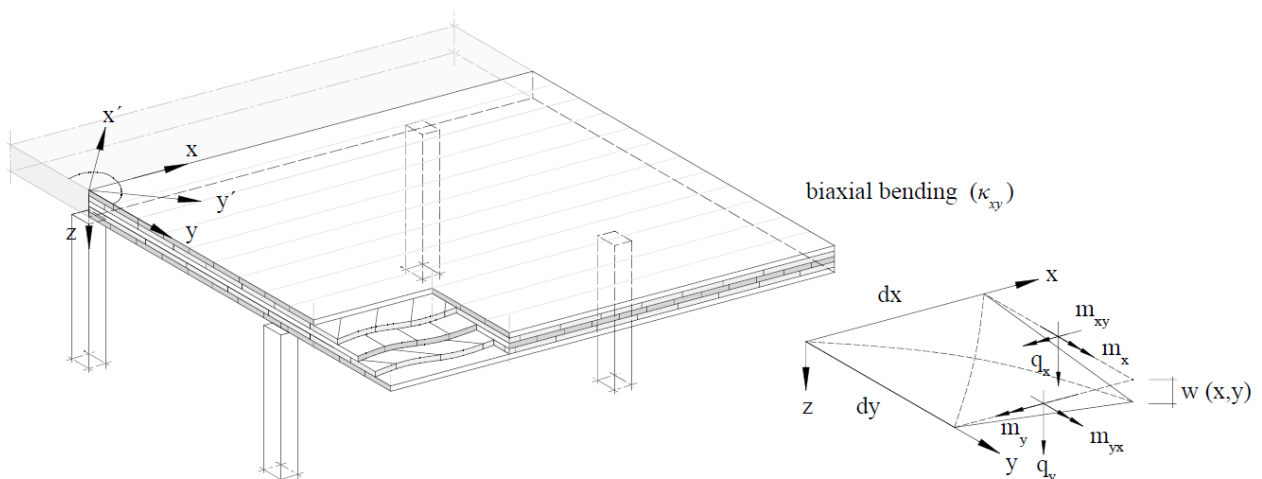


Abbildung 42: Punktgestütztes DLT Element unter zweiachsiger Biegung [17]

Die maximale Durchbiegung einer punktgestützten Decke unter konstanter Flächenlast tritt in der Mitte der Platte auf und folgt den jeweiligen Diagonalen zwischen den Stützen. Übertragen auf ein Standard-Konstruktionsraster könnte das Layup von DLT Elementen den entsprechenden Biegelinien angepasst werden. Bei der Verwendung von DLT als Scheibe oder wandartiger Träger, können die Diagonalen an die Druck- und Zugstreben (Spannungs-Trajektorien) eines fiktiven Fachwerks angepasst werden. Dies macht den Einsatz von DLT auch für wandartige Träger mit großen Öffnungen oder Ausklinkungen interessant. Auch die Konstruktion geeigneter Lösungen für die Ausführung von Deckenecken stellt im mehrgeschossigen Holzbau eine große Herausforderung dar. Oft führt dies zur Einführung von Sekundärkonstruktionen, wie z.B. Unterzügen.

2.1.4 Ökonomie und Ökologie

Die vielfältigen Vorteile des Massivholzbaus gegenüber der herkömmlichen Massivbauweise (Stahlbeton und Mauerwerk) haben in den letzten Jahrzehnten zu einem beachtlichen Anstieg der Produktionskapazitäten geführt. Erhebungen des Portals *Holzkurier* zeigen, dass vor 2010 das geschätzte Produktionsvolumen von Massivholzelementen in den europäischen Ländern Österreich, Schweiz, Deutschland, Italien und Tschechien

bei etwa 250.000 m³ pro Jahr lag. Im Jahr 2020 betrug das Produktionsvolumen bereits mehr als 1 Mio. m³, und für 2022 werden bis zu 2 Mio. m³ prognostiziert [37]. Die Vorteile der Massivholzbauweise sind – neben den ökologischen Aspekten – vielfältig und bieten die Chance den Herausforderungen des zukünftigen nachhaltigen Bauens gerecht zu werden:

- Holz hat im Vergleich zu Beton ein um den Faktor 5 geringeres Eigengewicht. Daher eignet sich die Holzbauweise hervorragend für die Nachverdichtung in urbanen Gebieten und für das Bauen im Bestand im Allgemeinen.
- Die Holzbauweise kann im Vergleich zu Ziegel oder Stahlbeton als trockene Bauweise bezeichnet werden. Es wird kein Wasser zum Fügen oder Verarbeiten benötigt, das anschließend in langen Aushärtungs- und Trocknungsphasen dem Bauwerk entzogen werden müsste.
- Der hohe Vorfertigungsgrad und die mögliche Integration von Haustechnik ermöglichen eine große Zeitersparnis bei der Errichtung von Gebäuden vor Ort und können dadurch auch entsprechende Qualitätsanforderungen leichter einhalten.
- Im Forschungsprojekt Homera der Technischen Universität München wurden 2019 mehr als 42 Einzelstudien untersucht, die sich mit der Wirkung von Holz auf das Raumklima und damit auf den Menschen in geschlossenen Räumen beschäftigen [38]. Das Ergebnis ist nicht überraschend: Der Geruch von Holz in geschlossenen Wohn- und Arbeitsräumen ist angenehm und steigert die Leistungsfähigkeit, so wie ein Waldspaziergang gesund und erfrischend ist.
- Auch eine hohe raumakustische Qualität kann durch Holzoberflächen erreicht werden. Ein Beispiel ist der Bau der neuen Interimsspielstätte Gasteig HP8 in München. Wände und die Decken des Konzertsaals bestehen aus akustisch optimiertem CLT (ca. 1300 m³) [39].
- Ein zerstörungsfreier Rückbau von Holzkonstruktionen und damit eine komplette oder teilweise Wiederverwend- und Verwertbarkeit ist oft gegeben.

Trotz vieler Vorteile liegt die Häufigkeit der Anwendung von CLT und DLT noch hinter mineralischen Baustoffen zurück. Einer der Gründe dafür sind vor allem auch noch die teilweise fehlende Standardisierung der Produkte und die Übernahme in harmonisierte Regelwerke. Auch Misstrauen, Informationsdefizite und einseitige Sichtweisen auf den Feuerwiderstand von Holzkonstruktionen behindern die Errichtung von Holzbauten. Zudem fehlt vielen Planern das notwendige Fachwissen für die Bemessung von Massivholzelementen. Die meisten der derzeit auf dem europäischen Markt erhältlichen Massivholzprodukte werden durch Verklebung hergestellt und haben einen symmetrischen, kreuzweisen Schichtaufbau. 15 von 17 Massivholzprodukten, die derzeit vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) in nationalen und europäischen Zulassungslisten aufgeführt sind, sind CLT-Produkte [40]. Ein verklebtes Massivholzprodukt mit diagonaler Ausrichtung einzelner Lagen (DLT) ist bisher nicht auf dem Markt erhältlich. Hierfür müsste das EAD 130005-00-0304 [41] in einem ersten Schritt auf diagonale Lagen-Orientierung noch erweitert werden.

Das zukünftige wirtschaftliche Potenzial für die forst- und holzverarbeitende Industrie ist groß. Die Weiterentwicklung neuer und bestehender Massivholzprodukte, wie z.B. DLT, ist für die weitere Steigerung des Produktionsvolumens von Massivholzelementen unabdingbar. Daher müssen die Bauwirtschaft und die holzverarbeitende Industrie verstärkt in Forschungsprojekte eingebunden und auf innovative Massivholzanwendungen ausgerichtet werden. In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig, dass die politischen Entscheidungsträger das Potenzial des Massivholzbaus erkennen und die rechtlichen Rahmenbedingungen entsprechend angepasst werden. Die Optimierung von Massivholzprodukten für die Anwendung durch zusätzliche Funktionalität – wie thermischer Aktivierung oder Vorspannung – ist ein großer Zukunftsmarkt.

2.1.5 Stand der Technik

Bisherige Studien haben sich größtenteils mit der Verbesserung der Scheibenschubtragfähigkeit von Massivholzelementen mit diagonaler Lagen-Orientierungen beschäftigt [42; 43]. Dies erscheint naheliegend, da die Erhöhung der Scheibenschubsteifigkeit durch diagonale Ausrichtung einzelner Lagen nach ingenieurwissenschaftlichem Grundverständnis offensichtlich erscheint.

Ganz anders ist der Stand der Technik hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und Tragfähigkeit von Massivholzelementen mit diagonaler Lagen-Orientierung unter Plattenbeanspruchung. Für CLT unter einachsiger Lastabtragung dienen die Querlagen (90° Lagen) lediglich als Abstandshalter zwischen den Lagen in Haupttragrichtung und fördern die Formstabilität. Im Interesse eines ressourcenschonenden Bauens und aufgrund der hohen Wertigkeit des Materials sollte allen Lagen eine Tragfunktion zugewiesen werden.

2.2 Theoretische Grundlagen

2.2.1 Mechanik von orthotropen Laminaten

Laminats werden hinsichtlich ihrer Reaktion auf mechanische Belastungen charakterisiert, was mit einer Beschreibung des Kopplungsverhaltens verbunden ist. Die Matrix Notation des Elastizitätsgesetzes für das Plattenelement besteht aus verschiedenen Teilmatrizen. Diese werden als Scheibensteifigkeitsmatrix A , Koppelsteifigkeitsmatrix B und Plattensteifigkeitsmatrix D bezeichnet. Die resultierende ABD Beziehung wird häufig in kompakter Matrix Notation nach Gleichung (AP5-18) angeschrieben [44].

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ A & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (\text{AP5-18})$$

Eine Ausführliche Herleitung der ABD Beziehung inklusive der transformierten und transponierten Steifigkeitsmatrizen kann beispielsweise [33] oder [45] entnommen werden.

Zur Berücksichtigung der Querkraft-Schubverzerrungs-Beziehungen wird im Folgenden eine vierte Submatrix E eingeführt. Die Submatrix E ist mathematisch von der ABD Beziehung (Gleichung (AP5-19)) entkoppelt.

$$\begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{55} & E_{54} \\ E_{45} & E_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{xz} & \beta_y \\ \gamma_{yz} & \beta_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x \cdot \bar{Q}_{55} & \sqrt{k_x k_y} \cdot \bar{Q}_{54} \\ \sqrt{k_y k_x} \cdot \bar{Q}_{45} & k_y \cdot \bar{Q}_{44} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [\gamma_{xz} + \beta_y] dz \right\} \quad (\text{AP5-19})$$

In Gleichung (AP5-19) wird, wie bei isotropen Platten, ein Schubkorrekturfaktor eingeführt. Für Laminats mit stark anisotropen Lagen unterscheiden sich die Schubkorrekturfaktoren k_x und k_y deutlich von den Schubkorrekturfaktoren für isotrope Platten ($k = 5/6$). Dies ist auf die aus der Orthotropie entstehenden stark nichtlineare Verteilung der Schubverzerrungen über den Querschnitt zurückzuführen. Ein gängiger Ansatz zur Bestimmung des Schubkorrekturfaktors – gültig für CLT und DLT – wird im Folgekapitel beschrieben.

Die Matrixdarstellung des Elastizitätsgesetzes für CLT- und DLT-Elemente kann mittels Gleichung (AP5-20) dargestellt werden. Die um die vierte Submatrix E erweiterte ABD Beziehung wird in diesem Bericht als $ABD-E$ Matrix bezeichnet.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} & 0 & 0 \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} & 0 & 0 \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} & 0 & 0 \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & E_{54} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{45} & E_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (\text{AP5-20})$$

Eine mögliche kompakte Notation der $ABD-E$ Beziehung ist durch Gleichung (AP5-21) gegeben:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \\ V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 \\ A & D & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (\text{AP5-21})$$

2.2.2 Schubkorrekturfaktor nach der Timoschenko-Balken-Theorie

Eine mögliche Berechnung der Schubkorrekturfaktoren für Laminats aus beliebig orientierten Lagen mit orthotropen Materialeigenschaften basiert auf der Timoschenko-Balken-Theorie nach Gleichung (AP5-22) [46]. Die Herleitung resultiert auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen und dem Gleichgewicht zwischen Schub- und Biegesteifigkeiten über den Querschnitt [47].

Die Verwendung dieses Schubkorrekturfaktors ist im Österreichischen Nationalen Anhang zur EN 1995-1-1 [48] enthalten und wurde von Schickhofer und Wallner-Novak vorgeschlagen [49; 50]. Eine detaillierte Herleitung von Gleichung (AP5-22) findet sich beispielsweise in [17] und [51].

$$1/k_z = \frac{\sum G_{iz} A_i}{\left(\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} E_i(z) z^2 dz \right)^2} \cdot \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{\left(\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} E_i(z) z dz \right)^2}{G_{iz}(z)} dz = \frac{\sum G_{iz} A_i}{(\sum (EI + EAa^2))^2} \cdot \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{[E(z) \cdot S(z)]^2}{G_{iz}(z)} dz \quad (\text{AP5-22})$$

Der Ausdruck auf der rechten Seite von Gleichung (AP5-22) enthält die Summe der Schubsteifigkeiten jeder Lage, dividiert durch das Quadrat der Biegesteifigkeit und Dehnsteifigkeit. Der Ausdruck auf der linken Seite von Gleichung (AP5-22) enthält ein Doppelintegral, das die E-Moduln und das statische Moment beinhaltet. Das Doppelintegral wird für jede Schicht mit Hilfe von Polynomen bestimmt und kann mittels Gleichung (AP5-23) dargestellt werden.

$$\int_{z_{i,max}}^{z_{i,min}} [ES_i]^2 dz = \frac{E_i^2}{60} (-8z_{i,min}^5 - 10z_{i,min}^2 z_{i,max}^3 + 15z_{i,max}^4 z_{i,min} + 3z_{i,max}^5) + ES_i \frac{E_i^2}{60} (40z_{i,min}^3 - 60z_{i,max}^2 z_{i,min} + 20z_{i,max}^3) + ES_i^2 (z_{i,min} - z_{i,max}) \quad (\text{AP5-23})$$

2.2.3 Steifigkeitsparameter und effektive Steifigkeitsparameter

DLT ist ein antisymmetrisches Laminat – d.h., die Lagen des Laminats sind über die geometrische Mittelebene gespiegelt, haben jedoch eine entgegengesetzte Ausrichtung. Folglich gibt es für jede $+\Theta$ -Lage im Laminat eine gleich dicke $-\Theta$ -Lage [44]. Zudem haben diese Lagen die jeweils gleichen Dicken.

Für antisymmetrischen Laminat können Vereinfachungen gemäß [52] vorgenommen werden ($A_{16} = A_{26} = D_{16} = D_{26} = B_{11} = B_{12} = B_{22} = B_{66} = E_{54} = 0$), was beispielsweise bei DLT zur Steifigkeitsmatrix nach Gleichung (AP5-24) führt [53].

$$[Q] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & B_{16} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & B_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & B_{61} & B_{62} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{16} & D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{26} & D_{21} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ B_{14} & B_{24} & 0 & 0 & 0 & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{AP5-24})$$

Die einzelnen Steifigkeiten in globale x- und y-Richtung können nun der Steifigkeitsmatrix entnommen werden. So entspricht der Eintrag A_{11} der Dehnsteifigkeit D_x und A_{22} der Dehnsteifigkeit D_y . Die Scheibenschubsteifigkeit D_{xy} wird durch den Eintrag A_{66} abgebildet. Für Massivholzelemente ohne Schmalseitenverklebung empfiehlt EC5/NA [13] in Gleichung (NA. 28) einen Vorfaktor von 0,25 (Gleichung (AP5-25)).

$$D_{xy} = \frac{1}{4} \cdot \sum (G_{xy,i} \cdot d_i) = 1/4 \cdot A_{66} \quad (\text{AP5-25})$$

Die Biegesteifigkeiten B_x und B_y entsprechen den Einträgen D_{11} und D_{22} . Die Schubsteifigkeiten S_{xz} und S_{yz} entsprechen den Einträgen E_{44} und E_{55} und beinhalten die Schubkorrekturfaktoren (s. Gleichung (AP5-19)). Alternativ kann die Schubsteifigkeit von DLT näherungsweise nach dem Schubanalogieverfahren berechnet werden [54]. Hierbei werden für die Schubmoduln die jeweils transformierten Werte aus der Transformationsmatrix der Einzellagen eingesetzt; z.B. ($G_{45} = 370 \text{ MN/m}^2$) [17]. Effektive Biegesteifigkeiten $B_{x,eff}$ und $B_{y,eff}$ können über die Rückrechnung der Biege- und Schubverformungen an Ersatzsystemen unter Verwendung des Prinzips der virtuellen Verschiebungen (Method of consistent deformations; force method) berechnet werden [17; 54]. Die effektive Biegesteifigkeit $B_{x,eff}$ an einem Einfeldträger unter Einzellast ergibt sich beispielsweise nach Gleichung (AP5-26) [17]:

$$\frac{1}{B_{x,eff}} = \frac{1}{|B_x|} - \frac{48}{4} \cdot \frac{1}{|S_{xz}| \cdot l^2} \quad (\text{AP5-26})$$

Eintrag D_{66} in der Steifigkeitsmatrix entspricht der Torsionssteifigkeit B_{xy} . Aufgrund der Annahmen des Ebenbleibens der Querschnitte ($2\gamma = \varepsilon$) besteht der Zusammenhang nach Gleichung (AP5-27):

$$B_{xy} = 2D_{66} \quad (\text{AP5-27})$$

Die effektive Torsionssteifigkeit, welche Biege- und Schubverformungen berücksichtigt, kann ebenfalls mittels des Prinzips der virtuellen Verschiebungen an einem Trägerrost gemäß Gleichung (AP5-28) berechnet werden [33] (vgl. Kapitel 1.4.3 dieses Berichts).

$$\frac{1}{|B_{xy,eff}|} = \frac{1}{|B_{xy}|} - \frac{1}{6 \cdot |B_x|} - \frac{1}{6 \cdot |B_y|} - \frac{1}{2 \cdot |S_{xz}| \cdot dx} - \frac{1}{2 \cdot |S_{yz}| \cdot dx} \quad (\text{AP5-28})$$

2.3 Experimentelle Untersuchungen

2.3.1 Umfang der Untersuchungen

Zur Validierung der analytisch ermittelten Steifigkeiten wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten an DLT umfangreiche experimentellen und numerische Untersuchungen durchgeführt. So wurden neben den kürzlich veröffentlichten Untersuchungen zur Torsionssteifigkeit und Biegesteifigkeit von DLT [33] weitreichende Experimente hinsichtlich der Schubsteifigkeit, Biegesteifigkeit sowie der Scheibenschubsteifigkeit von DLT durchgeführt. Eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse wird im Folgenden gegeben.

Detailliertere Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (Last-Verformungs-Diagramme, Variationskoeffizienten, etc.) sowie umfangreiche numerische Berechnungen mittels der Software Ansys finden sich in der Dissertation von Arnold [17] (geplante Publikation in 2023).

2.3.2 Untersuchte Serien und Materialparameter

Für die Untersuchungen wurden Prüfserien von konventionellen CLT und DLT Elementen mit 5 bis 7 Lagen und einer Gesamtdicken von $t = 100 \text{ mm}$, $t = 140 \text{ mm}$, $t = 150 \text{ mm}$ und $t = 200 \text{ mm}$ gewählt. Die DLT Serien stehen in Anzahl der Lagen und der Lagenrdicke in direkter Referenz zu den gewählten CLT Serien. Tabelle 15 listet alle für die analytischen, experimentellen und numerischen Untersuchungen verwendeten Serien.

Tabelle 15: Serien für die analytischen, experimentellen und numerischen Untersuchungen

Serie		t [mm]	t_i [mm]	Orientierung der Lagen θ
O1	CLT	100	20-20-20-20-20	$0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$
O5	CLT	200	40-40-40-40-40	$0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$
¹⁾ O7	CLT	150	30-30-30-30-30	$0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$
¹⁾ O8	CLT	140	20-20-20-20-20-20-20	$0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$
²⁾ D2	uDLT+45°	200	40-40-40-40-40	$0^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 0^\circ$
D3	DLT±45°	100	20-20-20-20-20	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 0^\circ$
D4	DLT±30°	100	20-20-20-20-20	$0^\circ, 30^\circ, 90^\circ, -30^\circ, 0^\circ$
D5	DLT±45°	200	40-40-40-40-40	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 0^\circ$
D6	DLT±30°	200	40-40-40-40-40	$0^\circ, 30^\circ, 90^\circ, -30^\circ, 0^\circ$
¹⁾ D7	DLT±45°	150	30-30-30-30-30	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 0^\circ$
¹⁾ D8	DLT±45°	140	20-20-20-20-20-20-20	$0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 0^\circ$
¹⁾ D9	DLT±45°	140	20-20-20-20-20-20-20	$0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ$

¹⁾ virtuelle Serien für die großformatigen, numerischen Modelle (s. Kapitel 2.4.1)

²⁾ uDLT für einachsigen Lastabtrag aufgrund fehlender transversalen Lage (90°)

Alle Serien besitzen eine Lamellenbreite von $w = 180 \text{ mm}$ und sind nicht verklebt an den Schmalseiten. Die Serien verfügen über keine Entlastungsnuten. Die für die experimentellen Untersuchungen hergestellten Prüfkörper der Serien D2-D6 sowie O1-O5 bestehen aus Fichten-Lamellen (*Picea Abies*), die der Festigkeitsklasse T14 nach EN 338 [56] zuordenbar sind. Die CLT Serie O1 wurde von der Pfeifer Timber GmbH gemäß ETA-20/0023 [5] hergestellt (vgl. Kapitel 1.2.1). Die CLT Serie O5 sowie die DLT Serien D2-D6 wurden mit Materialparametern gemäß ETA-16/0055 [57] von der Holzbau Unterrainer GmbH in Österreich hergestellt. In Tabelle 16 sind die E-Moduln und Schubmoduln der beiden o.g. ETAs gegeben ($x = \text{longitudinal}$, $y = \text{tangential}$, $z = \text{radial}$).

Tabelle 16: Materialparameter der verwendeten CLT- und DLT Prüfserien

	E_x [MN/m ²]	E_y [MN/m ²]	E_z [MN/m ²]	G_{yz} [MN/m ²]	G_{xy} [MN/m ²]	G_{xz} [MN/m ²]
ETA-16/0055 [57]	11500	370	370	50	690	690
ETA-20/0023 [5]	11000	370	370	50	690	690

2.3.3 Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit von DLT

EN 16351 [58] und EN 789 [59] bilden die Grundlage für die Bestimmung der Schubmoduln und Schubfestigkeiten von CLT. Die Schubversuche nach EN 408 [7] beziehen sich auf Bauholz und Brettschichtholz im Allgemeinen.

Im Prüfaufbau nach EN 408 [7] wird die Prüfkraft durch aufgeklebte Stahlplatten in einzelne Lamellen eingebracht. Die Prüfkörper sind um 14° geneigt. Um das material- und zeitaufwendige Aufkleben von Stahllamellen zu vermeiden, hat Mestek [35] den Prüfaufbau nach EN 408 [7] bereits hinsichtlich der Prüfung von CLT-Elementen optimiert.

Bei seinen Untersuchungen wird die Last auf den zu prüfenden CLT-Mittellagen über angrenzende Lagen eingeleitet. Der Ansatz nach Mestek [35] ist nicht vollständig auf DLT übertragbar. Die diagonale Orientierung einzelner Lagen im DLT erfordert die Prüfung von mehr als einer Lage, um die Interaktion diagonaler Lagen mit longitudinalen (0°) und transversalen (90°) Lagen abzubilden. Daher werden in den Schubversuchen an DLT mindestens 3 Lagen auf Abscheren beansprucht (s. Abbildung 43).

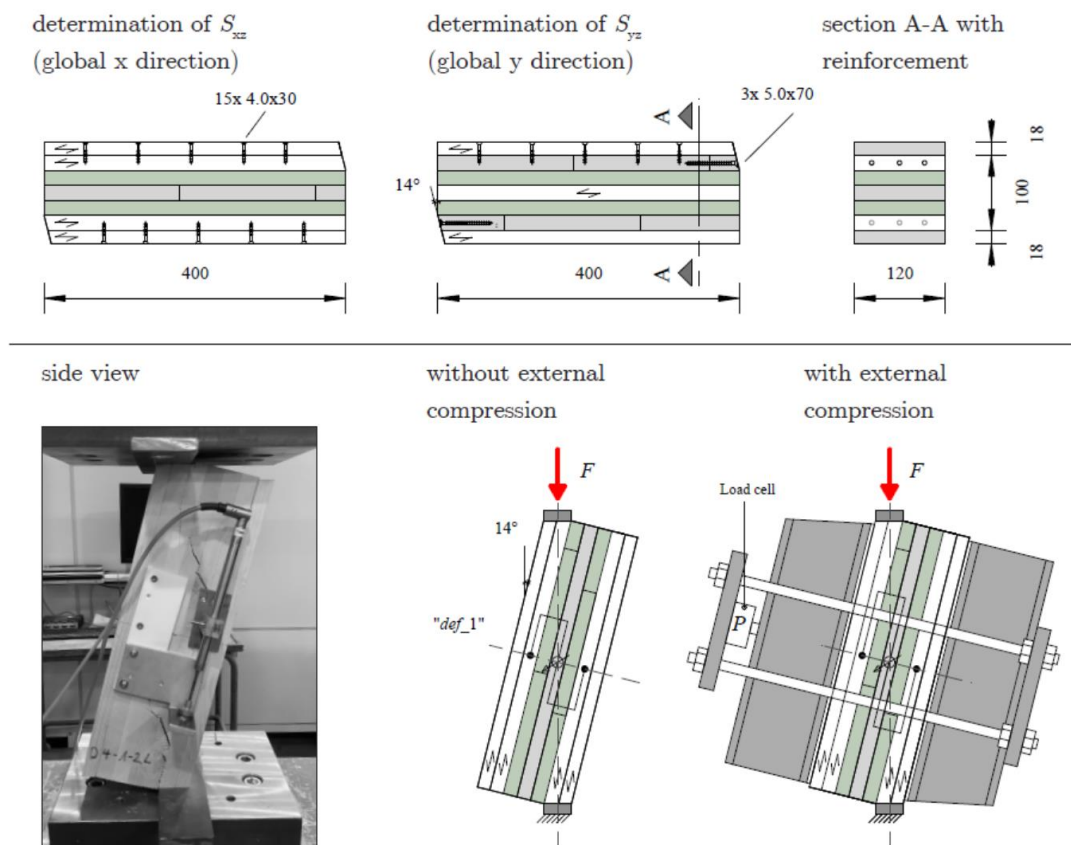


Abbildung 43: Prüfaufbau zur Ermittlung der Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit von DLT [17]

Die Prüfkörper mit den Abmessungen $b/l/t = 120/400/100$ mm wurden aus Platten der Serien O1, D3 und D4 gefertigt. Um die Schubsteifigkeit in Längs- und Querrichtung zu untersuchen, wurden Prüfkörper ausgerichtet in globale x- und y-Richtung gefertigt.

Auf beiden Seiten der Prüfkörper wurden auf die äußeren Lagen 18 mm dicke Bretter der Güteklasse T14 (C24) aufgeklebt. Auf diese Weise kann die Last über zwei Lamellen auf jeder Seite in die Prüfkörper eingeleitet werden. Die zusätzlichen Lamellen wurden mittels Schraubenpressklebung nach DIN 1052-10 [60] (Schraubenabmessungen: 4,0/30 mm) befestigt (siehe Bild 4).

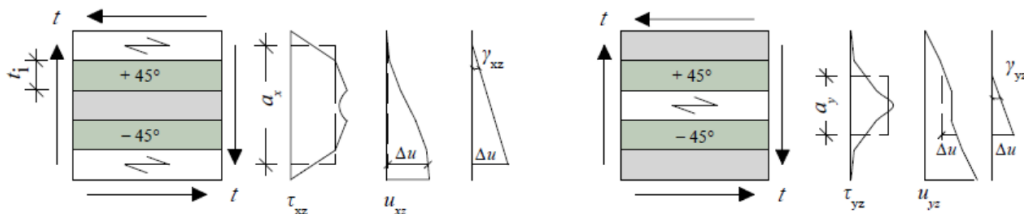
Bei in y-Richtung orientierten Prüfkörpern steht die Faserorientierung der äußeren Lagen waagrecht zur Lasteinleitung. Um den Lasteinleitungspunkt zu verstärken, werden zusätzlich drei Vollgewindeschrauben (Schraubenabmessungen: 5,0/70 mm) in jeden transversalen äußeren Lagen eingebracht (siehe Abbildung 43). Der gewählte Versuchsaufbau ermöglicht es neben den Steifigkeitswerten auch die Schubfestigkeit f_v zu bestimmen und dadurch Aussagen hinsichtlich der Versagensmechanismen von CLT und DLT, z.B. unter biaxialer Biegung im GZT, zu treffen. Für die Bestimmung der Schubfestigkeit ist es wichtig, dass zusätzliche Schubversuche unter Querdruck (Querpressung) durchgeführt werden. Die Interaktion von Schubbeanspruchung und Querdruck ist in der Praxis häufig gegeben, so auch bei Punktstützungen.

Insgesamt wurden 36 Prüfkörper geprüft. 18 Prüfkörper wurden für die Untersuchung der Schubsteifigkeit- und Festigkeit in x-Richtung und 18 in y-Richtung verwendet. 9 der jeweils 18 Prüfkörper wurden mit zusätzlichem Druck senkrecht zur Faser belastet. Eine Querpressung von $\sigma_c = 0,5 \text{ MN/m}^2$ wurde durch Anziehen von Muttern auf den Gewindestangen (M16 - 8.8) aufgebracht (Abbildung 43). Stahlplatten leiten die Last in Stahlprofile (HEB 120) ein, die dann den Druck auf die Probe übertragen. Die zwischen der Stahlplatte und dem Stahlprofil installierte Kraftmessdose liefert Informationen über die Höhe der Last senkrecht zur Faserrichtung (siehe Kraftmessdose P in Abbildung 43).

An beiden Seiten der Prüfkörper wurden induktive Wegaufnehmer angebracht. Die relative Verformung wurde in einem Bereich von 80 mm gemessen, so dass die Verformungen der inneren Schichten erfasst wurden. Die Schubversuche wurden verformungsgesteuert mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 1,0 mm/min durchgeführt. In Anlehnung an EN 408 [7] wurden die Versuche entweder nach Versagen der Prüfkörper oder nach Erreichen der maximalen Prüfzeit von $t = 420 \text{ s}$ beendet. Der Feuchtegehalt jeder Probe wurde vor der Durchführung der Versuche mittels Rammeelektroden in 15 mm Tiefe gemessen. Die Holzfeuchte lag bei allen Prüfkörpern in einem Bereich von $u = 12 \pm 2 \%$. Die Durchführung und Auswertung der Schubversuche wurde durch eine Masterarbeit begleitet [68].

Der Prüfaufbau provoziert eine lineare Verteilung der Schubspannungen über den Querschnitt der Prüfkörper in x- und y-Richtung. Die experimentellen Steifigkeitswerte sind daher mit den analytischen Werten nach der Schubanalogie vergleichbar sein (Abbildung 44).

overall out-of-plane shear deformations u on a DLT element



out-of-plane shear deformations u on a DLT element following the test setup

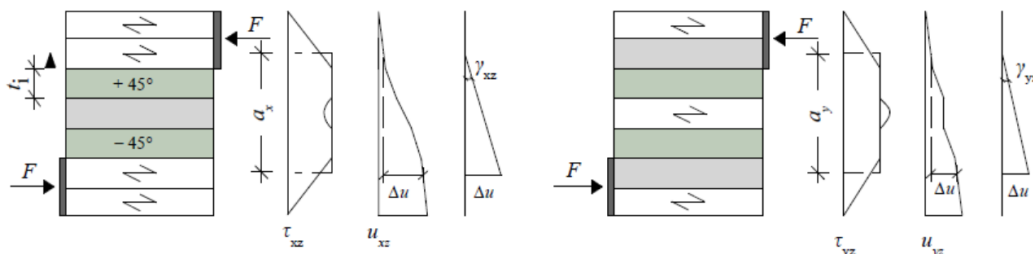


Abbildung 44: Qualitative Darstellung Schubspannungen, Schubverformungen und Schubverzerrungen in x- und y-Richtung der DLT Elemente nach der Schubanalogie (oben) und DLT Elementen im Zuge der mechanischen Prüfung (unten) [17]

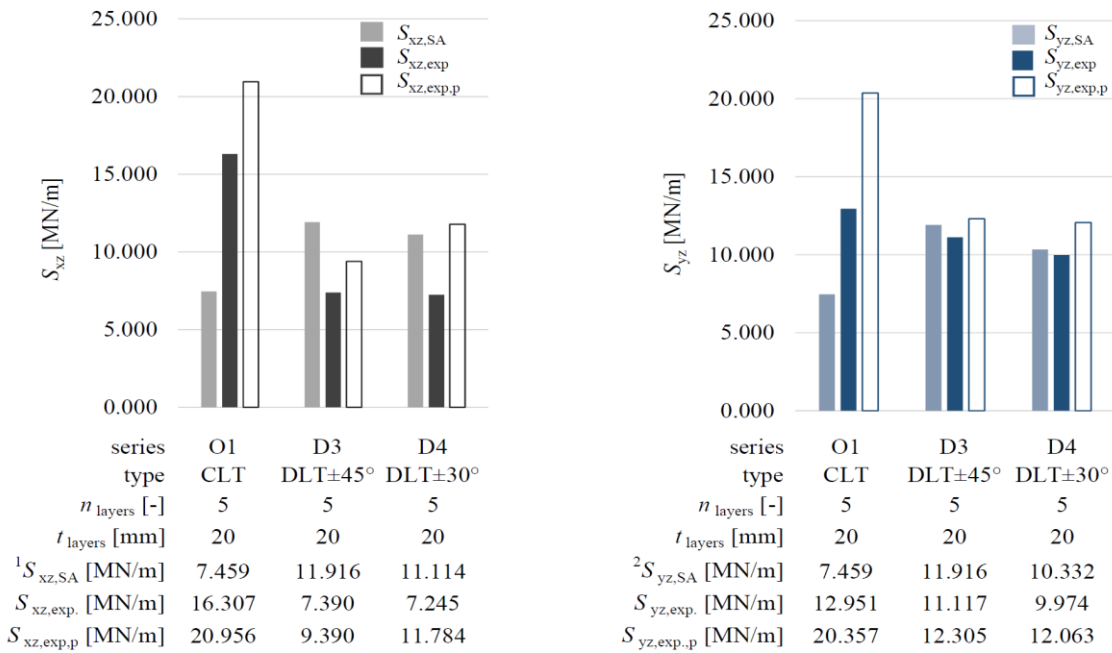
Die effektiven Schubverformungen $\Delta u = \text{"def_1"} = w$ werden mit den induktiven Wegaufnehmer über $a = 80 \text{ mm}$ ($a_x = a_y$) gemessen. Die Schubmoduln für jeden Prüfkörper werden innerhalb des linearen elastischen Bereichs von $0,1 \cdot F_{\max}$ und $0,4 \cdot F_{\max}$ mittels linearer Regressionsanalyse nach Gleichung (AP5-29) berechnet.

$$G_{xz/yz} = \frac{F \cdot t}{w \cdot b \cdot l} = \frac{(0,4F_{\max} - 0,1F_{\max}) \cdot t \cdot \cos(\alpha)}{(w_{0,4F_{\max}} - w_{0,1F_{\max}}) \cdot b \cdot l} = m \cdot \frac{t \cdot \cos(\alpha)}{b \cdot l} \quad (\text{AP5-29})$$

Die Berechnung der Schubfestigkeit erfolgt nach Gleichung (AP5-30) unter Berücksichtigung der erreichten Maximallast [7].

$$f_v = \frac{F_{\max/\text{init}} \cdot \cos(\alpha)}{a \cdot l} \quad (\text{AP5-30})$$

Abbildung 45 stellt die Mittelwerte der Schubsteifigkeiten in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) dar und vergleicht diese mit der jeweiligen analytischen Lösung nach der Schubanalogie. Die Schubsteifigkeiten der Serien unter zusätzlichem Querdruck ($\sigma_c = 0,5 \text{ MN/m}^2$) sind durch Balken ohne Füllung dargestellt.



¹Analytische Lösung nach der Schubanalgie

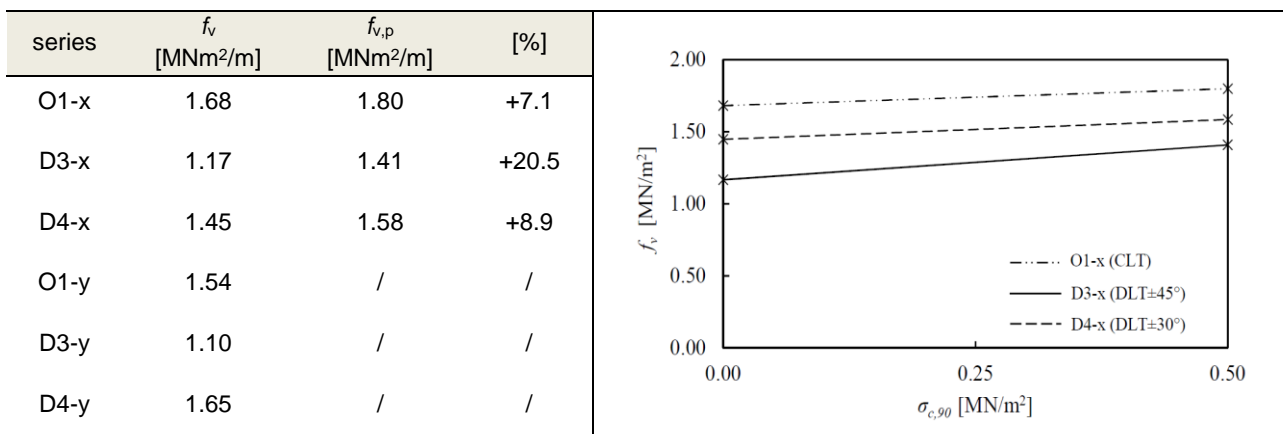
²Analytische Lösung nach der Schubanalgie, mit äußeren Lagen eingeschlossen

Abbildung 45: Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Schubsteifigkeit von DLT

Für die Serie O1 in x-Richtung ist die Schubsteifigkeit $S_{xz,exp,p}$ (20.956 MN/m) um 28,5 % höher, als diejenige ohne externe Querpressung $S_{xz,exp}$ (16.307 MN/m). Damit unterscheiden sich die Ergebnisse der Serie O1 stark von denen der analytischen Lösung $S_{xz,SA}$ (7.459 MN/m). Die Gründe hierfür können in unterschiedlichen Materialparametern oder in Sperreffekten bei der Prüfung der Prüfkörper mit mehr als einer unter 90° orientierten Schicht liegen. Grundsätzlich sollte die Querpressung keinen Einfluss auf die Schubsteifigkeit, jedoch auf die Schubfestigkeit haben (späterer Versagensmechanismus). Bei den DLT Serien D3 und D4 sind die Werte für die Schubsteifigkeit in x-Richtung im Vergleich zu denen ohne externe Querpressung ebenfalls erhöht (D3: +25,8 % und D4: +62,7 %), nähern sich damit jedoch der analytischen Lösung weiter an. Insgesamt lassen sich die erwarteten analytischen Steifigkeiten nach der Schubanalgie gut abbilden.

Die Schubfestigkeiten, bestimmt durch die Bruchlast bei initialem Versagen, können durch Querpressung erhöht werden. Die Mittelwerte der Festigkeiten in x-Richtung mit Querpressung werden für die Serie O1 im Vergleich zu den Festigkeiten ohne Querpressung um 7,1% erhöht. Für Serie D3 wird in x-Richtung sogar eine Steigerung von 20,5 % erreicht. Serie D4 erfährt eine Steigerung von durchschnittlich 8,9 %. In y-Richtung konnten keine Festigkeitswerte unter Querpressung ermittelt werden, da kein Schubversagen auftrat. at. Tabelle 17 beinhaltet die Mittelwerte der Schubfestigkeiten mit und ohne Querpressung. Zusätzlich ist auf der rechten Seite der Anstieg der Scherfestigkeit als lineare Funktion der Querpressung grafisch dargestellt.

Tabelle 17: Steigerung der Schubfestigkeit f_v infolge externer Querpressung $\sigma_c = 0,5$ MN/m



2.3.4 Biegesteifigkeit

Auch die Biegesteifigkeit von DLT wurde mittels experimenteller Untersuchungen bestimmt. So wurden für die uDLT Serie D2 mittels 4-Punkt-Biegeversuch nach EN 16351 [58] an zehn Prüfkörpern die globale und lokale (effektive) Biegesteifigkeit sowie die Schubsteifigkeit bestimmt (Abbildung 46).

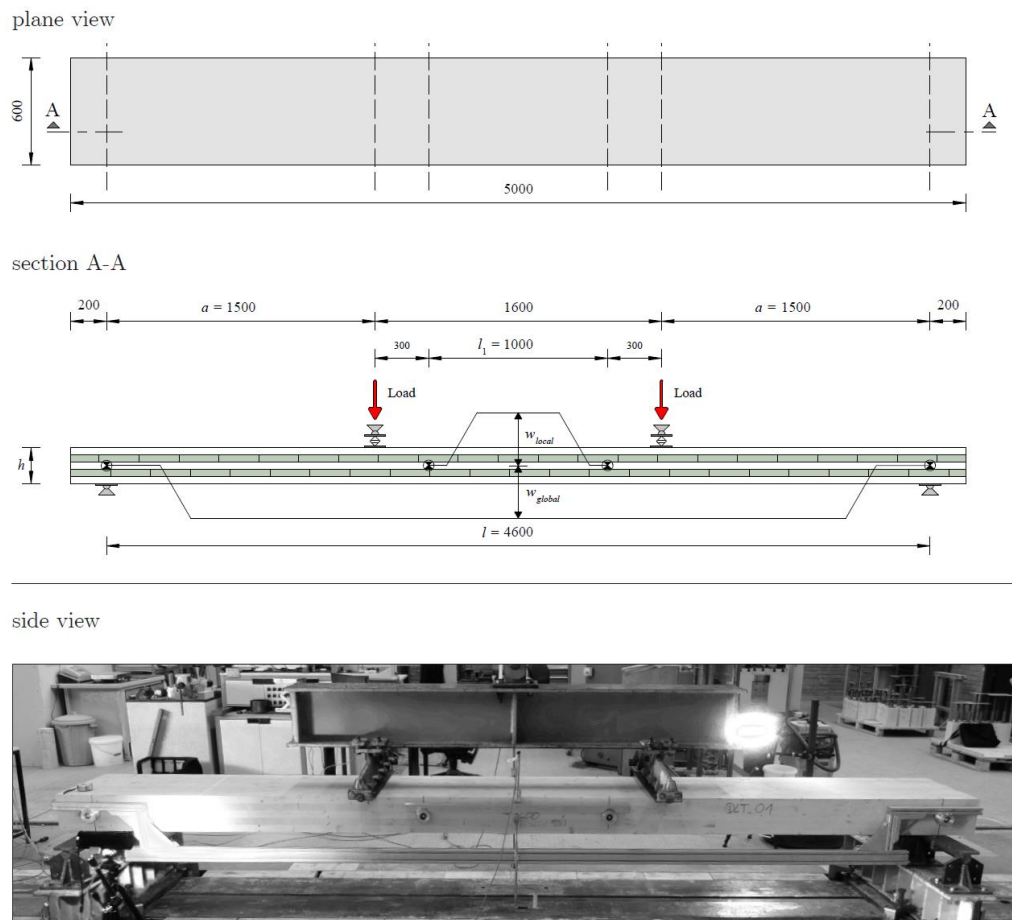


Abbildung 46: Vier-Punkt-Biegeversuch zur Bestimmung der Biegesteifigkeit von DLT [17]

Die Anzahl und Ausrichtung der Lagen steht in Referenz zu den Untersuchungen an DLT von Buck et al. 2016 [61]. Tabelle 18 fasst die Versuchsergebnisse zusammen (Mittelwerte). Die Ergebnisse zeigen, dass die analytische Lösung der Biegesteifigkeit (lokal) und der effektiven Biegesteifigkeit nach Gleichung sehr gut abgebildet wurden. Der Abgleich der nach EN 16351 [58] experimentell ermittelten Schubsteifigkeit mit der analytischen Lösung nach der Laminattheorie, korrigiert durch Schubkorrekturfaktoren nach Timoshenko gemäß Gleichung (AP5-22), zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung.

Tabelle 18: Vergleich der analytischen Lösung mit den experimentellen Ergebnissen zur Biegesteifigkeit von DLT

Serie	Analytische Lösung			4-Punkt-Biegeversuch nach EN 16351		
	B_x [MN/m ²]	$B_{x,eff}$ [MN/m ²]	S_{xz} [MN/m]	$B_{x,exp}$ [MNm ² /m]	$B_{x,eff,exp}$ [MNm ² /m]	$S_{xz,eff}$ [MN/m]
D2	6.348	6.083	82.778	5.647	5.358	73.010

Im Vergleich zur 5 lagigen CLT Serie O5 ($t = 200 \text{ mm}$), kann die Biegesteifigkeit in x-Richtung durch die Ausrichtung der 2. und 4. Lage unter 45° somit zur globalen x-Achse um 7,6 % gesteigert werden.

2.3.5 Torsionssteifigkeit

Für die Ermittlung der Torsionssteifigkeit von CLT und DLT sowie multifunktionalem CLT wurde ein neuartiger Prüfaufbau entwickelt, welcher bereits in Kapitel 1.4.3 vorgestellt wurde (vgl. Abbildung 12). Die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen hinsichtlich der Torsionssteifigkeit von DLT wurden kürzlich von Arnold et al. [33] veröffentlicht. Die analytischen Lösungen für B_{xy} und $B_{xy,eff}$ (s. Gleichungen (AP5-27) und (AP5-28)) konnten mittels der Torsionsversuche bestätigt werden.

2.3.6 Scheibenschubsteifigkeit

Der zur Bestimmung der Scheibenschubsteifigkeit von DLT entwickelte Prüfung ist eine Kombination aus einem Scherrahmenversuch und einem diagonalen Schubdruckversuch (Abbildung 47).

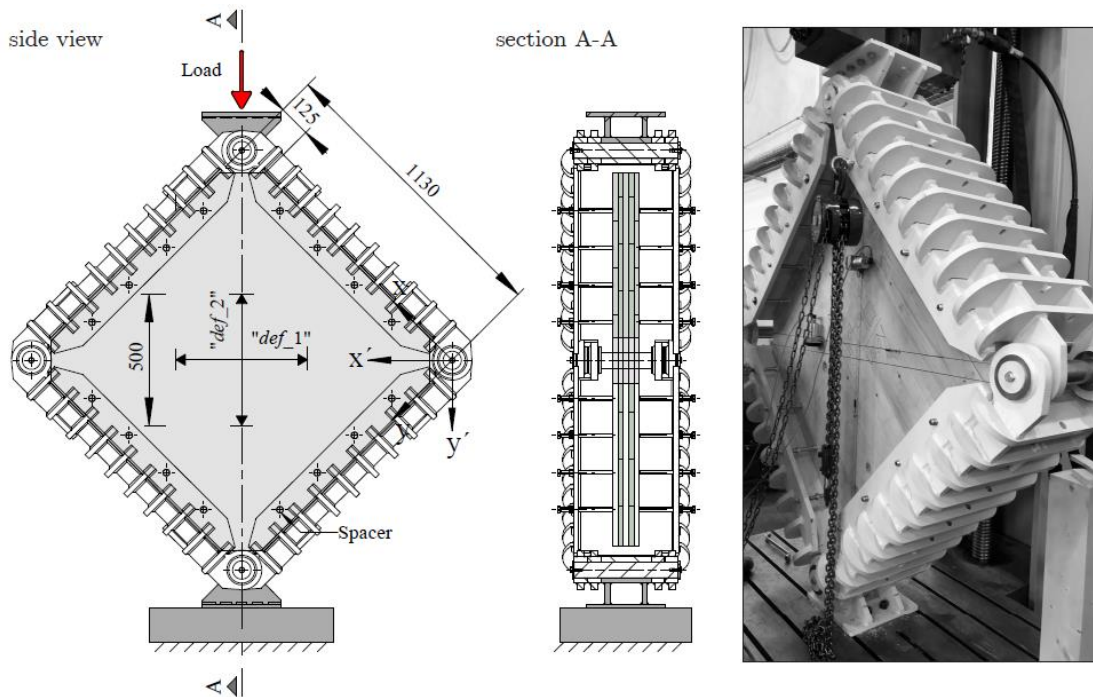


Abbildung 47: Prüfaufbau mit Scherrahmen zur Bestimmung der Scheibenschubsteifigkeit [17]

Der entwickelte Scherrahmenversuch verwendet einen Stahlrahmen, welcher nicht mit den Außenkanten der Prüfkörper verbunden ist. Die Kraft wird über Kontaktpressung auf die Außenkanten in den Prüfkörper eingeleitet (Abbildungen 47 und 48). Die Bolzen innerhalb des Scherrahmens dienen als Abstandshalter und Lagesicherung der Prüfkörper.

Die äußeren Ecken der Elemente sind stumpf, um die Lasteinleitung über die Außenseiten des Prüfkörpers zu gewährleisten. Dieser Prüfaufbau ermöglicht die Durchführung einer hohen Anzahl von Versuchen in kurzer Zeit. Der für die Scheibenschubversuche verwendete Stahlrahmen wurde im Rahmen einer Masterarbeit [62] entwickelt und in Zusammenarbeit mit der Firma Massiv-Holz-Mauer GmbH hergestellt [63].

Die mechanischen Tastversuche wurden an je einem Prüfkörper jeder Serie der Dicke $t = 100$ mm durchgeführt (O1, D3, D4 – alle nicht schmalseitenverklebt). Die Prüfkörper haben die Abmessungen von $w/l = 1130/1130$ mm. Der gewählte Prüfaufbau ist für Serien mit $t > 100$ mm aufgrund der begrenzten Tragfähigkeit des Stahlrahmens nicht geeignet.

Eine Prüfung von DLT nach dem Verfahren von Kreuzinger und Sieder [34] ist nicht möglich. Im Schubdruckversuch nach Kreuzinger und Sieder [64] würden unter 45° orientierte Lamellen ausschließlich auf Druck belastet und ausknicken.

Abbildung 48 zeigt das statische System des Versuchsaufbaus sowie die Position der kreuzförmig angeordneten Seilzug-Wegaufnehmer im mittleren Bereich der Prüfkörper ($\Delta w = |\Delta d_1| + |\Delta d_2|$). Die Prüfung wurde weggesteuert mit einer konstanten Geschwindigkeit von 3 mm/min durchgeführt.

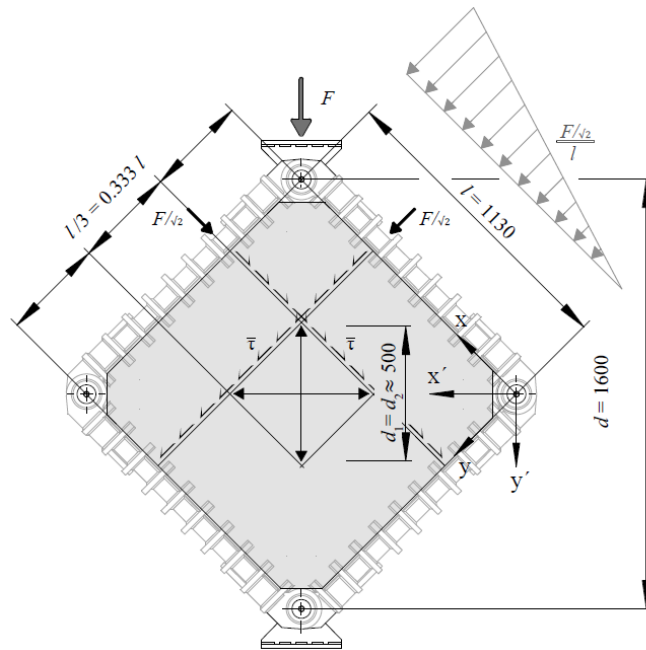


Abbildung 48: Statisches System des Versuchsaufbaus [17]

Die Schubverzerrung innerhalb des Schubfeldes ($a = l/3$) wird nach Gleichung (AP5-31) berechnet.

$$\gamma = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta w}{l/3} \quad (\text{AP5-31})$$

Die Schubspannung lässt sich mittels Gleichung (AP5-32) berechnen.

$$\tau = C_i \cdot \frac{F}{\sqrt{2} \cdot l \cdot t} \quad (\text{AP5-32})$$

Der Koeffizient C_i beschreibt das Verhältnis der Schubspannungen τ_{pu} , die im Kern der Prüfkörper und damit innerhalb des gewählten Messbereichs auftreten zu den gesamten Schubspannungen τ im Prüfkörper. Der Faktor C_i wird nach der Methode von Frocht [65] aus dem Jahr 1931 ermittelt, welcher die nichtlineare Verteilung der Druck- und Zugspannungstrajektorien in einem gestauchten, quadratischen Element in Abhängigkeit der Seitenlängen ermittelte [43; 66]). Mit Hilfe des Mohrschen Spannungskreises wird ein Mittelwert des Verhältnisses $C_i = \tau/\tau_{pu}$ für die Punkte auf den Diagonalen zwischen den Messpunkten der Wegaufnahme berechnet. C_i ist also abhängig vom Verhältnis a/l [43; 66]. Für den gegebenen Versuchsaufbau ($d = 500 \text{ mm}$, $a = l/3 = 1130/3 \text{ mm}$) ergibt sich der Koeffizient C_i zu 1.377 [17]. Die Schubmoduln werden anhand der bekannten mechanischen Beziehung zwischen Schubspannung und Schubverzerrung nach Gleichung (AP5-33) berechnet.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F}{\Delta w} \cdot \frac{C_i}{6t} = m \cdot \frac{C_i}{6t} \quad (\text{AP5-33})$$

Tabelle 19 vergleicht die analytische Lösung nach Gleichung (AP5-25) mit den Ergebnissen der Scheibenschub-Tastversuche.

Tabelle 19: Vergleich der analytischen Lösung mit den experimentellen Ergebnissen der Scheibenschubsteifigkeit von DLT

Serie	Analytische Lösung		Scherrahmenversuch	
	G_{xy} [MN/m ²]	D_{xy} [MN/m]	$G_{xy,exp}$ [MN/m ²]	$D_{xy,exp}$ [MN/m]
O1	172.50	17.25	243.02	24.30
D3	382.53	38.25	446.24	44.62
D4	330.03	33.00	320.65	32.07

Im Vergleich zur orthogonalen CLT Serie O1 ist die Scheibenschubsteifigkeit für die DLT \pm 45° Serie D3 um 184 % höher und für die DLT \pm 30° Serie D4 um 132 % höher. Die Schubsteifigkeit der Serie O1 nach der analytischen Lösung erscheint sehr niedrig. Der Steifigkeitswert von 17,25 MN/m ist 41 % niedriger als der im Scherrahmenversuch ermittelte Wert.

Somit erscheint der analytische Ansatz nach ÖNORM B 1995-1-1 [48] für nicht schmalseitenverklebtes CLT sehr konservativ. Die Verwendung eines Abminderungs-Koeffizienten von 0,5 anstelle von 0,25 in Gleichung (AP5-25) könnte wesentlich realistischere analytische Werte für nicht schmalseitenverklebtes CLT mit Brettbreiten $w \geq 180$ mm liefern.

Für die DLT Serien hingegen korrelieren die Werte des analytischen Ansatzes sehr gut mit den Ergebnissen der Scherrahmenversuche. Die analytische Scheibenschubsteifigkeit der Serie D3 ist 17 % niedriger als der experimentelle Wert. Die analytische Schubsteifigkeit der Serie D4 entspricht nahezu exakt der experimentell ermittelten Scheibenschubsteifigkeit.

Die Untersuchungen zum Scheibenschub können aufgrund der geringen Anzahl als Tastversuche gewertet werden, welche vielversprechende Ergebnisse liefern. Um belastbare Aussagen über die Verwendbarkeit des entwickelten Prüfaufbaus treffen zu können, sind weitere mechanische sowie numerische Untersuchungen nötig. Der wage analytische Ansatz nach Gleichung (AP5-25) kann nur bedingt als Vergleichswert zu den mechanischen Ergebnissen herangezogen werden.

2.4 Verformungsanalyse und Ableitung eines Homogenisierungsgrades

2.4.1 Verformungsanalysen an großformatigen 2D-FE-Modellen

2.4.1.1 Allgemeine Informationen

Die maßgebenden Faktoren bei der Dimensionierung von Massivholzdecken sind Verformungen im SLS und konzentrierte Spannungen im ULS. Durch die Verwendung von DLT anstelle von CLT sind geringere Gesamtverformungen zu erwarten, insbesondere unter zweiachsiger Biegung. Dies ist auf die deutlich höhere Torsionssteifigkeit zurückzuführen, was durch die analytischen und experimentellen Untersuchungen nachgewiesen wurde.

Mittels der 2D-FE-Modelle wird das Verformungsverhalten von punktgestützten CLT und DLT Platten in Abhängigkeit des statischen Systems, der Anzahl der Lagen und ihrer jeweiligen Orientierung analysiert. Die untersuchten Systeme besitzen die Abmessungen von $w/l = 3,0\text{ m} / 3,0\text{ m}$ und repräsentieren mögliche Anwendungsszenarien in realen Bauwerken.

Für die Modellierung der Plattenelemente wurden linear-elastische 2D-FE-Modelle verwendet. Die Modelle wurden mit Hilfe der FEM-Software Diubal RFEM (Version 5.24) erstellt. Die Platten wurden als orthotrope Elemente definiert und die Steifigkeitsmatrizen manuell mit Hilfe der nach Laminattheorie berechneten Werte befüllt (s. Kapitel 2.2). Alternativ können die Steifigkeitsmatrizen der Platten mit dem Modul RF Laminat definiert werden. Die Werte der Schubkorrekturfaktoren wurden mittels der Timoshenko-Balken-Theorie ermittelt und die Materialparameter entsprechend der ETA-16/0055 [57] definiert.

Die Kontakte zwischen den Lagen wurden als starr definiert. Die Netzgröße wurde zu 50 mm gewählt und das Netz automatisch generiert. Der Solver verfolgt einen iterativen Ansatz. Die Modellierung der CLT und DLT-Serien wurde mit quadratischen Serendipity-Elementen mit jeweils 8 Knoten durchgeführt. Die Randbedingungen und Auflagerbedingungen wurden entsprechend dem jeweiligen statischen System gewählt.

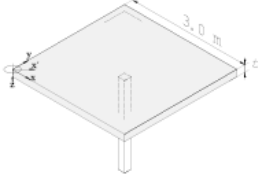
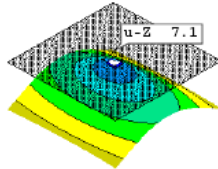
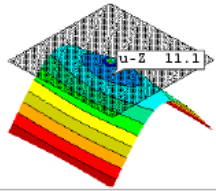
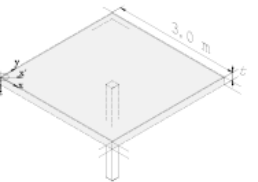
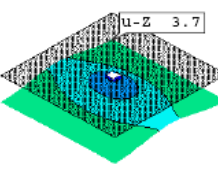
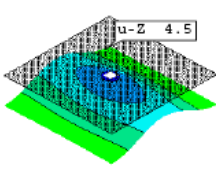
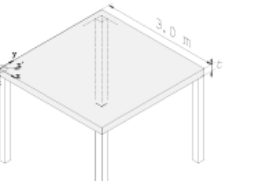
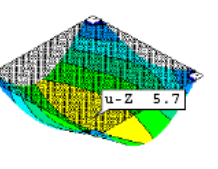
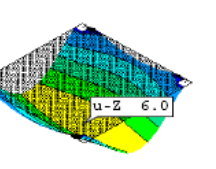
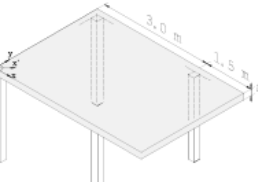
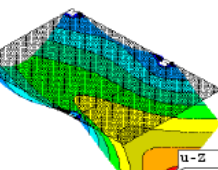
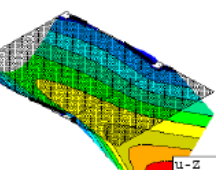
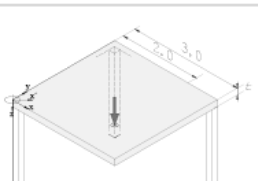
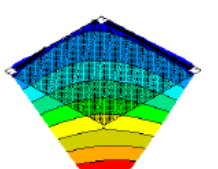
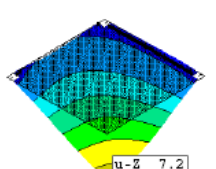
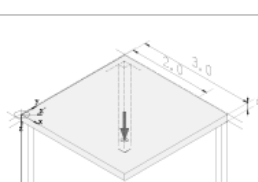
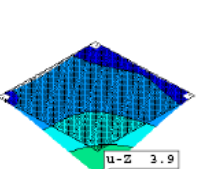
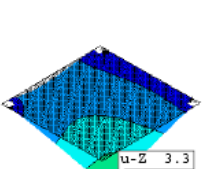
2.4.1.2 Verformungsanalyse an 5-lagigen CLT und DLT Serien

In einem ersten Schritt werden die Verformungen von 5-lagigen CLT und DLT $\pm 45^\circ$ Serien analysiert. Tabelle 20 enthält sechs beispielhafte statische Systeme von punktgestützten Massivholzdecken (Spalte 2). Die statischen Systeme sind von (1) bis (6) durchnummeriert. Die Abmessungen aller Platten betragen $w/l = 3,0\text{ m} / 3,0\text{ m}$ (4,5 m im Falle einer zusätzlichen Auskragung). Die Abmessungen der Stützen betragen $w/l = 0,2 / 0,2\text{ m}$. Die Belastung des jeweiligen Systems ist in Spalte 1 gegeben. Die gleichmäßig verteilte Flächenlast $p = 5,0\text{ kN/m}^2$ stellt einen Wert dar, der in Wohngebäuden mit Massivholzdecken durch die Nutzlast und das Eigengewicht zu erwarten ist. Die exemplarisch gewählte Serie O7 und die DLT $\pm 45^\circ$ Serie D7 besitzen eine Lagendicke von $t_l = 30\text{ mm}$. Die Elementdicke beträgt somit $t = 150\text{ mm}$. Dies entspricht einer üblichen Dicke für Massivholzplatten innerhalb des gewählten Konstruktionsrasters.

Die Verformungen der CLT und DLT Serien sind in den Spalten 3 und 4 von Tabelle 20 dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit sind die Auflager und Lasten in der grafischen Verformungsdarstellung ausgeblendet. Die farbliche Abstufung ermöglicht die Analyse der Amplituden und der Verteilung der Verformungen

Der Maximalwert (dunkelrot) wird für Verformungswerte $w \geq l/300$ erreicht. Darüber hinaus ist in der grafischen Darstellung jedes Systems die maximale Verformung $w_{z,\max}$ (u-z) angegeben. Spalte 5 gibt die prozentuale Veränderung (Zunahme oder Abnahme) der maximalen Durchbiegung des DLT Elements im Vergleich zu der des CLT Elements an.

Tabelle 20: Verformungsanalyse der 5-lagigen CLT O7 und DLT±45° D7 Serien unter zweiachsiger Biegung infolge von Punktstützung [17]

loading	system	deformations w_z		$w_{z,max}$
		CLT (O7 series)	DLT±45° (D7 series)	
	w / l	CLT (O7 series)	DLT±45° (D7 series)	
p / P	3.0 m / 3.0 m	30-30-30-30-30 [0°,90°,0°,90°,0°]	30-30-30-30-30 [0°,45°,90°,-45°,0°]	DLT/ CLT
5.0 kN/m ²	(1) 			+ 56.3 %
5.0 kN/m ²	(2)  four rotational restrained edges			- 21.6 %
5.0 kN/m ²	(3) 			+ 5.3 %
5.0 kN/m ²	(4) 			+ 11.1 %
5.0 kN	(5) 			- 41.0 %
5.0 kN	(6)  two rotational restrained edges			- 15.4 %

Die maximale Durchbiegung einer zentrisch punktgestützten Platte (System (1)) ist bei der 5-lagigen DLT Serie deutlich größer als für das CLT Gegenstück (+ 56.3 %). Dies ist hauptsächlich auf die geringere Biegesteifigkeit in y-Richtung der DLT±45° Serie O7 ($B_{y,D7} = 0.316 \text{ MNm}^2/\text{m}$; $S_{yz,D7} = 42.144 \text{ MN/m}$) im Vergleich zur CLT Serie O5 ($B_{y,O7} = 0.730 \text{ MNm}^2/\text{m}$; $S_{yz,O7} = 7.332 \text{ MN/m}$) zurückzuführen.

Die relativ hohe Schubsteifigkeit in y-Richtung des DLT Elements verliert im Anteil an der Gesamtverformung aufgrund der moderaten Plattendicke an Bedeutung. Der Einfluss der Biegesteifigkeit ist dominant. Das DLT-

Element verformt sich primär einachsig um die x-Achse. Eine zusätzliche Biegung um die y-Achse wird durch die sich einstellende einachsige Krümmung blockiert. Dieser Sperr effekt wird auch beim CLT Element beobachtet, ist aber im letzteren Fall deutlich weniger stark ausgeprägt.

Bei der zentrisch punktgestützten Platte mit rotationsstarrten Plattenrändern (System (2)) ist die Sperrwirkung weniger ausgeprägt. Die geringe Biegesteifigkeit des 5-lagigen DLT $\pm 45^\circ$ bestimmt das Verformungsverhalten auch für an vier Ecken punktgestützte Platten, mit und ohne Auskrägung (Systeme (3) und (4)). Bei System (3) ist die maximale Durchbiegung der DLT-Platte um 5,3 % höher als die der CLT-Platte. Bei System (4) mit einem zusätzlichen 1.5 m langen Kragarm ist die Durchbiegung des DLT Elements um 11,1 % höher. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei Systemen mit Biegebeanspruchungen in x- und y-Richtung, für die DLT Serie D7 größere Verformungen auftreten, als für die gewählte CLT Serie O7. Der Grund liegt in der stark ungleich verteilten Biegesteifigkeit der DLT Serie D7 in globaler x- und y-Richtung.

Für den Lastfall der reinen Torsion kehrt sich dieser Effekt um (siehe System (5)). Für die gegebene Punktlast ($P = 5,0 \text{ kN}$) auf der auskragenden Ecke der Platte, verformt sich das CLT-Element um 12,2 mm, das DLT $\pm 45^\circ$ lediglich um 7,2 mm (Reduktion um 41 %). Dies spiegelt die deutlich höhere Torsionssteifigkeit des DLT $\pm 45^\circ$ Elements ($B_{xy,D7} = 0,640 \text{ MNm}^2/\text{m}$) im Vergleich zum CLT Element ($B_{xy,O7} = 0,338 \text{ MNm}^2/\text{m}$) wider. Für das System (6) – auskragende Ecke bei zusätzlicher rotationssteif gelagerten Plattenrändern – werden zusätzlich zur Torsionssteifigkeit die einachsigen Biegesteifigkeiten aktiviert. Dadurch gleichen sich die Maximalwerte der Verformungen der CLT und DLT Elements an.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der gewählte Aufbau der DLT Serie für punktgestützte Platten nur dann besser geeignet ist als das CLT Element gleicher Dicke, wenn der resultierende Lastfall zur Torsionsbeanspruchung, also großen Torsionsmoment m_{xy} führt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass DLT Elemente generell für punktgestützte Decken weniger geeignet sind – wie nachfolgend erläutert.

2.4.1.3 Verformungsanalyse an 7-lagigen CLT und DLT Serien

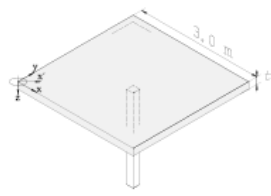
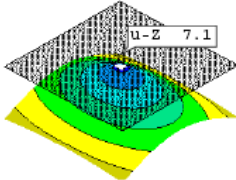
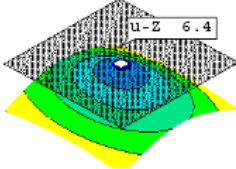
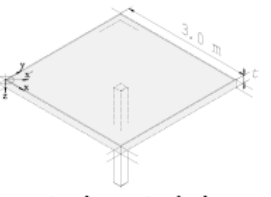
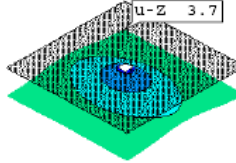
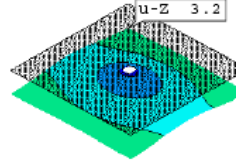
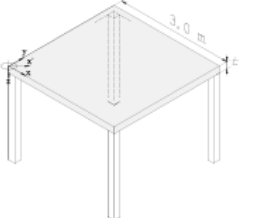
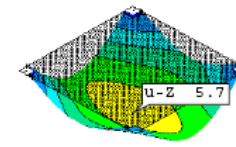

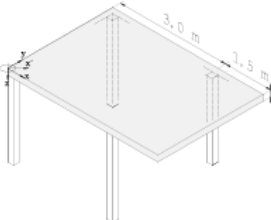
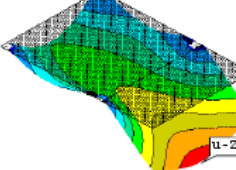
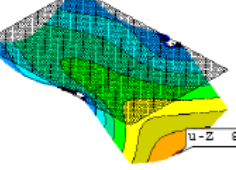
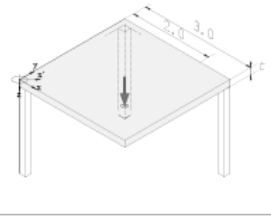
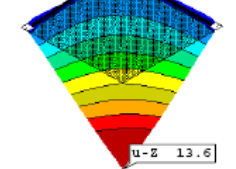
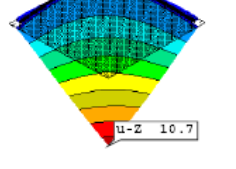
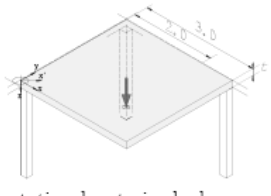
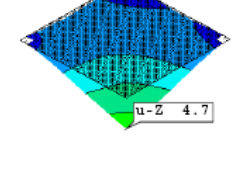
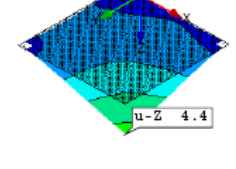
Die bisherigen Untersuchungen auf der Basis von 2D-FE-Modellen von 5-lagigen Massivholzelementen haben gezeigt, dass die DLT Vorteile von DLT – wie z.B. die hohe Torsionssteifigkeit – kaum zum Tragen kommen, wenn die Platte aufgrund des gewählten statischen Systems und der Belastung überwiegend einer einachsigen Biegebeanspruchung in x- und y-Richtung ausgesetzt ist.

Im Folgenden werden CLT und DLT $\pm 45^\circ$ Serien mit vergleichbarer Gesamtdicke, aber höherer Lagenzahl, für weitere Untersuchungen ausgewählt. Die Anzahl der Lagen wird von $n = 5$ auf $n = 7$ erhöht, während die Dicke der einzelnen Lagen von $t = 30 \text{ mm}$ auf $t = 20 \text{ mm}$ reduziert wird. Die resultierenden Aufbauten ergeben eine Gesamtdicke von $t = 140 \text{ mm}$ und entsprechen den Serien O8 und D8 (siehe Tabelle 21).

Die Biegesteifigkeiten in x- und y-Richtung der DLT Serie D8 sind $B_{x,D8} = 1.701 \text{ MNm}^2/\text{m}$ und $B_{y,D8} = 0,839 \text{ MNm}^2/\text{m}$, die Torsionssteifigkeit ist $B_{xy,D8} = 0,194 \text{ MNm}^2/\text{m}$. Die Biegesteifigkeiten der CLT Serie O8 sind $B_{x,O8} = 1.822 \text{ MNm}^2/\text{m}$ und $B_{y,O8} = 0,790 \text{ MNm}^2/\text{m}$, die Torsionssteifigkeit ist $B_{xy,O8} = 0,136 \text{ MNm}^2/\text{m}$. Die Biegesteifigkeiten B_y der Serien CLT O8 und DLT D8 sind nahezu identisch.

In Analogie zu Tabelle 20 zeigt Tabelle 21 das Verformungsverhalten punktgestützter Massivholzdecken, modelliert durch 7-lagige CLT und DLT Serien. Die statischen Systeme (1) bis (6) entsprechen denen der Tabelle 20. Die Belastung bleibt unverändert. Damit ist die Vergleichbarkeit der Verformungsanalyse an 5-lagigen CLT und DLT Elementen gewährleistet.

Tabelle 21: Verformungsanalyse der 7-lagigen CLT O8 und DLT D8±45° Serien unter zweiachsiger Biegung infolge von Punktstützung [17]

loading	system	deformations w_z		$w_{z,max}$
		w / l	CLT (O8 series)	
p / P	3.0 m / 3.0 m	20-20-20-20-20-20-20 [0°,90°,0°,90°,0°,90°,0°]	20-20-20-20-20-20-20 [0°,90°,45°,90°,-45°,90°,0°]	DLT/ CLT
5.0 kN/m ²	(1) 			- 9.9 %
5.0 kN/m ²	(2)  four rotational restrained edges			- 13.5 %
5.0 kN/m ²	(3) 			- 12.3 %
5.0 kN/m ²	(4) 			- 7.3 %
5.0 kN	(5) 			- 21.3 %
5.0 kN	(6)  two rotational restrained edges			- 6.4 %

Die Verformungen der 7-lagigen CLT Serie O8 innerhalb der Systeme (1) bis (4) liegen im gleichen Bereich, wie die Verformungen der 5-lagigen CLT O7-Serie (siehe Tabelle 20). Im Gegensatz dazu treten für die 7-lagige DLT Serie D8 innerhalb der statischen Systeme (1) bis (4) deutlich kleinere Verformungen auf, als bei der 5-lagigen der Serie D7.

Beim Vergleich der maximalen Durchbiegungen infolge zentrischer Punktstützung der 7-lagigen CLT Serie O8 mit der 7-lagigen DLT Serie D7 kehren sich die Beobachtungen aus Tabelle 20 um (System (1)). Nun erfährt das 7-lagige DLT $\pm 45^\circ$ Element geringere Verformungen als das 7-lagige CLT Element (- 9,9 %). Die zuvor einachsige Krümmung und der Sperreffekt der Biegung um die y-Achse verschwinden.

Bei der zentrisch punktgestützten Platte mit rotationssteif gelagerten Plattenrändern sind die Verformungen für das DLT um 13,5 % geringer, als die der CLT Serie O7 (System (2)). Bei der an allen Ecken punktgestützten Platte ist die maximale Durchbiegung für die DLT um 14,5 % geringer als für das CLT Element (System (3)). Für die gleichen Auflagerbedingungen, jedoch mit einer zusätzlichen Auskragung von $l = 1,5$ m, werden die Verformungen der DLT Platte im Vergleich zur CLT Platte um 7,3 % geringer (System (4)). Dies ist bemerkenswert, da für das 5-lagige DLT Element D5 die Verformungen in System (3) noch um 5,3 % größer waren, als die der 5-lagigen CLT O5-Serie (siehe Tabelle 20).

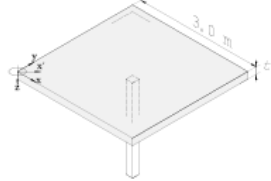
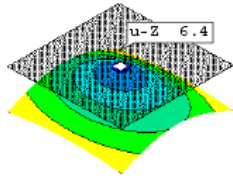
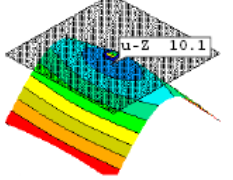
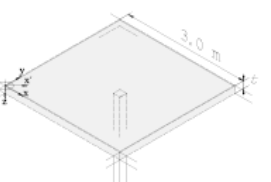
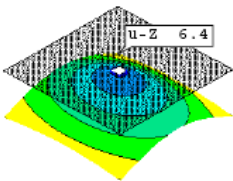
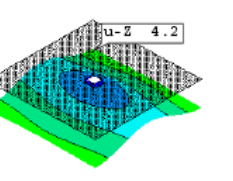
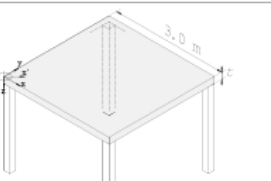
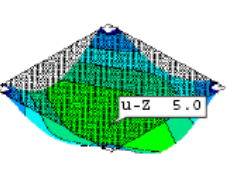
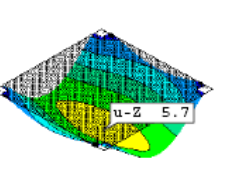
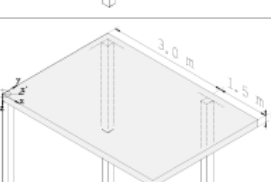
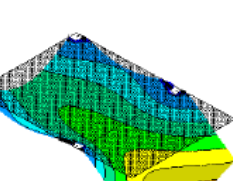
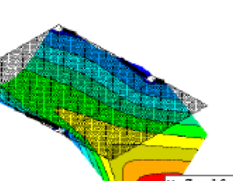
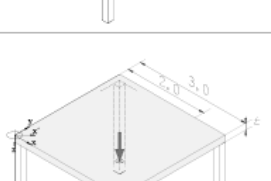
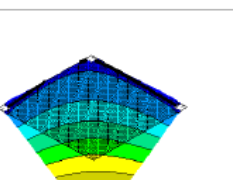
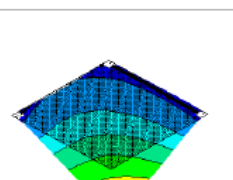
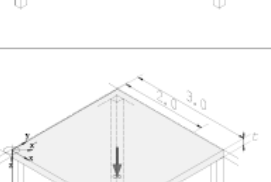
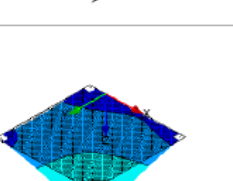
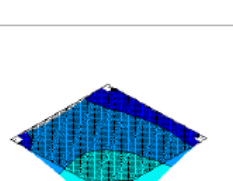
Für die Platte unter reiner Torsionsbeanspruchung (System (5)) erfährt die 7-lagige DLT Reihe im Vergleich zum 7 lagigen CLT Serie deutlich geringere Verformungswerte (- 21,3 %). Bei der Gegenüberstellung des 5-lagigen DLT-Elements mit der 5-lagigen CLT-Reihe war dieser Anstieg allerdings deutlich stärker ausgeprägt (- 41,0 %) (Tabelle 20).

Der Vergleich zwischen Tabelle 20 und Tabelle 21 zeigt, dass eine höhere Anzahl von orthogonalen Schichten im Querschnitt die Auswirkungen und Unterschiede in der Torsionssteifigkeit von DLT im Vergleich zu CLT verringern. Gleichzeitig werden die Biegesteifigkeiten angeglichen, was zu moderaten Verformungen führt - auch und gerade bei einachsiger Biegebeanspruchung in x- und y-Richtung. Tabelle 21 bestätigt, dass 7-lagigen DLT Elemente mit dem beispielhaft gewählten Layup von Serie D8 in punktgestützten Systemen, also für sowohl unter einachsiger als auch unter Torsion beanspruchter Platten, besser geeignet ist als CLT-Platten gleicher Dicke.

Im Rahmen von anwendungsoptimierten Massivholzelementen können und sollen die Layups in Abhängigkeit von den vorherrschenden statischen Systemen und Lastfällen angepasst werden. Daher wird im Folgenden zusätzlich eine Verformungsanalyse für eine 7-lagige DLT $\pm 45^\circ$ Serie mit einer höheren Anzahl von diagonal angeordneten Lagen durchgeführt. Die 7-lagige DLT Serie D9 hat vier Lagen, die unter $+45^\circ$ und -45° ausgerichtet sind (siehe Tabelle 15).

Tabelle 22 vergleicht die Verformungen der DLT D9 Serie mit denen der DLT D8 Serie für die statischen Systeme (1) bis (6). Die Hypothese ist, dass das Verformungsverhalten der Serie D9 unter Torsionsbeanspruchung deutlich besser ist, als das der Serie D8. Dies könnte auf die höhere Torsionssteifigkeit der Serie D9 ($B_{xy,D9} = 0,331$ MNm²/m) im Vergleich zur Serie D8 ($B_{xy,D8} = 0,194$ MNm²/m) zurückzuführen sein. Die statischen Systeme (1) bis (6) entsprechen denen der Tabelle 20 und Tabelle 21. Die Lasten bleiben unverändert.

Tabelle 22: Verformungsanalyse der 7-lagigen DLT±45° D8 und D9 Serien unter zweiachsiger Biegung infolge von Punktstützung [17]

loading	system	deformation w_z		$w_{z,max}$
		w / l	DLT (D8 series)	
p / P	3.0 m / 3.0 m	20-20-20-20-20-20-20 [0°, 90°, 45°, 90°, -45°, 90°, 0°]	20-20-20-20-20-20-20 [0°, 45°, -45°, 90°, 45°, -45°, 0°]	DLT/ CLT
5.0 kN/m ²	(1) 			+ 57.8 %
5.0 kN/m ²	(2)  four rotational restrained edges			- 34.4 %
5.0 kN/m ²	(3) 			+ 14.0 %
5.0 kN/m ²	(4) 			+ 20.2 %
5.0 kN	(5) 			- 34.6 %
5.0 kN	(6)  two rotational restrained edges			- 13.7 %

Einerseits führt das Fehlen der zusätzlichen Querlagen im Aufbau der DLT Serie D9 zu deutlich höheren Biegeverformungen um die x-Achse als bei der DLT D8 Serie (+ 47.8 %, System (1)). Werden dagegen die vier Plattenränder rotationssteif eingespannt und die Sperrwirkung durch eine einachsige Krümmung verhindert, ergeben sich für die zentrisch punktgestützte DLT Serie D9 um 34.4 % geringere Verformungen als für die DLT Serie D8 (siehe System (2)).

Im System (5) (Platte unter reiner Torsionsbeanspruchung) ist die maximale Durchbiegung der Serie D9 um 34.6 % geringer, als die Durchbiegung der Serie D8 und damit um 48.6 % geringer als die der Serie CLT O8 bei gleicher Anzahl und Dicke der Lagen.

2.4.2 Ableitung eines Homogenisierungsgrad

Nach der analytischen und experimentellen Bestimmung der Steifigkeitsparameter wurden umfangreiche Verformungsanalysen an 5- und 7-lagigen CLT und DLT Elementen mittels 2D-FE-Modellen durchgeführt. Es zeigte sich, dass innerhalb identischer statischer Systeme die Verformungen von CLT deutlich höher waren als die von DLT innerhalb des GZGs. Dies ist auf die höheren Steifigkeiten von DLT zurückzuführen. Eine Ausnahme bilden Massivholzelemente mit einer stark asymmetrischen Verteilung der Biege- und Schubsteifigkeiten in x- und y-Richtung. Dies ist z.B. bei den 5-lagigen DLT Serien D5 und D6 der Fall, aber auch bei CLT Elementen mit geringem Anteil von transversalen Lagen. Diese Serien weisen nur eine Schicht auf, die in globaler transversaler y-Richtung ausgerichtet ist. Dennoch sind diese Elemente vor allem für die zweiachsige Lastabtragung und für punktgestützte, Drillmomenten beanspruchte Platten geeignet. Dies liegt an ihrer vergleichsweise hohen Torsionssteifigkeit im Gegensatz zu der geringen Biegesteifigkeit in y Richtung. Verformungsanalysen an weiteren statischen Systemen finden sich zusätzlich in [17].

Aufgrund der Untersuchungen in den vorangegangenen Kapiteln wird die Terminologie "Homogenisierungsgrad ξ " in Bezug auf die Anzahl der diagonal oder transversal orientierten Lagen im Verhältnis zur Gesamtzahl der in globaler x-Richtung orientierten Lagen eingeführt. Durch das Verhältnis der Summe der Dicken der diagonal und orthogonal angeordneten Lagen $\sum t_{d,i}$ zur Gesamtdicke des Laminats t wird diese Terminologie quantifiziert. Dabei werden diagonal oder quer angeordnete Schichten durch Multiplikation ihrer Dicke mit dem Quadrat der Kosinus-Funktion ihrer Orientierung Θ_i berücksichtigt ($\cos^2\Theta_i$). Für die 5-lagige DLT Serie D7 ergibt sich der Homogenisierungsgrad exemplarisch nach Gleichung (AP5-34) [17]:

$$\xi = \frac{\sum t_{d,i}}{t} = \frac{(\cos 45^\circ)^2 \cdot 30 \text{ mm} \cdot 2 + (\cos 45^\circ)^2 \cdot 30 \text{ mm} \cdot 2 + (\cos 90^\circ)^2 \cdot 30 \text{ mm}}{150 \text{ mm}} = 0.60 \quad (\text{AP5-34})$$

Ein isotropes Plattenelement als Extremwert mit einem Homogenisierungsgrad von $\xi = 1,000$. Ein 5-lagiges CLT der Serie O7 besitzt einen Homogenisierungsgrad von $\xi = 0,429$. Der eingeführte Homogenisierungsgrad von Massivholzelementen dient als Indikator für die Anwendbarkeit des gewählten Layups für Systeme unter vorwiegend einachsiger Biegung oder Torsion [17].

2.5 Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse der Forschung an DLT

Die Forschung an DLT hebt die Relevanz und Eignung diagonal ausgerichteteter Lagen in Massivholzelementen für einen nachhaltigeren und effektiveren Umgang mit der Ressource Holz in besonderem Maße hervor. Detaillierte analytische und numerische Ergebnisse zu den Steifigkeitsparametern und das Aufzeigen der zugehörigen experimentellen Prüfverfahren ermöglichen und unterstützen die Erlangung der Marktreife.

Die bisherige Forschung an DLT zeigt, dass die Torsionssteifigkeit im Vergleich zu herkömmlichem, orthogonal verklebtem, BSP deutlich erhöht ist. Diese Eigenschaft ist ideal für Platten unter zweiachsiger Biegebeanspruchung, wie z.B. punktgestützten Flachdecken. Gleichzeitig verspricht die diagonale Orientierung der einzelnen Lagen eine Erhöhung der Scheibenschubsteifigkeit, welche hinsichtlich aussteifenden Wand- und Deckenelementen von großem Interesse ist.

- Die Untersuchungen mit großmaßstäblichen FE-Modellen ergaben, dass DLT geringere Verformungen erfährt als herkömmliches BSP. Dies spiegelt die vergleichbar hohen Steifigkeitseigenschaften bei Verwendung des gleichen Grundmaterials von DLT wider. Vor allem die hohe Torsionssteifigkeit prädestiniert DLT für den Einsatz in punktgestützten Deckensystemen.
- Die überproportional hohe Scheibenschubsteifigkeit von DLT gegenüber herkömmlichem BSP empfiehlt die Verwendung von DLT für aussteifende Wand- und Deckenscheiben oder wandartigen Trägern mit großen Öffnungen.
- Es wurde die Terminologie »Homogenisierungsgrad« in Bezug auf die Anzahl der diagonal oder transversal orientierten Schichten im Verhältnis zur Gesamtzahl der in globaler x-Richtung orientierten Schichten eingeführt. Durch die Anpassung der Orientierung einzelner Schichten an das jeweilige statische System und die Beanspruchung wurde der Begriff "anwendungsoptimiertes" Massivholzelement geprägt.
- Noch nicht veröffentlichte Untersuchungen zur Spannungsverteilung in DLT im Zuge konzentrierter Lasten zeigen, dass die diagonale Ausrichtung einzelner Lagen zu Homogenisierungseffekten bei der Verteilung von Biege- und Schubspannungen führt [17].

Die Untersuchungen haben eine Reihe von Fragestellungen für zukünftige Forschungsarbeiten aufgezeigt:

- Erste Untersuchungen [17; 67] zum Langzeit-Verformungsverhalten von DLT unter zweiachsiger Biegung liefern vielversprechende Anknüpfungspunkte für weitere Forschung an DLT.
- Auswirkungen diagonalen Lagen-Orientierung in Massivholzelementen auf das Frequenzverhalten erscheint vielversprechend.
- Untersuchungen zum Feuerwiderstand und zu den Delaminierungseffekten von DLT im Vergleich zu orthogonal verklebtem BSP könnten interessante neue Ergebnisse liefern.
- Derzeit wird DLT nicht durch das EAD 130005-00-0304 [10] abgedeckt, da die Ausrichtung der einzelnen Lagen von 0 und 90° abweicht. Ein zukünftiges Ziel sollte die Erweiterung des EADs hinsichtlich diagonalen Lagen-Orientierung sein.

3. Literaturverzeichnis AP5

- [1] Mindrup, K.: Room climate conditioning using thermally activated solid timber elements. Concept development, performance analysis and derivation of design tool. Dissertation. Technical University of Munich. Munich, 2020.
- [2] Kornadt O. ; Carrigan, S. ; Schöndube, T. ; Winter, S. ; Mindrup, K. ; Knieriemen, G. ; Loderer, F. ; Nisse, J. ; Peters, H.R. ; Rashid, S. ; Richter, C. ; Schoch, T. ; Staniszewski, A.: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Forschungsinitiative ZukunftBau, 2019.
- [3] Mindrup, K. ; Winter, S.: Thermal activation of solid timber elements for indoor climate control. Conference Paper, WCTE 2018. Seoul, South Korea, 2018.
- [4] The Construction Products Regulation (CPR), Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council, harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC, European Commission, Brussels, 2011.
- [5] ETA-20/0023, Pfeifer CLT Brettsperrholz. European Technical Assessment. Austrian Institute of Construction Engineering, Vienna, 2020.
- [6] Flexeder, N. ; Schumacher, N. ; Hepf, C. ; Ahmad, N. ; Briels, D. ; Varga, Z. ; Kamml, M. ; Pualik, J. ; Übelhör, V. ; Winter, S. ; Auer, T.: Potenzial hygrothermisch aktivierter Bauteile (PhyTAB) – Energieeffiziente Raumkonditionierung mittels luftdurchströmter Massivholzelemente und hygroskopisch optimierte Oberflächen. BBSR-Online-Publikation 17/2022, Bonn, 2022.
- [7] EN 408:2012: Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2012.
- [8] Kreuzinger, H. ; Sieder, M.: Einfaches Prüfverfahren zur Bewertung der Schubfestigkeit von Kreuzlagenholz/Brettsperrholz. Bautechnik, 90(5): 314-316, Berlin, 2013.
- [9] Brandner, R. ; Dietsch, P. ; Dröscher J., Schulte-Wrede, M. ; Kreuzinger, H. ; Sieder, M.: Cross laminated timber (CLT) diaphragms under shear: Test configuration, properties and design. Construction and Building Materials, 147:312-327, 2017.
- [10] Brandner, R. ; Bogensperger, T. ; Schickhofer, G.: In plane Shear Strength of Cross Laminated Timber (CLT): Test Configuration, Quantification and influencing Parameters. CIB-W18/46-12-2, Vancouver, 2013.
- [11] Niebauer, S.: Experimentelle Untersuchung der Scheibenschubfestigkeit und -steifigkeit von thermisch aktivierbarem Brettsperrholz. Master's Thesis. Technical University of Munich. Munich, 2020.
- [12] Gabel, S.: Experimentelle Untersuchung des Knickverhaltens multifunktionaler Brettsperrholz-Wandelemente. Master's Thesis. Technical University of Munich. Munich, 2020.
- [13] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. DIN – Deutsches Institut für Normung. Berlin, 2013.
- [14] Kreuzinger, H.: Verbundkonstruktionen aus nachgiebig miteinander verbundenen Querschnittsteilen. Tagungsband. Ingenieurholzbau Karlsruher Tage 2000. Bruderverlag, Karlsruhe, 2000.
- [15] JCSS probabilistic model code Part 3: resistance models 3.5 properties of timber. Joint Committee on Structural Safety, 2006.
- [16] Arnold, M. ; Dietsch, P. ; Winter, S.: Mechanical properties of innovative multifunctional CLT. Conference Paper, WCTE2020/21. Santiago, Chile, 2021.

- [17] Arnold, M.: Mechanical Properties of Diagonal Laminated Timber (DLT) with Respect to Point-Supported Mass Timber Slabs. Dissertation in Ausarbeitung. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, voraussichtlich 2023.
- [18] Csokas, W.: Determination of the torsional stiffness properties of diagonal laminated timber (DLT). Master's Thesis. Technical University of Munich, 2022.
- [19] Forster, J.: Verformungsverhalten von multifunktionalem Brettsperrholz unter Feuchteänderung. Bachelor's Thesis. Technical University of Munich, 2020.
- [20] Fochler, D.: Verformungsverhalten von thermisch aktiviertem Brettsperrholz unter nutzungsbedingten Feuchtigkeitsänderungen. Master's Thesis. Technical University of Munich. Munich, 2021.
- [21] Kögl, K.: Experimentelle Untersuchung des Abbrandverhaltens multifunktionalen Brettsperrholzes. Master's Thesis. Technical University of Munich. Munich, 2021.
- [22] DIN EN 1995-1-2:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten- Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN1995-1-2:2004+ AC:2009. DIN – Deutsches Institut für Normung. Berlin, 2010.
- [23] Schleifer, V.: Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall. (Dissertation). ETH Zürich, 2009.
- [24] Klippel, M. ; Frangi, A.: Brandverhalten von Brettsperrholz. Bautechnik, 93(8), 567 – 576, 2016.
- [25] Teibinger, M.: Brandbemessung im Holzbau. Teibinger-Holzbau im Detail, (2017).
- [26] DIN 4102-2:1977-09, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. DIN – Deutsches Institut für Normung. Berlin, 1977.
- [27] DIN EN 1364-1:2015-09, Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile- Teil 1: Wände; Deutsche Fassung EN_1364-1:2015. DIN – Deutsches Institut für Normung. Berlin, 2015.
- [28] DIN EN 1365-1:2013-08, Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile- Teil1: Wände; Deutsche Fassung EN_1365-1:2012_+ AC:2013. DIN – Deutsches Institut für Normung. Berlin, 2016.
- [29] Klippel, M. ; Schmid, J. ; Fahrni, R. ; Kleinherz, M. ; Frangi, A.: Vorschlag einer Standardprüfmethode für Brettsperrholz im Brandfall. Bautechnik, 96(11), 2019.
- [30] ISO 834-1:1999-09, Feuerwiderstandsprüfungen - Bauteile - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. ISO - Organization for Standardization, Genf, 1999.
- [31] Bejtka, I.: Cross (CLT) and diagonal (DLT) laminated timber as innovative material for beam elements. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 17, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2011.
- [32] Maderebner, R.; European Manufacturing: What's next; Mass Timber Conference 2021 (online conference)
- [33] Arnold, M. ; Dietsch, P. ; Maderebner, R. ; Winter, S.: Diagonal laminated timber—Experimental, analytical, and numerical studies on the torsional stiffness. Construction and Building Materials 322, p. 126455, 2022.
- [34] Sotayo, A. ; Bradley, D. ; Bather, M. ; Sareh, P. ; Oudjene, M. ; El-H. I. ; Harte, A. M. ; Mehra, S. ; O'Ceallaigh, C. ; Haller, P. ; Namari, S. ; Makradi, A. ; Belouettar, S. ; Bouhala, L. ; Deneufbourg, F. ; Guan, Z.: Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. Developments in the Built Environment 1, Nr. 1, 2020.
- [35] Mestek, P.: Punktgestützte Flächentragwerke aus Brettsperrholz (BSP) – Schubbemessung unter Berücksichtigung von Schubverstärkungen. Dissertation, Technical University of Munich, 2011.

- [36] Maderebner, R. ; Maurer, B.: Cross Laminated Timber under concentrated Compression Loads - Methods of Reinforcements. *Engineering Structures* 245, p. 112534, 2021.
- [37] Jauk, G.: BSP-Kapazität wird sich bis 2022 verdoppeln. URL: <https://www.holzkurier.com/holzprodukte/2020/11/bsp-kapazitaet-wird-sich-bis-2022-verdoppeln.html>; Stated as of 10/19/2021. *Holzkurier*, 2020
- [38] Bodemer, E. ; Kleinhenz, M. ; Erhard, L. ; Winter S.: Gesundheitliche Interaktion von Holz-Mensch-Holz. proHolz Bayern. Research Project HOMERA, Chair of Timber Structures and Building Construction, Technical University of Munich, 2020.
- [39] Züblin Timber GmbH: Optimal acoustics and optics through wood: New construction of interim philharmonic concert hall in Munich. Press release. URL: www.zueblin-timber.com/en/press/news/optimal-acoustics-and-optics-through-wood-new-construction-of-interim-philharmonic-concert-hall-in.html/ — Stated as of 10/20/2021.
- [40] Deutsches Institut für Bautechnik: Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. Zulassungsbereich: Holzbau und Holzwerkstoffe. Deutsches Institut für Bautechnik. URL: https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT_n/vSVA_9.htm — Stated as of 10/19/2021.
- [41] EAD13005-00-0304, Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings. European Assessment Document, Official Journal of the European Union (OJEU) 2015/C 226/05, Brussels, 2015.
- [42] Bosl, R.: Zum Nachweis des Trag- und Verformungsverhaltens von Wandscheiben aus Brettlagenholz. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2002
- [43] Turesson, J ; Björnfot, A. ; Berg, S. ; Ekevad, M. ; Tomasi, R.: Picture frame and diagonal compression testing of cross-laminated timber. *Materials and Structures*, 52:60, 2019.
- [44] Nettles, A. T.: Basic Mechanics of Laminated Composite Plates. NASA Reference Publication 1351, National Aeronautics and Process Laboratory, Science and Engineering Direction, Washington, DC, 1994.
- [45] Schickhofer, G.: Starrer und nachgiebiger Verbund bei geschichteten, flächenhaften Holzstrukturen. Dissertation, Technischen Universität Graz, 1994.
- [46] Timoshenko, S. P.: On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41:245, 744-746, 1921.
- [47] Bogensperger, T. ; Silly, G.: Zweiachsige Lastabtragung von Brettsperrholzplatten. *Bautechnik* 91, No. 10, 742-752, 2014.
- [48] ÖNORM B 1995-1-1:2015, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen. Österreichische Normungsinstitut für Normung e.V. (ON), Wien, 2015.
- [49] Schickhofer, G. ; Bogensberger, T. ; Moosbrugger, T.: BSPHandbuch, Holz Massivbauweise in Brettsperrholz: Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzepts. Technischen Universität Graz, Graz, 2010.
- [50] Wallner-Novak, M. ; Koppelhuber, J. ; Pock, K.: Brettsperrholz Bemessung : Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode. ProHolz Austria, Wien, 2013.
- [51] Feichter, I.: Spannungs- und Traglastberechnungen an ausgewählten Problemen der Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz. Master's Thesis, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2013.

- [52] Reddy, J. N.: Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis. 2. ed. Boca Raton, CRC Press, 2004.
- [53] Jones, R. M.: Mechanics of Composite Materials. 2nd ed., Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, 2014.
- [54] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Eurocode 5: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, 2013.
- [55] Kreuzinger, H. ; Scholz, A.: Wirtschaftliche Ausführungs- und Bemessungsmethode von ebenen Holzelementen (Brücken, Decken, Wände). Schlussbericht. Technische Universität München, Institut für Tragwerksbau, München, 1999.
- [56] EN 338:2016, Structural timber - Strength classes. CEN - Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2016.
- [57] ETA-16/0055, Radiusholz. European Technical Assessment. Austrian Institute of Construction Engineering, Vienna, 2020.
- [58] EN 16351:2021, Timber structures - Cross laminated timber - Requirements. CEN - Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2021.
- [59] EN 789 Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels. CEN - Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2005.
- [60] DIN 1052-10:2012-05: Herstellung und Ausführung von Holzbauwerken - Teil 10: Ergänzende Bestimmungen. English title: Design of timber structures - Part 10: Additional provisions. Deutsches Institut für Normung Berlin, 2012.
- [61] Buck, D. ; Wang, X. A. ; Hagman, O. ; Gustaffson, A.: Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Layer Configuration. In: BioResources, 11(2), p. 4633–4644, 2016.
- [62] Holzinger, D. P.: Konzeption eines Scheibenschubversuches für diagonal vernageltes Brettsperrholz. Master's thesis, Chair of Timber Structures and Building Construction, Technical University of Munich, 2021.
- [63] Massiv-Holz-Mauer Entwicklungs GmbH: Technische Zeichnungen; Versuchsstand der Scherrahmenversuch, Hans Hundegger AG, Hawangen, 2021.
- [64] Kreuzinger, H. ; Sieder, M.: Einfaches Prüfverfahren zur Bewertung der Schubfestigkeit von Kreuzlagenholz/Brettsperrholz. Bautechnik, 90(5): 314-316, Berlin, 2013.
- [65] Frocht, M. M.: Recent advances in photoelasticity and an investigation of the stress distribution in square blocks subjected to diagonal compression. Transactions, ASME, Vol. 55, pp. 135-153, 1931.
- [66] Andreolli, M. ; Rigamonti, M. ; Tomasi, R.: Diagonal compression test on cross laminated timber panels. Conference Thesis, World Conference on Timber Engineering WCTE 2014, Quebec, Canada, 2014.
- [67] Vogel, F.: Investigations on the long-term deformation behavior of CLT and DLT. Master's Thesis. Technical University of Munich, Munich 2021
- [68] Donhauser, T.: Bestimmung der Schubtragfähigkeit von diagonal verklebtem Brettsperrholz. Master's Thesis, Technical University of Munich, Munich 2022

IV. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse in Arbeitspaket 6

1. Allgemeines

1.1 Ziel und Gegenstand aus dem Antrag

Die Zielsetzung des Arbeitspaketes 6 orientiert sich am Förderantrag. Hierzu gibt es keine wesentlichen Änderungen (siehe Tabelle 2).

Hauptziele: Entwicklung von zuverlässigen praxisorientierten Entwurfs- und Modellierungsstrategien, von einfachen Entwurfsformeln sowie Bemessungsansätzen für großflächige und mehrstöckige Brettsperrholz-Gebäude.

Hauptaktivitäten: Theoretische Arbeit (analytische Modelle, Finite-Elemente-Modelle); Entwurf (Entwicklung und Modellierung von Pilotprojekten); Entwicklung von europäischen Richtlinien oder technischen Spezifikationen für ausgewählte Konstruktionsfälle.

1.2 Methodik und Überblick

In den folgenden Kapiteln werden ausschließlich die an der TUM bearbeiteten Arbeitsanteile dargelegt.

Abbildung 49 stellt das für AP6 zugrunde gelegte methodische Vorgehen zur Entwicklung von Bemessungsgleichungen dar.

Maßgebende Grundlage für Arbeitspaket 6 bildete die Arbeit der *COST action FP 1402*, siehe [1]. Sie ist unter anderem Grundlage für die derzeitige Einarbeitung von Brettsperrholz in Regelanwendungen der europäischen Normung (siehe Eurocode 5 [2]). Diese und andere Literaturquellen wurden für das Arbeitspaket 6 des hier behandelten Forschungsprojektes gesichtet, strukturiert sowie Forschungsfragen aufgezeigt, siehe Zwischenbericht 2020 und Kapitel IV.2.

Die erarbeiteten Ergebnisse wurden ausgewählten Experten der Praxis präsentiert und mit ihnen diskutiert. Gemeinsam wurden die folgenden Schwerpunktthemen für die weitere Ausarbeitung ausgewählt, siehe Zwischenbericht 2021 und Kapitel IV.3:

- Punktgestützte Brettsperrholzdecken
- Brettsperrholzdecken mit Öffnungen

Im Schwerpunktthema der *punktgestützten Brettsperrholzdecken* wurde anhand bestehender Forschungsergebnisse aus der Literatur ein Bemessungsleitfaden (verstärkt und unverstärkt) erstellt, siehe Kapitel IV.4.

Im Schwerpunktthema in *Brettsperrholzdecken mit Öffnungen* wurden die in der Literatur vorhandenen Ergebnisse durch Bauteilversuche erweitert. Prüfaufbauten wurden entwickelt und Versuche zur Steifigkeits- und Traglastermittlung durchgeführt, siehe Zwischenbericht 2022 und Kapitel IV.4.

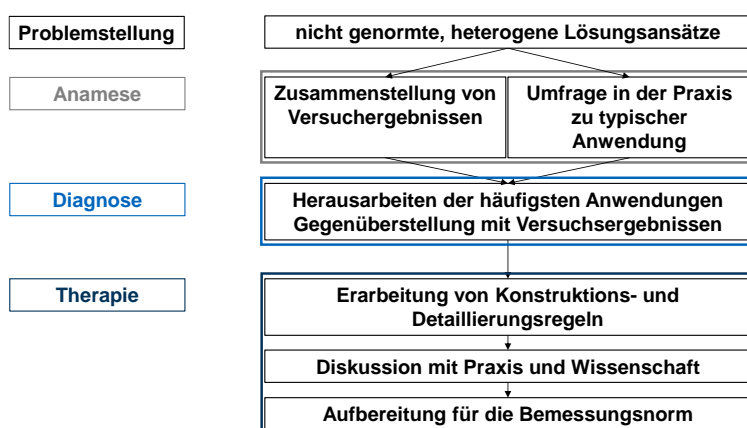


Abbildung 49: Methodik im Arbeitspaket 6

2. Einfache Modellierung und allgemeine Bemessungssituationen

2.1 Allgemeine Methoden der Modellierung

2.1.1 Allgemeines

Holz ist aufgrund seines makroskopischen Aufbaues als anisotroper Werkstoff anzusehen. Ein spezieller Fall der Anisotropie ist die Orthotropie, bei der die Materialeigenschaften in drei Symmetrieebenen aufgeteilt werden können, welche orthogonal zueinander liegen (vgl. Abbildung 50).

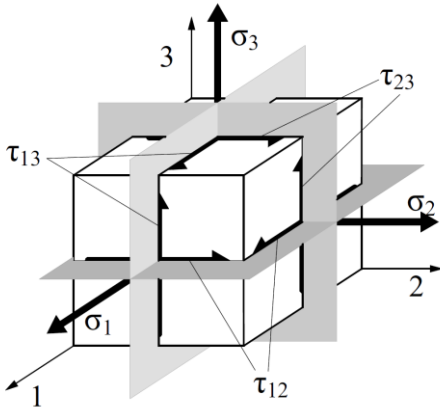


Abbildung 50: Darstellung der drei orthogonal zueinander verlaufenden Symmetrieebenen [3]

Ein spezieller Fall der Orthotropie ist die transversale Isotropie, bei der Materialien eine isotropische Ebene besitzen, welche rechtwinklig zur Faserrichtung liegt. Diese Ebene kann beliebig um die Haupttrichtung gedreht werden. Die Materialeigenschaften quer zur Ebene bleiben dabei immer gleich. Abbildung 51 zeigt die schematische Darstellung eines transversal isotropen Elements. Bei der Materialmodellierung wird Holz in der Regel als transversal isotropes Material angesehen. Das bedeutet die Materialeigenschaften tangential und radial werden zu Materialeigenschaften quer zur Faser definiert.

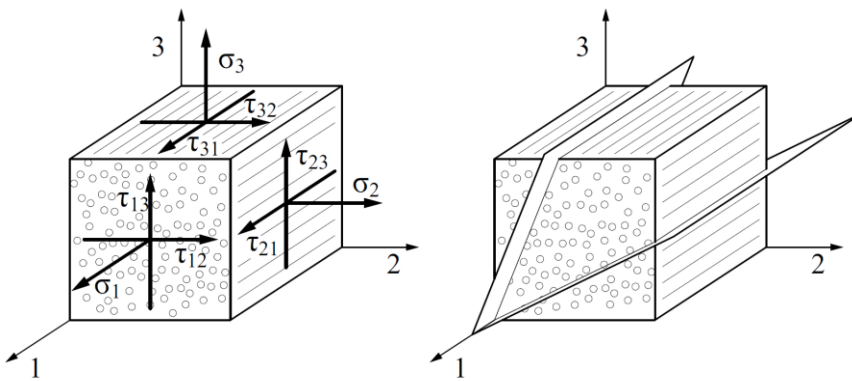


Abbildung 51: Volumen-Element mit Spannungstensoren (links) und Darstellung der transversalen Isotropie mit beliebig gewählten isotropischen Ebenen (rechts) [3]

Durch die Annahme des transversal isotropen Materials kann Holz mit folgenden Definitionen komplett abgebildet werden:

$$E_1 = E_{\parallel}$$

$$E_2 = E_3 = E_{\perp}$$

$$G_{31} = G_{21} = G_{\perp\parallel}$$

$$\nu_{31} = \nu_{21} = \nu_{\perp\parallel}$$

$$\nu_{23} = \nu_{\perp\perp}$$

(AP6-1)

Für orthotrope Materialien gelten für die Querdehnzahlen folgende Definitionen:

$$v_{21} = v_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1}$$

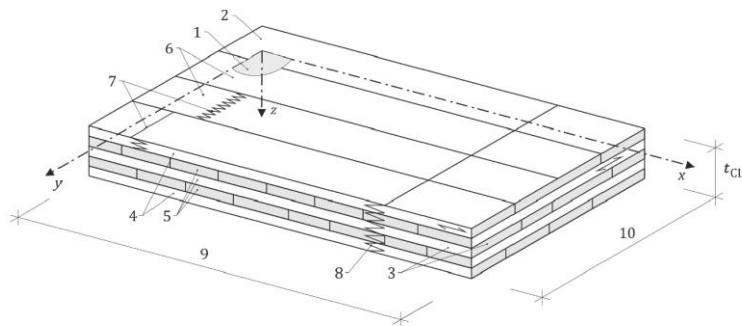
$$v_{31} = v_{13} \cdot \frac{E_3}{E_1} \quad (\text{AP6-2})$$

$$v_{32} = v_{23} \cdot \frac{E_3}{E_2}$$

Im Holzbau werden die Querdehnzahlen aufgrund der starken Schwankungen, verursacht durch Risse und andere Materialfehler, zumeist zu null gesetzt. Es folgt somit:

$$v_{12} = v_{21} = v_{13} = v_{31} = v_{23} = v_{32} = 0 \quad (\text{AP6-3})$$

Es ist an den obigen Gleichungen zu erkennen, dass die Faserrichtung des Holzes bei der Modellierung einen wesentlichen Einfluss hat. In der Anwendung in Brettsperrholz (BSP, CLT) werden in mindestens drei Lagen Brettlamellen rechtwinklig miteinander verklebt. Brettsperrholz ist somit ein massiver, geschichteter Konstruktionsbaustoff, der im Ingenieurholzbau als flächiges Bauteil zum Einsatz kommt (vgl. Abbildung 52).



Key

1 plane of the element	2 wide face	3 narrow face	4 outer layer
5 inner layer	6 lamination	7 finger joint in a lamination	8 large finger joint
9 width b_{CL} of plate or height h_{CL} of beam subjected to bending stresses perpendicular to grain of outermost layers	10 width b_{CL} of plate or height h_{CL} of beam subjected to bending stresses parallel to grain of outermost layers		

Abbildung 52: Brettsperrholzbauteil – Aufbau und Begriffe [4]

Durch die kreuzweise Verklebung der Lagen und der Anisotropie des Holzes sind die Materialeigenschaften von Brettsperrholz über die Höhe nicht konstant. Die rechtwinklig angeordneten Zwischenschichten, auch Querlagen genannt, besitzen in Haupttragrichtung des Bauteils wesentlich geringere Steifigkeiten und Festigkeiten. Daraus resultieren unterschiedliche Steifigkeiten und Spannungen im Vergleich zu einem Bauprodukt mit über die Querschnittshöhe konstanten Materialeigenschaften (vgl. Abbildung 53 und Abbildung 54).

Brettsperrholz kann aufgrund der nicht konstanten Materialeigenschaften über die Querschnittshöhe nicht ohne Methoden berechnet werden, die die Nachgiebigkeit des Querschnittes berücksichtigen. Einfache und etablierte Modellierungsansätze sind hier u.a. das γ -Verfahren nach Eurocode 5 [2] sowie die Schubanalogie nach Kreuzinger [5]. Diese Theorien nähern das Verhalten von nachgiebig verbundenen Querschnitten, zu denen aufgrund der schubweichen Querlagen auch Brettsperrholz zählt, an.



Abbildung 53: Vergleich der Schubspannungen zwischen Brettsperrholz (links) und Brett-schichtholz (rechts) [6]

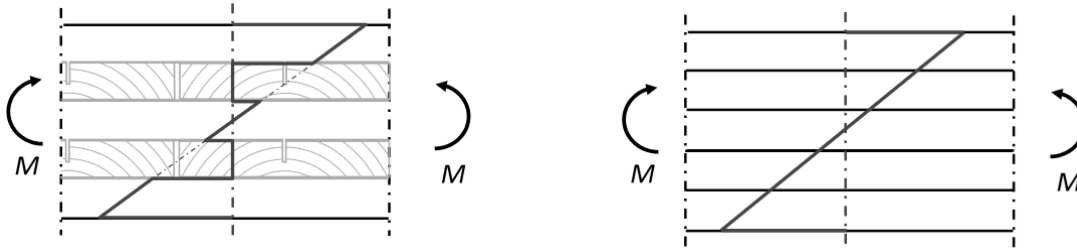


Abbildung 54: Vergleich der Biegespannungen zwischen Brettsperrholz (links) und Brettschichtholz (rechts) [6]

2.1.2 γ -Verfahren

Das γ -Verfahren ist informativ im Anhang B der DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2] unter „Nachgiebig verbundene Biegestäbe“ geregelt. Das Verfahren dient der Berechnung von Biegebalken aus nachgiebig verbundenen Querschnitten oder Schichten im Falle von BSP. Ein ideeller Querschnitt wird als Bernoulli-Balken berechnet, womit das γ -Verfahren mittels Handrechnung durchführbar ist.

Nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2] basiert die Berechnungsmethode auf der linearen Elastizitätstheorie und den folgenden Annahmen:

- Die einzelnen Querschnittsteile (aus Holz oder Holzwerkstoffen) sind ungestoßen oder mit geklebten Verbindungen ausgeführt.
- Die Teilquerschnitte sind durch mechanische Verbindungsmittel mit einem Verschiebungsmodul K miteinander verbunden. Bei geklebten Verbindungen liegt in der Regel ein starrer Verbund der Teilquerschnitte vor. Bei BSP ist es jedoch so, dass die Querlagen als nachgiebiges Verbindungsmittel der Längslagen angesehen werden.
- Der Abstand s der Verbindungsmittel ist entweder konstant oder entsprechend der Querkraftlinie zwischen s_{min} und s_{max} , mit $s_{max} \leq 4 \cdot s_{min}$ abgestuft.
- Die Kraft verläuft in z-Richtung und führt zu einem sinus- oder parabelförmigen Biegemoment $M=M(x)$ und einer Querkraft $V=V(x)$.

Das γ -Verfahren liefert nach Mestek [7] nur unter folgenden Voraussetzungen eine exakte Lösung:

- Statisch bestimmter Einfeldträger
- Sinusförmige Belastung
- Konstante Querschnitte (max. 3 Teilquerschnitte beim einfachen Verfahren)
- Gültigkeit der Bernoulli-Hypothesen in den Teilquerschnitten
- Linear elastisches Werkstoffverhalten
- Kontinuierlicher, konstanter Verbund
- Vernachlässigung der Schubverformungen der Teilquerschnitte

Vor allem die oben geforderte sinusförmige Belastung wird in den seltensten Fällen zutreffen, weshalb das γ -Verfahren in den meisten Fällen nur eine Näherungslösung sein wird. Eine gute Näherungslösung ist gemäß Mestek [7] für Einfeldträger unter Streckenlast sowie für Durchlaufträger und Kragträger unter Streckenlast mit Berücksichtigung der Momentennullpunkte zu erwarten.

In der DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2] sind für das γ -Verfahren nur drei geregelte Querschnittstypen angegeben. Diese sind in diesem Dokument in Abbildung 55, Abbildung 56 sowie Abbildung 57 dargestellt.

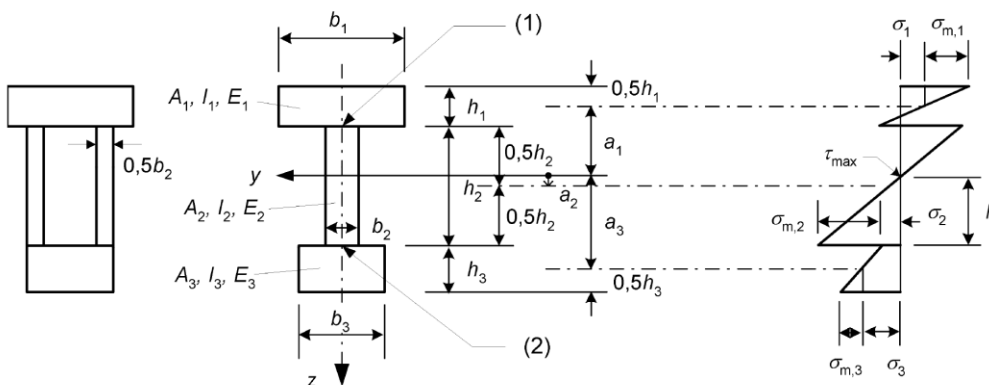


Abbildung 55: Geregelter Querschnitt 1 aus der DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2]

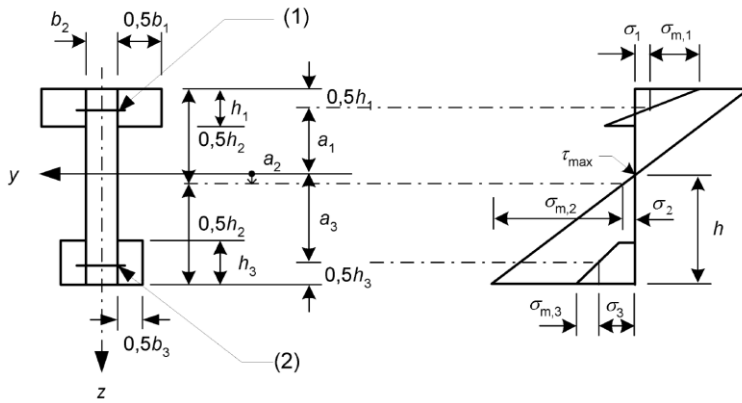


Abbildung 56: Geregelter Querschnitt 2 aus der DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2]

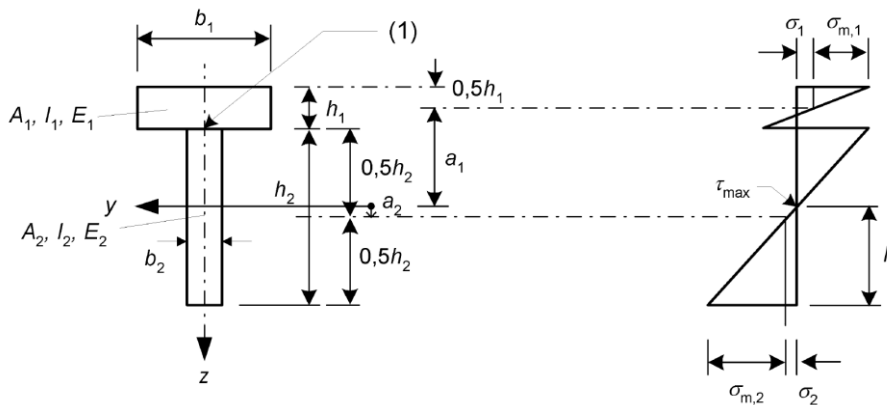


Abbildung 57: Geregelter Querschnitt 3 aus der DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2]

Mithilfe des γ -Wertes wird durch die Reduzierung der Steiner-Anteile die effektive Steifigkeit des Verbundquerschnittes EI_{ef} berechnet (vgl. Gleichung (AP6-4)). Jeder Teilquerschnitt besitzt hierbei seine eigenen Querschnittsparameter und seinen eigenen γ -Wert.

$$EI_{ef} = \sum_{i=1}^3 E_i I_i + \sum_{i=1}^3 E_i A_i \cdot a_i^2 \cdot \gamma_i \quad (\text{AP6-4})$$

Mit:

- E_i = Elastizitätsmodul von Teilquerschnitt i
- I_i = Flächenträgheitsmoment von Teilquerschnitt i
- A_i = Querschnittsfläche von Teilquerschnitt i
- a_i = Abstand des Schwerpunkts der Schicht i zum Schwerpunkt des Verbundquerschnittes
- γ_i = Reduktionsfaktor des Teilquerschnittes i

Der Reduktionsfaktor γ_i eines jeden Teilquerschnittes i der zusammengesetzten Struktur kann nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2] wie folgt berechnet werden:

$$\gamma_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{l^2 \cdot K_i}} & \text{für } i = \{1; 3\} \\ 1.0 & \text{für } i = \{2\} \end{cases} \quad (\text{AP6-5})$$

Mit:

- s_i = Abstand der Verbindungsmittel i
- K_i = Verschiebungsmodul i

$$l = \begin{cases} l_s & \text{für Balken} \\ 0.8 \cdot l_s & \text{für Durchlaufträger} \\ 2 \cdot l_s & \text{für Kragarme} \end{cases}$$

$l_s =$ Spannweite des Systems

Für die Lage des Schwerpunkts des Verbundquerschnitts wird die Gleichung (AP6-6) verwendet, wobei a_2 der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Teilquerschnitts 2 und dem Schwerpunkt des Verbundquerschnitts ist:

$$0 \leq a_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2) - \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot (h_2 + h_3)}{\sum_{i=1}^3 E_i \cdot A_i \cdot \gamma_i} \geq \frac{h}{2} \quad (\text{AP6-6})$$

Mit:

$h_i =$ Höhe von Teilquerschnitt i

$h =$ Höhe des Verbundquerschnitts

Betrachtet man BSP als einen Sonderfall des Verbundquerschnitts, so kann die γ -Methode für ein BSP-Element mit drei oder fünf Lagen und die erweiterte γ -Methode für eine BSP-Struktur mit sieben oder mehr Lagen verwendet werden. Dabei werden die Längslagen als Teilquerschnitte und die Querlagen als nachgiebiger Verbund zwischen den Teilquerschnitten betrachtet. Die Nachgiebigkeit des Verbundes ist somit hauptsächlich auf die Nachgiebigkeit der Querlagen zurückzuführen, da die Klebeverbindung im kalten Zustand als starr angenommen wird. [8]

Nach Wallner-Novak [8] können die γ -Werte mit einer leicht modifizierten Form von DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2] berechnet werden. Die Schubsteifigkeit der Querlagen wird anhand des Rollschubmoduls und der betrachteten Breite des Elementes berechnet. Es folgt somit nach [8] für BSP-Elemente mit drei oder fünf Schichten die Berechnung der γ -Werte mit den Gleichungen (AP6-7) bis (AP6-9):

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot d_{1,2}}{l^2 \cdot G_{R,12}}} \quad (\text{AP6-7})$$

Mit:

$G_{R,1,2} =$ Rollschubmodul der Querlage zwischen Schicht 1 und 2

$d_{1,2} =$ Dicke der Querlage zwischen den Längsschichten 1 und 2

$$\gamma_2 = 1.0 \quad (\text{AP6-8})$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot d_{2,3}}{l^2 \cdot G_{R,23}}} \quad (\text{AP6-9})$$

Mit:

$G_{R,2,3} =$ Rollschubmodul der Querlage zwischen Schicht 2 und 3

$d_{2,3} =$ Dicke der Querlage zwischen Schicht 2 und 3

Die Berechnung der Schnittgrößen der Teilquerschnitte kann mithilfe der γ -Werte mit Gleichung (AP6-10) für die Normalkraft im Teilquerschnitt N_i sowie mit Gleichung (AP6-11) für das Moment im Teilquerschnitt M_i durchgeführt werden. Dabei ist M das Moment im Verbundquerschnitt.

$$N_i = \frac{M}{EI_{ef}} \cdot a_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot \gamma_i \quad (\text{AP6-10})$$

$$M_i = \frac{M}{EI_{ef}} \cdot E_i \cdot I_i \quad (\text{AP6-11})$$

Die Spannung des Teilquerschnittes ergibt sich anschließend nach Gleichung (AP6-12).

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} \pm \frac{M_i}{W_i} \quad (\text{AP6-12})$$

Der Schubfluss in der Fuge t_{i-2} zwischen den Teilquerschnitten i und 2 kann gemäß Mestek [7] mit Gleichung (AP6-13) berechnet werden.

$$t_{i-2} = \frac{V \cdot \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i}{EI_{ef}} \quad (\text{AP6-13})$$

Mit:

$$i = \{1, 3\}$$

V = Querkraft des Verbundquerschnittes

Die Schubspannung im Teilquerschnitt 2 kann gemäß Mestek [7] mit Gleichung (AP6-14) berechnet werden.

$$\tau_2 = V \cdot \frac{\gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3 + 0.5 \cdot E_2 \cdot b_2 \cdot h^2}{b_2 \cdot EI_{ef}} \quad (\text{AP6-14})$$

Mit:

$$h = a_2 + \frac{h_2}{2}$$

Erweitertes Verfahren:

Für die erweiterte Methode, die für BSP-Elemente mit sieben oder mehr Schichten verwendet werden kann, muss ein Gleichungssystem (siehe Gleichung (AP6-16)) aufgestellt und unter den folgenden Annahmen gelöst werden, um die einzelnen γ -Werte zu bestimmen [8]. Nach Wallner-Novak [8] können die einzelnen Teile des Verbundquerschnitts unterschiedliche Steifigkeiten haben, die aber über die Länge des Trägers konstant sein müssen. Außerdem werden die Längssteifigkeiten der Querschichten auf null gesetzt.

$$[V] \cdot \gamma = s \quad (\text{AP6-15})$$

$$\begin{bmatrix} V_{1,1} & V_{1,2} & 0 & & & & & 0 \\ V_{2,1} & V_{2,2} & V_{2,3} & 0 & & & & 0 \\ 0 & V_{3,2} & V_{3,3} & V_{3,4} & 0 & & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & V_{m-2,m-3} & V_{m-2,m-2} & V_{m-2,m-1} & & 0 \\ 0 & \dots & & 0 & V_{m-1,m-2} & V_{m-1,m-1} & V_{m-1,m} & \\ 0 & \dots & & & 0 & V_{m,m-1} & V_{m,m} & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \vdots \\ \gamma_{m-2} \\ \gamma_{m-1} \\ \gamma_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ s_{m-2} \\ s_{m-1} \\ s_m \end{bmatrix} \quad (\text{AP6-16})$$

Mit:

$$V_{i,i-1} = -C_{i-1,i} \cdot a_{i-1}$$

$$V_{i,i} = (C_{i-1,i} + C_{i,i+1} + D_i) \cdot a_i$$

$$V_{i,i+1} = -C_{i,i+1} \cdot a_{i+1}$$

$$s_i = -C_{i,i+1} \cdot (a_{i+1} - a_i) + C_{i-1,i} \cdot (a_i - a_{i-1})$$

a_i als der Abstand von Teilquerschnitt i zu dem des zusammengesetzten Querschnitts

$$C_{j,k} = \frac{b \cdot G_{R,jk}}{d_{j,k}}$$

$$D_i = \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot b \cdot d_i}{l^2}$$

Zusammenfassung

Die γ -Methode ist ein einfaches Verfahren zur Bestimmung der Steifigkeiten von BSP als nachgiebigem Verbundquerschnitt. Insbesondere die ursprüngliche Methode aus der DIN EN 1995-1-1:2010-12 [2] kann leicht mittels Handrechnung gelöst werden. Das Problem dabei ist, dass bei der ursprünglichen Methode nur BSP-Elemente mit maximal fünf Lagen berechnet werden können. Für mehr Lagen kann die erweiterte Methode verwendet werden, die jedoch per Handrechnung aufwendiger zu lösen ist.

2.1.3 Schubanalogieverfahren

Das Schubanalogieverfahren wurde von Kreuzinger [5] entwickelt und ist ein Verfahren zur Berechnung von Systemen mit einem Verbundquerschnitt aus starr oder nachgiebig verbundenen Teilquerschnitten. Wie bei der γ -Methode wird die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel bzw. bei BSP-Elementen die Nachgiebigkeit der Schubweichen Zwischenschichten (Querlagen) berücksichtigt. [7]

Für die Berechnung mit dem Schubanalogieverfahren wird gemäß Mestek [7] wie folgt vorgegangen:

- Transformation des Querschnitts in die ideellen Berechnungsquerschnitte der Ebenen A und B
- Eingabe und Schnittgrößenberechnung mittels Flächen-/Stabelementen in FEM-Programm, o.ä.
- Rücktransformation und Berechnung der Spannungen in den einzelnen Querschnitten des zusammengesetzten Querschnitts

Unter folgenden Voraussetzungen liefert das Verfahren der Schubanalogie gemäß [7] die exakte Lösung:

- Die Schwerpunkte der Teilquerschnitte liegen im verformten Zustand auf einer Linie (das ist für zwei bzw. dreiteilige Querschnitte stets erfüllt)
- Teilquerschnitte sind Schubstarr
- Verbundschichten bzw. Schubschichten besitzen keine Biegesteifigkeit
- Ausreichend genaue Diskretisierung des ideellen Systems vorhanden

Eine gute Näherung wird gemäß [7] unter den folgenden Bedingungen erreicht:

- Symmetrischer Querschnittsaufbau
- Konstante Schichtdicken der Einzelschichten
- Über die Höhe des Verbundquerschnittes gleichmäßig verteilte Fugensteifigkeit

Bei der Schubanalogie wird der Verbundquerschnitt in einen ideellen Berechnungsquerschnitt umgewandelt. Dieser ideale Querschnitt wird mit zwei Ebenen modelliert, deren Translationen gekoppelt sind. Die Ebene A enthält nur die Eigenanteile der Biegesteifigkeiten der Teilquerschnitte, wohingegen die Ebene B die Steiner-Anteile der Teilquerschnitte enthält. [7]

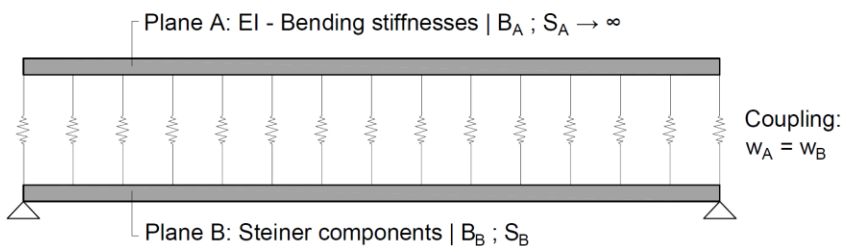


Abbildung 58: Schematische Systemskizze zum Schubanalogieverfahren

Die beiden Ebenen werden unterschiedlich modelliert. Während die Ebene A als Schubstarrer Bernoulli-Balken modelliert wird, wird die Ebene B als Schubweicher Timoschenko-Balken modelliert. Die Translationen der beiden Ebenen sind starr miteinander verbunden. [7]

Nach Mestek [7] lassen sich die Steifigkeitswerte der beiden Ebenen mit Hilfe der Gleichungen (AP6-17) bis (AP6-20) berechnen, wobei B_A die Biegesteifigkeit der Ebene A, S_A die Schubsteifigkeit der Ebene A, B_B die Biegesteifigkeit der Ebene B und S_B die Schubsteifigkeit der Ebene B ist. Die Ermittlung der Schubsteifigkeit ist in Abbildung 59 grafisch dargestellt. Zu sehen ist die Verschiebung aufgrund der Verformung der Verbindungsmittel und der Schubverformung der Schubweichen Schichten.

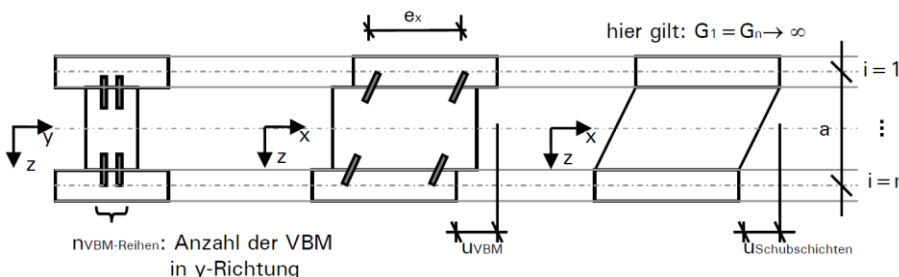


Abbildung 59: Ermittlung der Schubsteifigkeit der Ebene B [7]

Ebene A:

$$B_A = \sum E_i \cdot I_i \quad (\text{AP6-17})$$

$$S_A \rightarrow \infty \quad (\text{AP6-18})$$

Ebene B:

$$B_B = \sum E_i \cdot A_i \cdot z_{s,i}^2 \quad (\text{AP6-19})$$

Mit:

$z_{s,i}$ = Hebelarm zwischen dem Schwerpunkt der Schicht i und dem Gesamtschwerpunkt

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{a^2} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{e_x}{K_{x,i} \cdot n} + \frac{d_1}{2 \cdot b_1 \cdot G_{xz,1}} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{d_i}{b_i \cdot G_{xz,i}} + \frac{d_n}{2 \cdot b_n \cdot G_{xz,n}} \right\} \quad (\text{AP6-20})$$

Mit:

a = Hebelarm zwischen den Schwerpunkten der äußersten Schichten

n = Anzahl der Verbindungsmittelreihen nebeneinander

$K_{x,i}$ = Steifigkeit des Verbindungsmittels in der Schicht i

e_x = Abstand der Verbindungsmittel in x- Richtung

d_i = Dicke der Schicht i

b_i = Breite der Schicht i

$G_{xz,i}$ = Schubmodul der Schicht i in xz- Richtung

Die beiden Ebenen können sowohl als Stabelemente als auch als Flächenelemente modelliert werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die oben genannten Anforderungen, insbesondere hinsichtlich der Schubverformung, berücksichtigt werden müssen. Es wird empfohlen, die Ebenen mit Stabelementen zu modellieren. [7] Das gewählte statische System muss dem realen System entsprechen, wobei auch die Auflagerbedingungen realitätsnah berücksichtigt werden müssen. Abbildung 60 zeigt verschiedene Endlagerungen eines zweiteiligen Verbundquerschnittes und die Umsetzung im ideellen System nach Scholz [9].

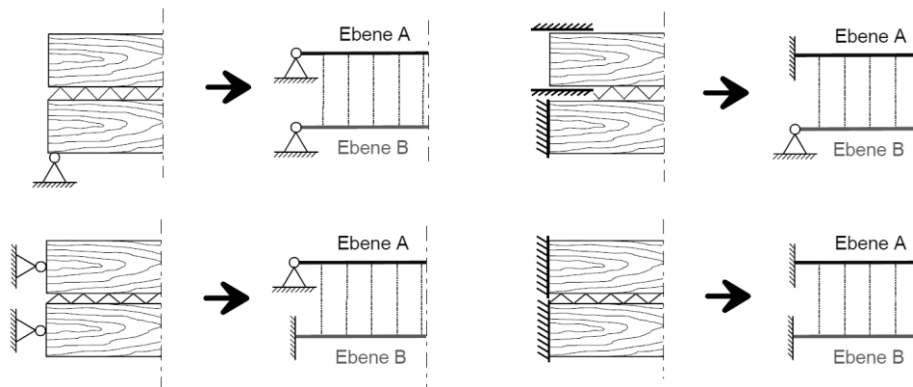


Abbildung 60: Endlagerungen eines zweiteiligen Verbundquerschnittes und die Umsetzung im ideellen System nach Scholz [9]

Nach erfolgreicher Berechnung können die aus der Berechnung resultierenden Biegemomente und Querkräfte der Ebenen A und B zu Spannungen in den Teilquerschnitten rückgerechnet werden. Wie schon oben bei der Steifigkeitsermittlung beschrieben wurde, repräsentiert die Ebene A nur das Tragverhalten der Eigenanteile der einzelnen Schichten. Das Tragverhalten der Ebene A ist somit gleichbedeutend einem Querschnitt ohne Verbund der einzelnen Teilquerschnitte. Ebene B beschreibt hingegen das Zusammenwirken der Schichten, weshalb das Biegemoment in Ebene B zu Normalkräften und damit konstanten Spannungen in den Teilquerschnitten führt. Vergleichbar ist dies mit einem Fachwerkträger, bei dem sich das Moment zu Zug und Druckkräften in dem Ober- bzw. Untergurt ergibt. Aus dem horizontalen Gleichgewicht können die Schubspannungen aus der Integration der Änderung der Normalkraft über die Querschnittshöhe berechnet werden. Folglich resultieren aus der Ebene A parabelförmige Schubspannungsverteilungen in den einzelnen Teilquerschnitten, wohingegen die Querkraft der Ebene B zu linearen Schubspannungsverteilungen führt. Abbildung 61 zeigt die qualitative Spannungsverteilung an einem zusammengesetzten Querschnitt mit drei nachgiebig verbundenen Teilquerschnitten. [7]

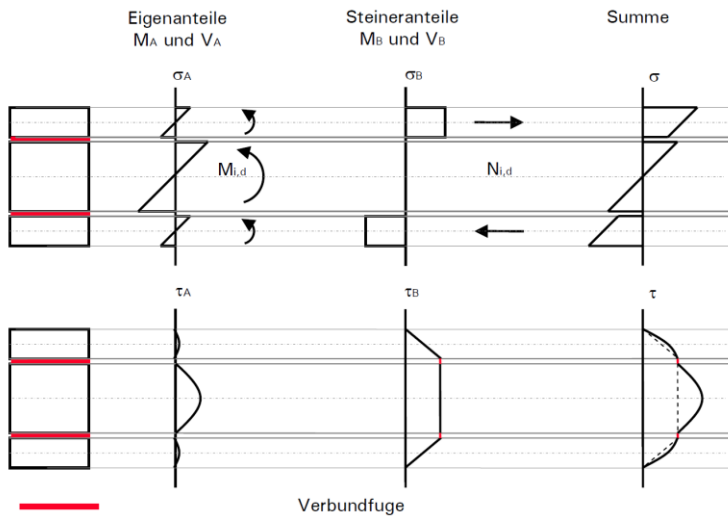


Abbildung 61: Qualitative Spannungsverteilung an einem zusammengesetzten Querschnitt mit drei nachgiebig verbundenen Teilquerschnitten [7]

Die Längsspannungen können gemäß Mestek [7] mit der Gleichung (AP6-21) für die Ebene A sowie mit der Gleichung (AP6-22) für die Ebene B berechnet werden. Mit Gleichung (AP6-23) können die aus den beiden Ebenen resultierenden Längsspannungen zur Ermittlung der gesamt wirkenden Längsspannung addiert werden.

$$\sigma_{A,i} = \pm \frac{M_A}{B_A} \cdot E_i \cdot z_i \quad (\text{AP6-21})$$

$$\sigma_{B,i} = \pm \frac{M_B}{B_B} \cdot E_i \cdot z_{s,i} \quad (\text{AP6-22})$$

$$\sigma_i = \sigma_{A,i} + \sigma_{B,i} \quad (\text{AP6-23})$$

Mit:

$\sigma_A, \sigma_B =$ Längsspannungen des Teilquerschnittes i der Ebenen A und B

$M_A, M_B =$ Biegemomente der Ebenen A und B

$B_A, B_B =$ Biegesteifigkeiten der Ebenen A und B

$$-\frac{d_i}{2} \leq z_i \leq \frac{d_i}{2}$$

$z_{s,i} =$ Schwerpunktabstand der einzelnen Lagen zum Gesamtschwerpunkt

Die Ermittlung des Schubflusses in den Teilquerschnitten kann nach [7] mit Gleichung (AP6-24) für Ebene A und mit Gleichung (AP6-25) für Ebene B berechnet werden. Um anschließend die Schubspannung zu ermitteln, muss der Schubfluss durch die entsprechende Querschnittsbreite dividiert werden.

$$t_i^A(z_i) = -V_A \cdot \frac{E_i}{B_A} \cdot \left(\frac{z_i^2}{2} - \frac{d_i^2}{8} \right) \quad (\text{AP6-24})$$

$$t_i^B(z_{s,i}, z_i) = -V_B \cdot \frac{E_i}{B_B} \cdot z_{s,i} \cdot \left(z_i + \frac{d_i}{2} \right) + t_i^0 \quad (\text{AP6-25})$$

Mit:

$t_i^A, t_i^B =$ Schubfluss der Schicht i der Ebenen A und B

$V_A, V_B =$ Querkraft der Ebenen A und B

$t_i^0 =$ Startwert für den Schubfluss für den betrachteten Teilquerschnitt

$$-\frac{d_i}{2} \leq z_i \leq \frac{d_i}{2}$$

$z_{s,i} =$ Schwerpunktabstand der einzelnen Lagen zum Gesamtschwerpunkt

Erweitertes Verfahren der Schubanalogie für überwiegend normalkraftbeanspruchte Strukturen

Treten überwiegend Normalkräfte in der Fläche auf, sodass Stabilitätsprobleme zu erwarten sind, kann unter Hinzunahme einer dritte Ebene C ein kombiniertes Fachwerkmodell verwendet werden. Das Modell ist in Abbildung 62 gezeigt. Die Ebene C dient ausschließlich zur Aufnahme von Normalkräften, weshalb dieser Ebene die entsprechenden Dehnsteifigkeiten des zu untersuchenden Systems zugewiesen werden. Nähere Informationen hierzu sind in [9] gegeben.

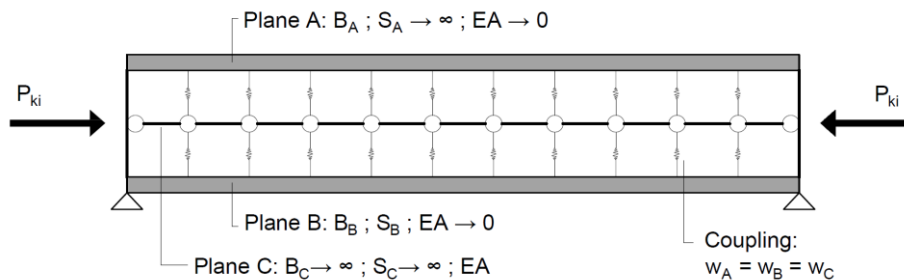


Abbildung 62: Modell mit 3 Ebenen nach [9] zur Berücksichtigung von Normalkräften

Zusammenfassung

Mit dieser Methode und der Finite-Elemente-Methode, für die es zahlreiche Programme gibt, kann ein Verbundquerschnitt einfach berechnet werden. Ein Nachteil der Schubanalogie ist jedoch, dass zur Berechnung der Schnittgrößen z.B. ein FEM-Programm oder andere zusätzliche Software benötigt wird. Der Vorteil ist, dass jeder beliebige Verbundquerschnitt mit dieser Methode berechnet werden kann.

2.1.4 Starrer Verbund

Beim starren Verbund wird die Schubnachgiebigkeit der Schichten vernachlässigt, womit die Schubsteifigkeit überschätzt wird. Die Berechnung mit diesem Verfahren ist daher nur erlaubt, wenn das in Gleichung (AP6-26) angegebene Verhältnis von Spannweite zu Querschnittshöhe eingehalten ist. [7]

$$\frac{l_{ef}}{d_{BSP}} > 20 \quad (\text{AP6-26})$$

Mit:

l_{ef} = Effektive Spannweite

d_{BSP} = Höhe des zusammengesetzten Querschnitts

Die Biegesteifigkeit in Richtung der Längslagen $B_{x,net}$ (x-Richtung) kann nach DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] mit Gleichung (AP6-27) berechnet werden, wobei n_x die Anzahl der Längslagen, d_i die Dicke der Schicht i , und $z_{s,i}$ der Abstand des Schwerpunktes der Schicht i zum Schwerpunkt des Gesamtquerschnittes ist.

$$B_{x,net} = \sum_{i=1}^{n_x} \left(E_{x,i} \cdot \left(\frac{d_i^3}{12} + d_i \cdot z_{s,i}^2 \right) \right) \quad (\text{AP6-27})$$

Die Berechnung der Biegesteifigkeit in Richtung der Querlagen kann analog erfolgen. Die transversale Schubsteifigkeit S_{xz} , S_{yz} wird zu unendlich angenommen.

$$S_{xz} = S_{yz} = \infty \quad (\text{AP6-28})$$

2.1.5 Vergleich und Zusammenfassung der Modellierungsansätze

Die oben gezeigten Methoden weisen wesentliche Unterschiede auf, welche in Tabelle 23 hervorgehoben sind. Während bei der γ -Methode und dem Schubanalogieverfahren die Nachgiebigkeit der Querlagen berücksichtigt wird, wird diese bei der Berechnung mit dem starren Verbund vernachlässigt, was zu einer Überschätzung der transversalen Schubsteifigkeit führt. Auch bei der Anforderung an den Querschnitt sind die Verfahren unterschiedlich. Bei dem Schubanalogieverfahren können beliebig zusammengesetzte Querschnitte berechnet werden. Bei dem einfachen γ -Verfahren nach Eurocode 5 darf der Querschnitt nur aus maximal drei Teilquerschnitten bestehen. Weitere Unterschiede finden sich bei der Lösungsfindung.

Während bei der γ -Methode und dem starren Verbund die Lösung per Handrechnung möglich ist, muss bei der Schubanalogie z.B. ein FEM-Programm zu Hilfe genommen werden, um die gesuchte Lösung zu erhalten.

Tabelle 23: Vergleich der einfachen Modellierungsansätze

	γ - Methode	Schubanalogie	Starrer Verbund
Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Querlagen	Ja	Ja	Nein
Beliebige Querschnitte	Nein	Ja	Nein
Stabwerksprogramm / FEM- Berechnung notwendig	Nein	Ja	Nein
Annahmen die für eine „exakte“ Lösung eingehalten werden müssen	Ja	Ja	-

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass alle oben genannten einfachen und gängigen Modellierungsansätze ihre Berechtigung haben. Mit ihnen lässt sich BSP schnell und qualitativ hochwertig berechnen. Problematisch wird es, wenn komplexere Bauteile, mit Öffnungen oder anderen Diskontinuitäten berechnet werden sollen. Hier stoßen die einfachen Modellierungsmethoden aufgrund der engen Randbedingungen schnell an ihre Grenzen.

2.2 Einführung in die Bemessung von Brettsperrholz

2.2.1 Allgemeines

Bei der Bemessung von BSP müssen sowohl der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT, engl. ULS) als auch der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG, engl. SLS) berücksichtigt werden. Dabei wird das Nachweisverfahren angewendet, das im Wesentlichen in DIN EN 1990:2010-12 [11] geregelt ist. Das Nachweisverfahren in den derzeit gültigen Normen basiert auf dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept, das besagt, dass eine Einwirkung mit einem Sicherheitsfaktor, auch Bemessungswert der Einwirkung E_d genannt, mit einem Widerstand mit einem Sicherheitsfaktor, auch Bemessungswert des Widerstandes R_d genannt, verglichen wird. Um eine ausreichende Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit zu erreichen, muss die Gleichung (AP6-29) erfüllt sein.

$$E_d \leq R_d \quad (\text{AP6-29})$$

2.2.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT, ULS)

Der GZT wird, wie der Name schon sagt, verwendet, um die maximal mögliche Einwirkung mit der geringsten Tragfähigkeit zu vergleichen, um die Standsicherheit des Bauwerks zu überprüfen. Wie bereits erwähnt, werden Sicherheitsfaktoren sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite angewandt, um eine mögliche Überlastung oder mögliche Schäden oder Mängel an der Gebäudestruktur zu berücksichtigen.

Die Sicherheitsfaktoren auf der Einwirkungsseite sind in der DIN EN 1990:2010-12 [11] geregelt und hängen von der Art der Belastung, ihrer Kombination und anderen Aspekten ab. Darauf soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Die Sicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite sind in Tabelle NA.2 in DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] geregelt und liegen für BSP in Deutschland im GZT bei:

$$\gamma_M = \begin{cases} 1.0 & \text{für außergewöhnliche Bemessungssituationen (z.B. Brand)} \\ 1.3 & \text{für ständige und vorübergehende Einwirkungen} \end{cases} \quad (\text{AP6-30})$$

Darüber hinaus sind im Holzbau auf der Widerstandsseite die Nutzungsklasse (siehe Abschnitt 2.3.1.3 von [2]), d.h. die Einwirkung von Feuchtigkeit auf das Bauteil, sowie die Lasteinwirkungsdauer (siehe Tabelle NA.1 von DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10]) zu berücksichtigen, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit des Holzes haben. Beide Einflüsse werden mit dem k_{mod} -Wert (siehe Tabelle NA.4 von DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10]) zusammengefasst.

Die Festigkeitswerte von Holzwerkstoffen können dann allgemein mit der Gleichung (AP6-31) berechnet werden, wobei f_d der Bemessungswert der Festigkeit, k_{mod} der zuvor erwähnte Modifikationswert und f_k die charakteristische Festigkeit des Materials ist.

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (\text{AP6-31})$$

BSP muss je nach System und Belastung die folgenden Querschnittsnachweise einzeln oder kombiniert erfüllen:

- Zug oder Druck
- Biegung
- Schub
- Verdrehung

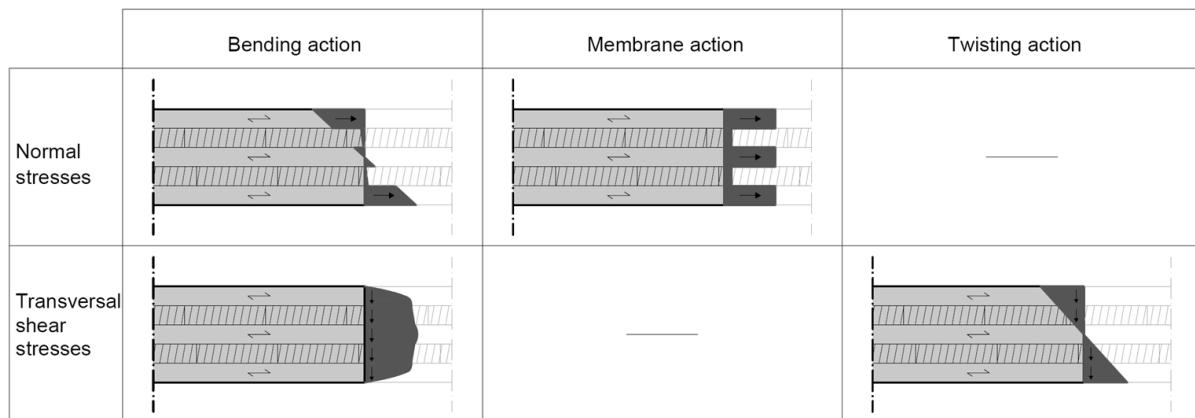


Abbildung 63: Spannungsverteilung über die Querschnittshöhe bei BSP

Abbildung 63 zeigt die unterschiedlichen Spannungsverteilungen über die Dicke des BSP-Querschnitts in einer Richtung. Diese unterschiedlichen Spannungen und ihre unterschiedlichen Verteilungen führen zu unterschiedlichen Nachweisverfahren, die oben aufgeführt und im Folgenden kurz ausgearbeitet werden.

Scheibenbeanspruchung

Für Zug oder Druck dürfen die Normalspannungen $\sigma_{\beta,\alpha,d}$ mit Gleichung (NA.23 / NA.25) der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] berechnet werden. Dabei ist $E_{\alpha,i}$ der Elastizitätsmodul der Schicht i in α -Richtung, $n_{\beta,\alpha,d}$ die Normalkraft in α -Richtung und $D_{\beta,\alpha}$ die axiale Steifigkeit des Verbundquerschnitts.

$$\sigma_{\beta,\alpha,d} = E_{\alpha,i} \cdot \frac{n_{\beta,\alpha,d}}{D_{\beta,\alpha}} \quad (\text{AP6-32})$$

Mit:

$$\alpha = \{x; y\}$$

$$\beta = \{c = \text{compression}; t = \text{tension}\}$$

$$D_{\beta,\alpha} = \sum E_{\alpha,i} \cdot d_i$$

$$E_{\alpha,i} = \frac{E_{mean}}{\gamma_M}$$

Die Schubspannungen einer membranbelasteten Scheibe können nach Gleichung (NA.27 / NA.29) der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] berechnet werden, wobei $\tau_{xy,i}$ die Schubspannung der Schicht i , $G_{xy,i}$ der Schubmodul der Schicht i in der Ebene, n_{xy} die Schubkraft in der xy -Ebene und D_{xy} die Schubsteifigkeit des gesamten Querschnitts ist. Sind die einzelnen Lamellen in den Schichten auf der Schmalseite miteinander verklebt, gilt $xy = yx$, ansonsten gilt $xy \neq yx$ und beide Richtungen müssen getrennt betrachtet werden.

$$\sigma_{\beta,\alpha,d} = E_{\alpha,i} \cdot \frac{n_{\beta,\alpha,d}}{D_{\beta,\alpha}} \quad (\text{AP6-33})$$

Mit:

$$D_{xy} = \begin{cases} \sum G_{xy,i} \cdot d_i & \text{für Schichten mit Schmalseitenverklebung} \\ 0,25 \cdot \sum G_{xy,i} \cdot d_i & \text{für Schichten ohne Schmalseitenverklebung} \end{cases}$$

$$G_{xy,i} = \frac{G_{mean}}{\gamma_M}$$

Bei BSP ohne Schmalseitenverklebung treten in den verleimten Bereichen der verschiedenen Schichten bei Scheibenschubbeanspruchung Torsionsmomente auf. Diese Torsionsmomente müssen berücksichtigt werden und können pro Fuge mit Gleichung (NA.30) der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] berechnet werden, wobei M_ϕ das Torsionsmoment, e_x der Abstand der Lamellen in x -Richtung, e_y der Abstand der Lamellen in y -Richtung, n_{xy} die Querkraft in der xy -Ebene und n die Anzahl der Schichten ist.

$$M_\phi = \frac{e_x \cdot e_y \cdot n_{xy}}{n - 1} \quad (\text{AP6-34})$$

Die Torsionsspannung in den Kreuzungspunkten $\tau_{tor,d}$ kann gemäß [12] mit Gleichung (AP6-35) berechnet werden.

$$\tau_{tor,d} = \frac{M_{\phi,d}}{I_p} \cdot \frac{a}{2} \quad (\text{AP6-35})$$

Mit:

$$a = \max \begin{cases} e_x \\ e_y \end{cases}$$

$$I_p = \frac{e_x \cdot e_y^3}{12} + \frac{e_x^3 \cdot e_y}{12}$$

Biegung

Für die Berechnung der Normalspannungen aus Biegung im BSP-Querschnitt wird Gleichung (NA.7) der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] verwendet, wobei B_α die Biegesteifigkeit des gesamten Querschnitts, m_α das Biegemoment und \bar{z} der Abstand des betrachteten Punktes auf dem Querschnitt zum Schwerpunkt des Gesamtquerschnitts ist.

$$\sigma_{\alpha,i,d} = E_{\alpha,i} \cdot \frac{m_{\alpha,d}}{B_\alpha} \cdot \bar{z} \quad (\text{AP6-36})$$

Mit:

$$B_\alpha = \sum E_{\alpha,i} \cdot d_i \cdot z_i^2 + \sum E_{\alpha,i} \cdot \frac{d_i^3}{12}$$

$$\alpha = \{ x ; y \}$$

Die transversalen Schubspannungen können durch Gleichung (NA.13 / NA.18) der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] definiert werden, wobei $\tau_{\alpha z}$ die transversale Schubspannung, E der Elastizitätsmodul, S_α die Schubsteifigkeit, B_α die Biegesteifigkeit, q_α die Querkraft und α die Richtung ist.

$$\tau_{\alpha z} = \frac{E \cdot S_\alpha}{B_\alpha} \cdot q_\alpha \quad (\text{AP6-37})$$

Mit:

$$E \cdot S_\alpha = \int_z^{d/2} E_\alpha \cdot \bar{z} \cdot d\bar{z}$$

$$\alpha = \{ x ; y \}$$

Da Holz ein anisotropisches Material ist, ist es für BSP entscheidend, die unterschiedliche Schubfestigkeit der verschiedenen Schichten in den verschiedenen Richtungen zu berücksichtigen. Beim Nachweisverfahren in Gleichung (AP6-38), das sich mit den Schubspannungen befasst, werden die verschiedenen Richtungen der Schichten mit der Schubfestigkeit $f_{v,d}$ parallel zur Faserrichtung und der Rollschubfestigkeit $f_{r,d}$ senkrecht zur Faserrichtung berücksichtigt.

$$\tau_{az,d} \leq \min \begin{cases} f_{v,d} \\ f_{r,d} \end{cases} \quad (\text{AP6-38})$$

Verdrillung

Die Verdrillung führt zu einer Schubspannung $\tau_{xy,i}$, die nach Gleichung (NA.11) der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] berechnet werden kann, wobei $G_{xy,i}$ der Schubmodul der Schicht i in der Ebene, m_{xy} das Torsionsmoment, B_{xy} die Torsionssteifigkeit des Gesamtquerschnitts und \bar{z}_i der Abstand des Schichtschwerpunkts zu dem des Gesamtquerschnitts ist. Es ist zu unterscheiden zwischen BSP mit und ohne Schmalseitenverklebung.

$$\tau_{xy,i} = \tau_{yx,i} = G_{xy,i} \cdot \frac{m_{xy}}{B_{xy}} \cdot \bar{z}_i \quad (\text{AP6-39})$$

Mit:

$$B_{xy} = \begin{cases} 0 & \text{für Schichten ohne Schmalseitenverklebung} \\ \sum 2 \cdot G_{xy,i} \cdot d_i \cdot z_i^2 + \sum G_{xy,i} \cdot \frac{d_i^3}{6} & \text{für Schichten mit Schmalseitenverklebung} \end{cases}$$

2.2.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG, SLS)

Im GZG werden Nachweise geführt, um die uneingeschränkte Nutzung des Bauwerks zu gewährleisten. Dabei werden sowohl Verformungen als auch Schwingungen unter der charakteristischen und quasi-ständigen Belastungssituation geprüft.

Verformung

Die Verformungsberechnung hat das Ziel, sowohl optische Beeinträchtigungen als auch Schäden am Bauwerk zu vermeiden. Beide Ziele werden durch verschiedene Nachweise berücksichtigt.

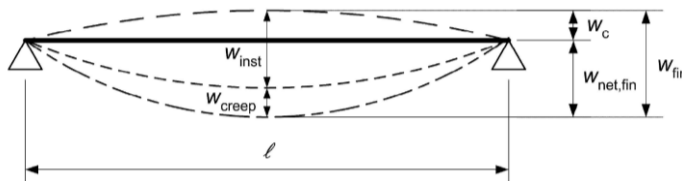


Abbildung 64: Verformungen nach EC 5 [2]

Abbildung 64 zeigt die verschiedenen Anteile der Verformung mit $w_{net,fin}$ als Enddurchhang, w_{fin} als Endverformung, w_{creep} als Verformung durch Kriechen, w_{inst} als Anfangsverformung und w_c als Überhöhung.

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit müssen die folgenden Gleichungen nach DIN EN 1995-1-1 [2] und DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] erfüllt sein. Während die Gleichungen (AP6-40) und (AP6-41) zur Vermeidung von Schäden am Bauwerk verwendet werden, wird die Gleichung (AP6-42) zur Vermeidung von visuellen Beeinträchtigungen mit den Definitionen aus Abbildung 64 und ψ als Kombinationsfaktor nach DIN EN 1990:2010-12 [11] verwendet.

$$w_{inst} = w_{inst,G} + w_{inst,Q,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot w_{inst,Q,i} \quad (\text{AP6-40})$$

$$w_{inst} = w_{inst,G} + w_{inst,Q,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot w_{inst,Q,i} \quad (\text{AP6-41})$$

$$w_{net,fin} = \left(w_{inst,G} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot w_{inst,Q,i} \right) \cdot (1 + k_{def}) - w_c \quad (\text{AP6-42})$$

Der k_{def} -Wert berücksichtigt das Kriechverhalten der verschiedenen Holzwerkstoffe. Für BSP ist er in Tabelle NA.5 der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10] angegeben. In dem PT- Draft [4] ist der k_{def} -Wert höher angesetzt als in der DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12.

$$k_{def} = \begin{cases} 0.60 & \text{für Nutzungsklasse 1} \\ 0.80 & \text{für Nutzungsklasse 2} \end{cases} \text{ aus DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 [10]}$$

(AP6-43)

$$k_{def} = \begin{cases} 0.80 & \text{für Nutzungsklasse 1} \\ 1.00 & \text{für Nutzungsklasse 2} \end{cases} \text{ aus CEN/TC 250/SC 5/PT 5: SC5.T1 [4]}$$

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit müssen die berechneten Verformungen geringer sein als die vorgeschriebenen. Die vorgeschriebenen Verformungen können aus den in der Norm angegebenen Beispielen ausgewählt oder entsprechend den spezifischen Projektanforderungen gewählt werden. Eine Besonderheit bei BSP ist die Schubnachgiebigkeit des Querschnittes, weshalb die Schubverformung einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtverformung leisten kann.

Schwingung

Für den Schwingungsnachweis müssen im Wesentlichen drei Kriterien geprüft werden:

- Eigenfrequenz
- Überprüfung der anfänglichen vertikalen Auslenkung
- Überprüfung der Einheitsimpulsgeschwindigkeitsantwort

In verschiedenen Regelwerken finden sich unterschiedliche Vorgehensweisen, wie der Schwingungsnachweis durchgeführt werden kann. Beispiele sind das Verfahren nach DIN EN 1995-1-1 [2] (siehe Abbildung 65) und das Verfahren nach Hamm und Richter in [13] (siehe Abbildung 66). Letzteres wurde aus einem Forschungsprojekt an der Technischen Universität München abgeleitet, in welchem Bemessungsregeln für die Schwingungsanalyse von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken erarbeitet wurden. Das Vorgehen nach Hamm und Richter ist in den österreichischen Nationalen Anhang mitaufgenommen worden.

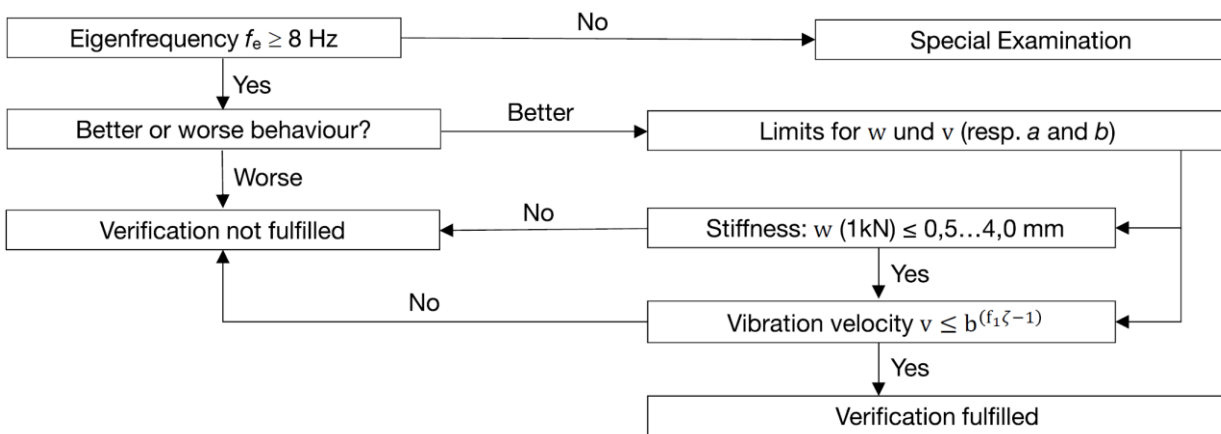


Abbildung 65: Vorgehen Schwingungsnachweis nach [2]

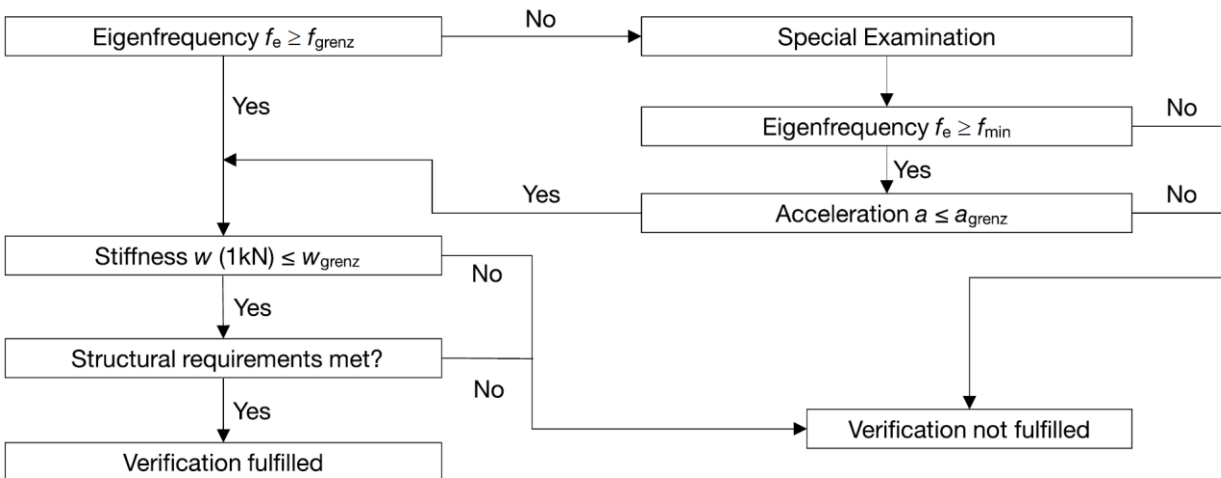


Abbildung 66: Vorgehen Schwingungsnachweis nach [13]

3. Stand des Wissens in der Praxis

3.1 Digitaler Fragebogen

3.1.1 Methodik und Überblick

Der Kenntnisstand der in der Praxis tätigen Ingenieure in der Brettsperrholzmodellierung und -bemessung wurde im Zeitraum von 13. Januar 2020 bis zum 15. August 2020 mit Hilfe einer webbasierten Umfrage evaluiert. Der Fragebogen wurde mit der Applikation *Google Forms* erstellt. Über die Projektpartner sowie durch am Projekt beteiligte Forschungs- und Industrieverbände wurde das Dokument digital weltweit verteilt. Ziel des Fragebogens war es, offene Problem- und Forschungsfelder der Bemessung mehrgeschossiger Brettsperrholzgebäude zu ergründen.

Die Umfrage ergänzt damit die Ergebnisse von Espinoza et. al. [14]. Die Autoren priorisierten anhand von sechs qualitativen und quantitativen Fragen im Rahmen der COST Action FP1402 [1] folgende Forschungsfelder für die Weiterentwicklung des Bauens mit Brettsperrholz (Priorität absteigend): (i) Tragfähigkeit und Verbindungsmittel, (ii) Feuchteverhalten, (iii) Nachhaltigkeit, (iv) thermische Leistungsfähigkeit, (v) Schallschutz und (vi) generelle Erforschung der Absatzmärkte. [14]

Aufbauend auf diesem Ergebnis, wurde im Rahmen von *InnoCrossLam* zu (i) mit quantitativen Methoden der empirischen Sozialforschung [15] ein standardisierter Fragebogen mit 48 Fragen erstellt [16], siehe Anhang AP6.

Die Fragen sind in folgende Kategorien unterteilt:

- Generelle Expertise der Teilnehmer (siehe Kapitel IV.3.1.2)
- Generelle und erweiterte Modellierung und Bemessung von Brettsperrholz (siehe Kapitel IV.3.1.3)
- Modellierung von Verbindungen (siehe Kapitel IV.3.1.4)
- Erdbebenbemessung von Brettsperrholzbauwerken (siehe Kapitel IV.3.1.5)

Zum Stichtag ging eine Stichprobe von 141 Teilnahmen aus über 20 Ländern ein. Die Auswertung erfolgte mit dem Programm *Microsoft Excel*. In einigen Fällen wurde die Möglichkeit offener Antworten gegeben. Solch offene Freitext-Antworten wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit an der Technischen Universität München [17] manuell kategorisiert und ausgewertet.

Da keine Untersuchung zur Grundgesamtheit der Praxis tätigen Ingenieure bekannt ist und es sich um eine nicht-probabilistische Stichprobe (Wahrscheinlichkeit der Elemente unbekannt) handelt, können die Ergebnisse der Studie prinzipiell nicht verallgemeinert werden. Die Antworten der Befragten können zudem soziologische Verzerrungen widerspiegeln: so ordnen bspw. Teilnehmer aus seismisch inaktiven Zonen möglicherweise die Erdbebenbemessung eher als ausreichend erforscht ein. [15]

Die Auswertung der Umfrage ist in Teilen in [18] und [19] veröffentlicht worden. Die Ergebnisse werden im Folgenden aufgegriffen, vorgestellt und diskutiert. Da der Fragebogen und die Veröffentlichungen in Englischer Sprache verfasst wurden, sind Abbildungen und Tabellen ebenfalls auf Englisch gehalten.

3.1.2 Information zu den Teilnehmern

Der Fragebogen wurde weltweit digital an diejenigen verteilt, die konstruktiv mit dem Material zu tun haben könnten, also BSP-Hersteller, Zulieferer, Ingenieure in der Bauausführung und -überwachung, Tragwerksplaner und Forschungsinstitute. Wie in Abbildung 67 dargestellt, wurde ein wesentlicher Teil (~30 %) der Antworten aus dem mitteleuropäischen Kerngebiet der globalen Brettsperrholzindustrie (Deutschland, Österreich und Schweiz) gegeben. Die Umfrage beleuchtet zunächst den beruflichen Hintergrund der Teilnehmer, siehe Tabelle 24 bis Tabelle 27. Im Allgemeinen verfügen die meisten der Befragten über langjährige Berufserfahrung in großen Unternehmen, deren Schwerpunkt in der Holzindustrie liegt.

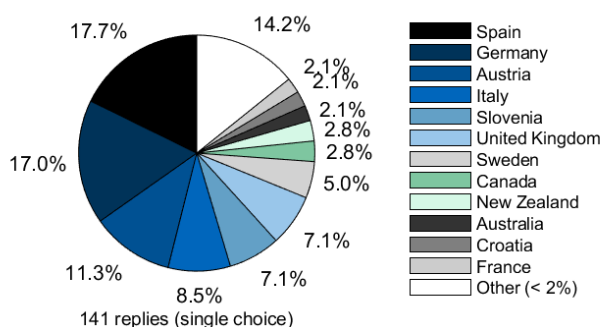


Abbildung 67: Nationalität der Teilnehmer [17]

Tabelle 24: Berufsgruppe der Teilnehmer [19]









Design company	Construction company	Supplier / Manufacturer	Researcher at company	University / Research institute	Software developer	Other
						
47.4 %	20.8 %	4.0 %	5.2 %	18.5 %	1.2 %	2.9 %

Tabelle 25: Arbeitserfahrung der Teilnehmer [19]

<3 years	3 to 10 years	11 to 20 years	>20 years
			
13.5 %	34.0 %	34.8 %	17.7 %

Mehr als 70 % der Befragten sind in der Praxis tätig (Tabelle 24) und arbeiten entweder in einem Planungsbüro (47.4 %), oder in einem Bauunternehmen (20.8 %). Ein vergleichbar hoher Prozentsatz entfiel auf auch Ingenieure in Forschungsinstituten (18.5 %). In Bezug auf die Berufserfahrung, siehe Tabelle 25, stellen diejenigen, die 11 Jahre und mehr gearbeitet haben, die Mehrheit dar (52.5 %), während nur 13.5 % der Befragten aus einem begrenzten Erfahrungsschatz schöpfen, d.h. weniger als 3 Jahre arbeiteten. Mehr als die Hälfte (53.2 %) der Teilnehmer arbeiten in Unternehmen mit mehr als 30 Beschäftigten, während weniger als ein Drittel in kleinen Unternehmen mit einer Größe von 10 oder weniger Beschäftigten arbeitet (siehe Tabelle 26). Der berufliche Hintergrund der Teilnehmer lässt grundsätzlich auf eine kompetente Stichprobe schließen und erhöht das Vertrauen in die Validität der Umfrageergebnisse.

48.3 % der Befragten geben an, dass mehr als 70 % des Auftragsvolumens in ihren Herkunftsunternehmen aus Holzkonstruktionen besteht (siehe Tabelle 27). Bei fast einem Viertel von ihnen, nämlich 21.3 %, macht der Holzbau allerdings weniger als 10 % des Auftragsvolumens aus. Der Anteil an Aufträgen mit BSP-Konstruktionen ist in den meisten Unternehmen recht gering: 44 % gaben an, dass BSP bei weniger als einem Zehntel aller Unternehmensprojekte verwendet wird. Wenn man darüber hinaus berücksichtigt, dass der Anteil an Aufträgen in Brettsperrholzbauweise bei 27% der Befragten zwischen 10 % und 40 % liegt, machen Brettsperrholzkonstruktionen in 70 % der Fälle weniger als die Hälfte des aktuellen Auftragsvolumens aus. Etwa die Hälfte der Befragten gab an, dass mehr als 70 % ihres Auftragsvolumens auf den Holzbau entfallen (siehe Tabelle 28), aber nur 13.5 % der Unternehmen bedienen mehr als 70 % ihrer Aufträge in Brettsperrholz. Dies alles könnte ein Hinweis darauf sein, dass sich das Wissen über das Bauen mit Brettsperrholz derzeit auf einige wenige spezialisierte Unternehmen konzentriert und damit nicht weit verbreitet ist.

Darüber hinaus wurden die Teilnehmer gefragt, welche Gebäudetypen sie bereits in Brettsperrholzbauweise geplant und gebaut hatten. Die meisten von ihnen, 70.2 %, verwendeten Brettsperrholz schon mal bei der Planung und dem Bau von Einfamilien- oder Doppelhäusern. Diese werden jedoch dicht gefolgt von Mehrfamilienhäusern, mehrstöckigen Gebäuden und öffentlichen Gebäuden, wie Tabelle 29 zu entnehmen ist.

Die Teilnehmer des Fragebogens wurden zudem gebeten, ihre Vertrautheit mit dem Produkt selbst einzuordnen, siehe Tabelle 30. Die meisten, nämlich 85 % der 141 befragten Ingenieure, gehen davon aus, dass sie mit Bauen in Brettsperrholz vertraut sind, auch wenn sich ihre Erfahrung in den meisten Fällen auf einige wenige Fälle beschränkt. Außerdem wurden die Teilnehmer gefragt, ob sie die bestehenden Bemessungskonzepte für ausreichend erachten. Tabelle 31 zeigt, dass niemand uneingeschränkt unzufrieden mit den zur Verfügung stehenden Mitteln ist. Allerdings halten nur 13.5 % die bestehenden Gestaltungskonzepte ohne Einschränkungen für ausreichend. Die Mehrheit der Meinungen, 86.5 %, liegt hier im mittleren Bewertungsbereich.

Tabelle 26: Anzahl der beschäftigten Personen im Unternehmen [19]





	<5	5 – 10	11 -30	>30
Number of employees				
Proportion	19.2 %	9.9 %	17.7 %	53.2 %

Tabelle 27: Projekte in Holzbauweise bezogen auf das gesamte Projektvolumen des Unternehmens [19]




	<10 %	10 % - 40 %	41 % - 70 %	>70 %
Percentage of timber structures				
Proportion	21.3 %	23.4 %	12.1 %	43.3 %

Tabelle 28: Projekte in Brettsperrholzbauweise bezogen auf das gesamte Projektvolumen des Unternehmens [19]





	<10 %	10 % - 40 %	41 % - 70 %	>70 %
Percentage of CLT structures				
Proportion	44.0 %	27.0 %	15.6 %	13.5 %

Tabelle 29: Von den Teilnehmern in Brettsperrholzbauweise ausgeführte Gebäudearten [19]






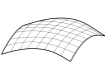
Type of CLT buildings	Single/double family houses	Apartment buildings (1-3 storeys)	Multi-storey buildings (4+ storeys)	Industry buildings	Public buildings/ buildings for assemblies	Special constructions
						
Proportion	70.2 %	62.4 %	60.3 %	36.2 %	59.6 %	28.3 %

Tabelle 30: Von den Teilnehmern eingeschätzte eigene Erfahrung mit Brettsperrholz-Konstruktionen [19]











Not familiar				Very familiar
				
0.7 %	1.4 %	10.6 %	34.0 %	53.2 %

Tabelle 31: Von den Teilnehmern bewertete Suffizienz aktueller Brettsperrholz-Bemessungskonzepte [19]

Not at all				Yes
				
0 %	9.2 %	38.3 %	39.0 %	13.5 %

Auf Basis der so evaluierten Teilnehmer-Profile wurden die Daten für die weitere Auswertung grundbereinigt, d.h. Teilnehmer, die nicht zur Zielgruppe üblicher Bemessungsnormen gehören („< 3 years“ in Tabelle 25 und „not familiar“ in Tabelle 30), wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Des Weiteren wurde

anhand der zuvor gewonnenen Erkenntnisse die drei Berufszweige „Tragwerksplanung“ (engl. „designer“), „Ausführung“ (engl. „constructor“) und „Forschung“ (engl. „researcher“) gefiltert (siehe Tabelle 24 und bspw. Tabelle 32). Aufgrund des oben aufgezeigten breiten Spektrums der Befragten lassen sich somit Rückschlüsse auf die Verwendung von Brettspertholz in der Baupraxis und damit verbundene Probleme und Herausforderungen ziehen.





3.1.3 Modellierung und Bemessung von Brettspertholz

Im weiteren Verlauf der Umfrage wurde der theoretischen Wissenstand der Teilnehmer zur Berechnung, Modellierung und Bemessung des Materials erforscht.

Eine von allen Teilnehmern gleichermaßen genutzte singuläre Berechnungsmethode scheint nicht zu existieren. Wie in Tabelle 33 Abbildung 68: Angewandte Materialtheorie [17]

Tabelle 33 zeigt, wird die γ -Methode am meisten zur Ermittlung der Schnittgrößen in den drei genannten Berufsfeldern Tragwerksplanung, Ausführung und Forschung – in Kombination – mit anderen Berechnungsmethoden angewandt (siehe Kapitel IV.2). Die darüberhinausgehende Verwendung alternativer Theorien scheint stark vom jeweiligen Berufsfeld abzuhängen: so wird die Schubanalogie beispielsweise vor allem von forschenden Teilnehmern genannt.

Tabelle 32: Querschnittsmodellierung von Brettspertholz [19]

Structural modelling of the material	Designer	Constructor	Researcher	Total
				
	[63 replies]	[33 replies]	[26 replies]	[141 replies]
Homogeneous cross-section with effective properties	49.2 %	39.4 %	57.7 %	42.6 %
Non-homogeneous cross-section with layer properties	46.0 %	51.5 %	53.8 %	43.3 %
I do not know	17.5 %	18.2 %	11.5 %	22.0 %

Bei der Modellierung des Querschnitts (siehe Tabelle 32) verteilen sich die Antworten der Befragten näherungsweise gleichermaßen auf die beiden gegebenen Möglichkeiten des realitätsnahen geschichteten Querschnitts und den abstrahierten effektive Eigenschaften eines homogenen Gesamtquerschnitts. Das dazu verwendete Materialgesetz ist Abbildung 68 dargestellt. Hier gaben zwei Drittel der Befragten an, die für Holz adäquaten orthotropen bzw. transversalisotropen Materialgesetze zu verwenden.

Obwohl in diesem Teil der Auswertung nur der als erfahren geltende Teilnehmeranteil berücksichtigt wurden (siehe oben), geben etwa 10 % - 20 % der Befragten an, nicht zu wissen wie das Material in den eigenen Berechnungen umgesetzt wird (siehe Abbildung 68, Tabelle 32 und Tabelle 33). Dieser Anteil sinkt in Tabelle 33 von ca. 20% der Tragwerksplaner, auf 15 % der Ausführenden und bis auf 12 % in der Gruppe der Forschenden. Dieses Gefälle könnte zum Teil darauf zurückzuführen sein, dass Brettspertholz als relativ junger Werkstoff bis vor kurzem noch nicht typischerweise Teil des Lehrplans an den Hochschulen und Universitäten war.

Weiterhin zeigt sich, dass der Anteil derjenigen, die auf eine Frage zum Berechnungshintergrund nicht beantworten können, umso größer ist, je materialspezifischer das Thema der gestellten Frage ist. In Abbildung 69 werden die erhaltenen Antworten zum verwendeten Wert der Querdehnzahl in Holz dargestellt. Fast die Hälfte der Befragten weiß nicht, ob und in welchem Maß Querdehnung in der eigenen Berechnung berücksichtigt wird. In einigen Anwendungsfällen, z. B. bei punktgestützten Decken oder auskragenden Elementen, hat die Torsionssteifigkeit des Materials einen großen Einfluss auf das Tragverhalten der Platte. Daher wurden die Teilnehmer gefragt, wie sie in der Regel die Torsionssteifigkeit in ihren Modellen berücksichtigen, wenn dies erforderlich ist (siehe Abbildung 69). Nur ein Viertel der Befragten bezieht diese Steifigkeit überhaupt in die Berechnungen mit ein.

Materialparameter für die Modellierung von Brettspertholz entnehmen die meisten Befragten der Produktnorm für Brettschichtholz (für die Einzellamelle) [20] oder Europäischen Technische Bewertungsdokumente (z.B. [22] basierend auf [23] für den Gesamtquerschnitt). Diese Dokumente können für das Produkt als normativ angesehen werden (blau hervorgehoben in Abbildung 71).

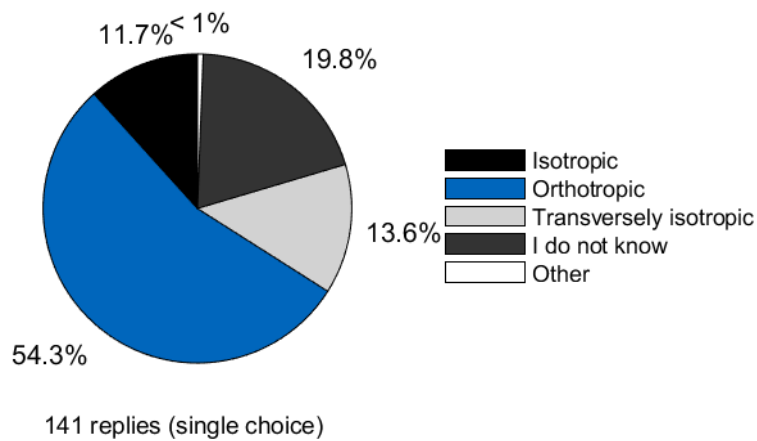






Abbildung 68: Angewandte Materialtheorie [17]

Tabelle 33: Verwendete Berechnungsmethoden für Brettsperrholz [19]

Structural modelling of plates in bending	Designer	Constructor	Researcher	Total
				
	[63 replies]	[33 replies]	[26 replies]	[141 replies]
γ-method	57.1 %	48.5 %	50.0 %	43.3 %
Shear analogy	39.7 %	27.3 %	42.3 %	27.0 %
Beam theory	27.0 %	39.4 %	26.9 %	20.6 %
Theory of plates	22.2 %	42.4 %	26.9 %	22.7 %
I do not know	19.0 %	15.2 %	11.5 %	27.0 %
Other	1.6 %	0.0 %	0.0 %	5.0 %

Auf die Frage nach der verwendeten Literatur für die Bemessung wurde von den Teilnehmern eine Vielzahl von Quellen genannt. Nur 23.9 % (in Abbildung 70 blau markiert) der angegebenen Quellen sind normative Regelwerke [2],[23],[24]. Brettsperrholz wurde, aufgrund der Markteinführung um die Jahrtausendwende, bei der Erstellung der aktuellen europäischen Bemessungsnorm [2] noch kaum berücksichtigt. In Ermangelung normativer Literatur verweisen die meisten Befragten nun daher auf einschlägige nationale Handbücher von Forschungsinstituten oder Verbänden zur Bemessung [8],[25]-[27].

Während also Materialparameter einheitlichen Quellen entnommen werden, scheinen für Bemessungskonzepte derzeit heterogene Quellen herangezogen zu werden.

Tabelle 34 zeigt die von den Befragten angegebenen, verwendeten Softwarelösungen und Programme. Die Frage in Multiple-Choice-Form gestellt, da in verschiedenen Entwurfsstadien oder auch Entwurfsituationen mehr als ein Programm Anwendung finden könnte. Die Befragten gaben an hauptsächlich praxisorientierte FEM-Software zu verwenden. Vor allem Tragwerksplaner und Ingenieure in ausführenden Firmen nutzen diese Produkte (jeweils rund 70 % der Befragten). Auch auf Brettsperrholz zugeschnittene Softwarelösungen und Herstellerprogramme werden von Ausführenden häufig genannt. Dies lässt sich unter anderem damit begründen, dass an der Umfrage teilnehmende Ingenieure in BSP-Herstellerfirmen in die Gruppe der „Constructor“ hinzugezählt wurden. Insgesamt nutzt die Hälfte aller Befragten kommerzielle Hilfsmittel in der Kombination mit selbst entwickelten Bemessungs-Tools. Die könnte ein Hinweis darauf sein, dass in erweiterten anspruchsvolleren Anwendungsfällen standardisierte Softwarelösungen fehlen. Offensichtlich gibt es keine einheitliche Best-Practice-Lösung. Jeder Befragte hat im Durchschnitt zwei bis drei Antworten auf die Frage der verwendeten Softwarelösung gegeben (siehe Tabelle 34). Eine ähnliche Schlussfolgerung lässt sich aus den Ergebnissen in Abbildung 72 ziehen, die sich auf die Zufriedenheit mit der vorhandenen Software bezieht.

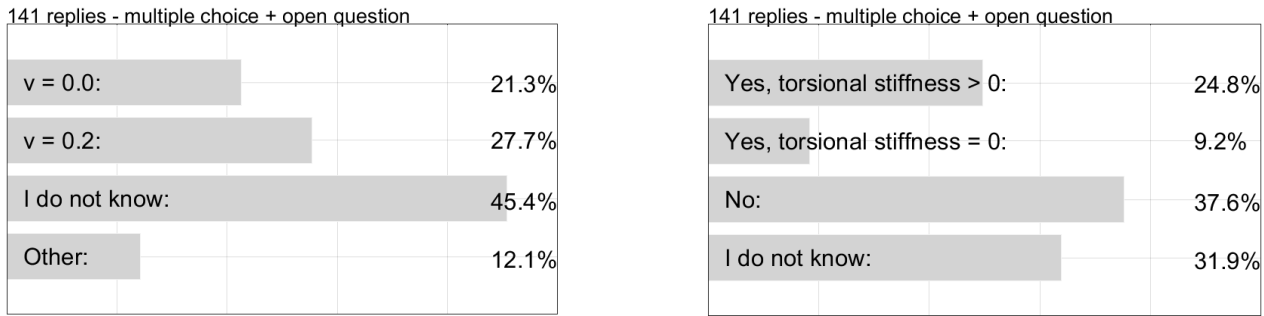


Abbildung 69: Verwendete Querdehnzahlen (links) und Ansatz der Torsionssteifigkeit (rechts) [19]

Auch hier ergibt sich ein recht heterogenes Bild, wobei sich keine Lösung eindeutig unter den Befragten durchsetzt. Die Zufriedenheit mit selbst entwickelten Hilfsmitteln ist am höchsten, dicht gefolgt von praxisorientierter FEM-Software, Softwareanwendungen die von den BSP-Herstellern angeboten wird und auf Brettsperrholz spezialisierter Software. FEM-Software mit fortgeschrittener Komplexität und höherer Einstellungstiefe wird vor allem in der Forschung verwendet. Die Zufriedenheit der Befragten mit solcher Software scheint am geringsten, wobei unklar bleibt ob dies bspw. an fehlender Benutzerfreundlichkeit oder an fehlenden Einstellungstiefe liegt. Wie in Abbildung 73 zu sehen ist, überprüfen 80.9 % der Teilnehmer die Resultate einer Softwareberechnung. Ungefähr die Hälfte der Befragten, 48.3 %, verwendet hierfür Handrechnungen, während ein Drittel die Prüfung durch eine Vergleichsrechnung in einem anderen Programm, vornimmt. In Übereinstimmung mit den in Abbildung 73 dargestellten Ergebnissen kann der in der Praxis typische Arbeitsablauf als eine softwarebasierte Berechnung beschrieben werden, die durch die Verifizierung einiger ausgewählter Ergebnisse ergänzt wird. In der aktuellen europäischen Norm für Tragwerksplaner, der EN 1995-1-1 [2] wird Brettsperrholz nicht explizit erwähnt. Wie in [29] beschrieben, werden die allgemeinen Bemessungsannahmen für Brettsperrholz in die zweiten Generation Norm aufgenommen. Ein Erscheinen des Dokuments wird für das Jahr 2026 erwartet. In der Praxis können jedoch möglicherweise Bemessungssituationen auf treten, die auch in der zukünftigen Norm nicht enthalten sein werden. Um zu erfragen, welche erweiterten Bemessungssituationen für die Praxis relevant sind, wurden im folgenden Abschnitt Fragen hierzu gestellt. Abbildung 74 illustriert schematisch einige dieser erweiterten Bemessungssituationen. Die Ergebnisse in Tabelle 35 zeigen die als von den Befragten als besonders anspruchsvoll angezeigte Bemessungssituationen. Es zeigt sich, dass Öffnungen in Wänden und Decken (18.4 % und 14.9 %) und Punktstützungen und konzentrierte Lasten (22.7 %) am häufigsten als besonders anspruchsvoll genannt werden. Die Hauptanliegen sind jedoch je nach Sektor sehr unterschiedlich. Während sich Ausführende und Forschende einig scheinen, dass Öffnungen in Wänden eine Herausforderung darstellen, machten sich Tragwerksplaner mehr Gedanken über Punktstützungen. Überraschenderweise war der zweitwichtigste Aspekt für die Forscher, die Auskragungen, für die Praktiker kaum von Belang (siehe Tabelle 35).

Auf die Frage, warum diese Bemessungssituationen als kritisch angesehen wurden, nannte die Mehrheit der Befragten das Fehlen von Entwurfskonzepten als Hauptgrund. Diese Position wird insgesamt von den einzelnen Berufsgruppen geteilt (in Tabelle 36).

Zusätzlich zu den bereits aufgeführten Bemessungssituationen sind in Abbildung 75 weitere kritische Themen aufgeführt. Verbindungen (siehe Kapitel IV.3.1.4), Schwingungsverhalten und Heißbemessungen (> 60° C) von Brettsperrholz werden hier am häufigsten genannt. Auch hier wird das Fehlen bestehender Auslegungsvorschriften als Ursache genannt.

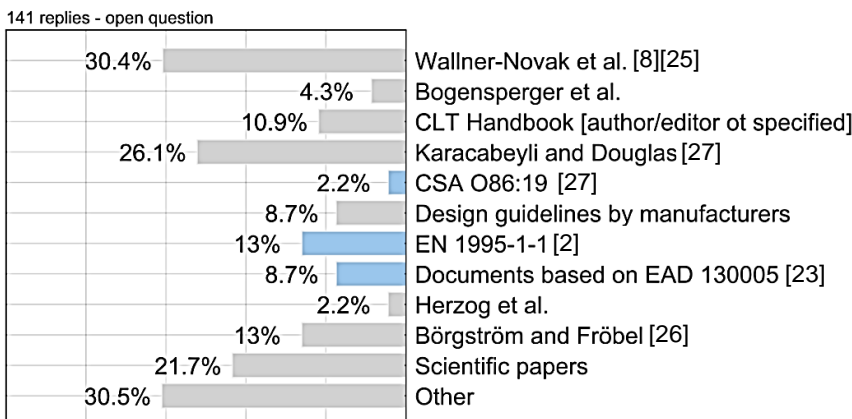


Abbildung 70: Quellen für angewandte Bemessungskonzepte [19]

141 replies - multiple choice + open question

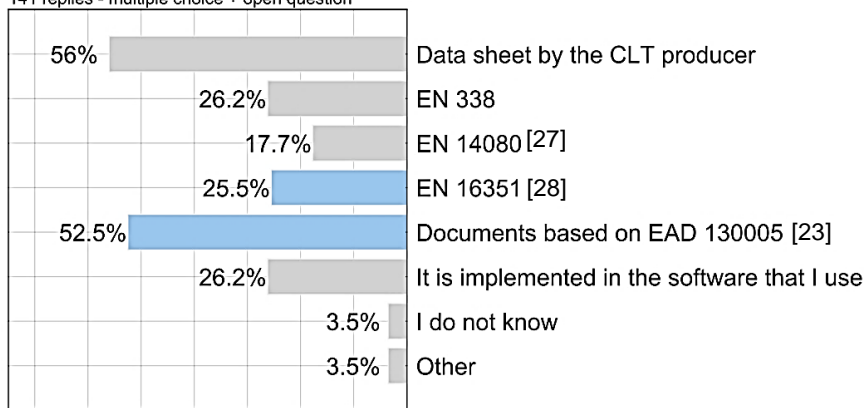






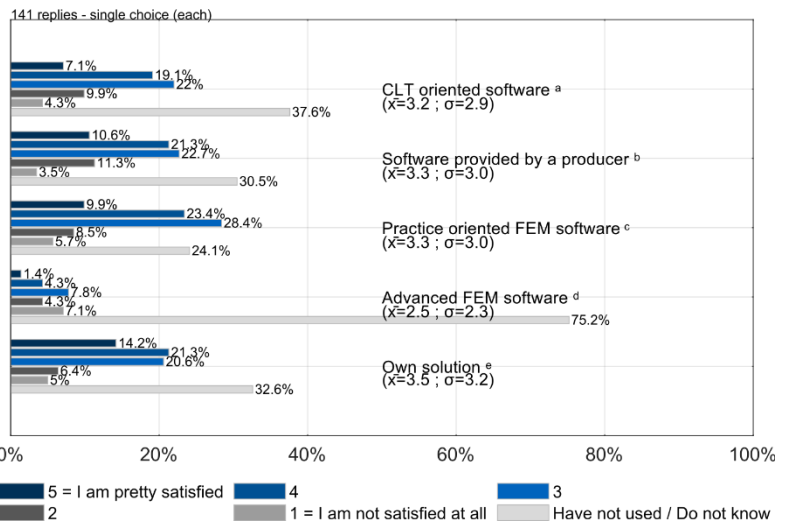
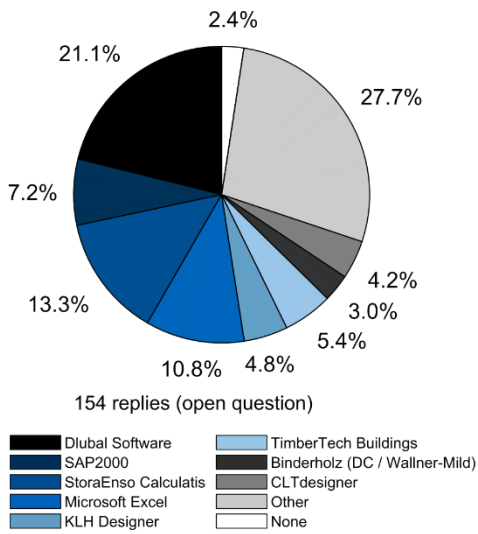
Abbildung 71: Quellen für die verwendeten Materialparameter [19]

Tabelle 34: Verwendete Software (kategorisiert) [19]

	Designer	Constructor	Researcher	Total
				
	[63 replies]	[33 replies]	[26 replies]	[141 replies]
By hand calculation	42.9 %	51.5 %	46.2 %	40.4 %
Software provided by a CLT producer ^a	50.8 %	72.7 %	46.2 %	50.4 %
CLT oriented software ^b	54.0 %	69.7 %	46.2 %	50.4 %
Practice oriented FEM software ^c	69.8 %	72.7 %	53.8 %	61.7 %
Advanced FEM software ^d	3.2 %	6.1 %	15.4 %	8.5 %
Own solutions ^e	42.9 %	57.6 %	46.2 %	49.6 %

Legend:

^a Binderholz, KLH-Designer, StoraEnso Calculatis, etc.^b CLTdesigner, TimberTech Buildings, etc.^c Dlubal Software, SAP2000, SOFiSTiK, etc.^d Abaqus, Ansys, etc.^e MatLab, Microsoft Excel, etc.



Legend:
^a CLTdesigner, TimberTech Buildings, etc.
^b Binderholz, KLHDesigner, StoraEnso Calculatis, etc.
^c Dlubal Software, SAP2000, SOFiSTiK, etc.
^d Abaqus, Ansys, etc.
^e MatLab, Microsoft Excel, etc.

Abbildung 72: Verwendete Software (links) und Zufriedenheit der Teilnehmer mit den Softwareanwendungen (rechts) [19]

Do you verify the output of your software?

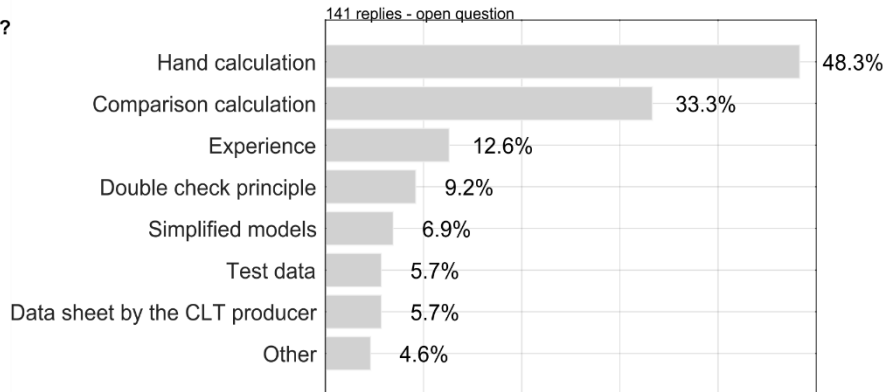
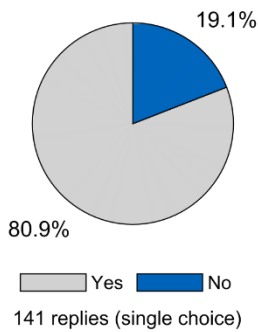


Abbildung 73: Überprüfung von Software-Ergebnissen (links) und Art der Überprüfung (rechts) [19]

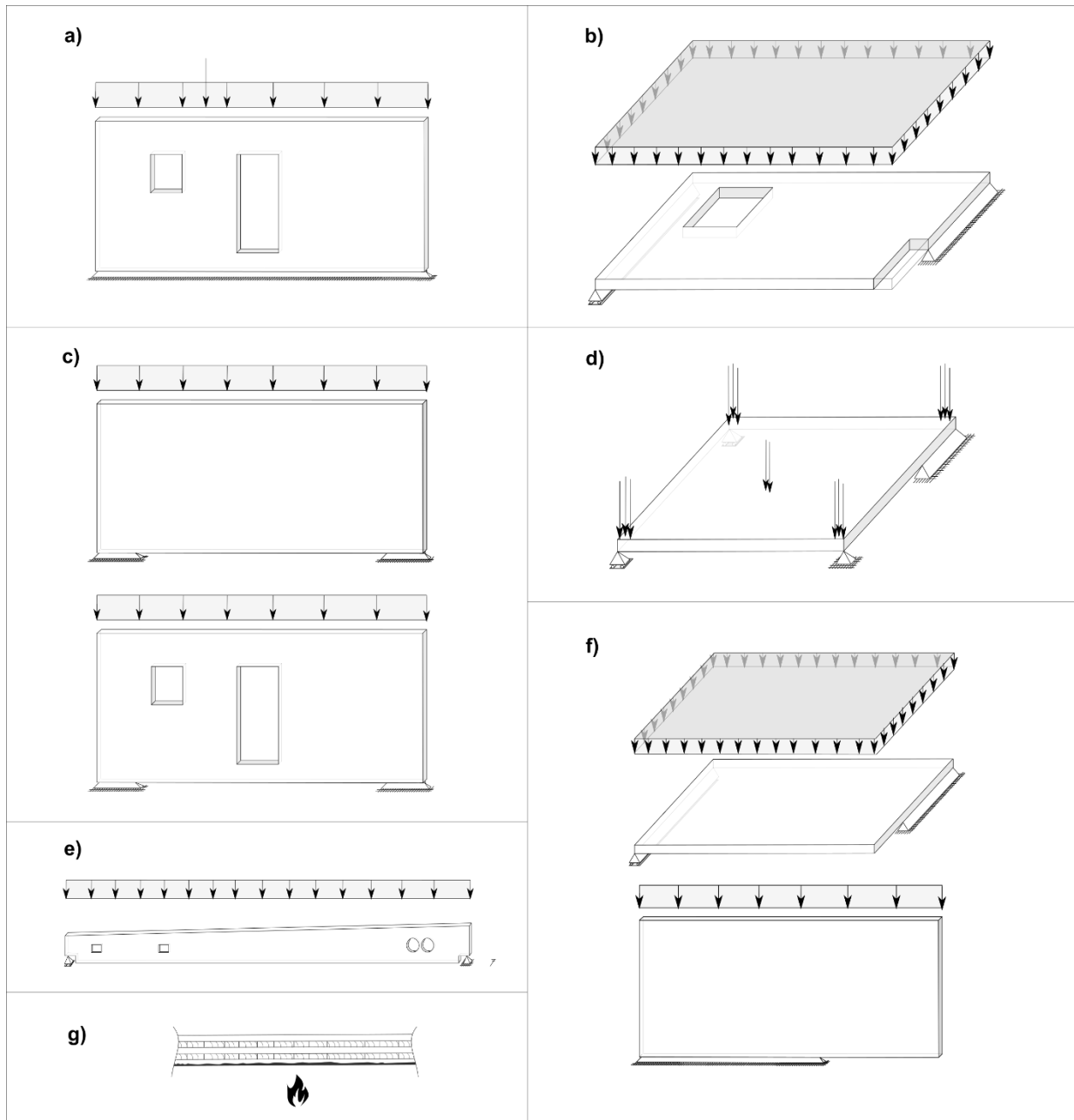


Abbildung 74: Anspruchsvolle Bemessungssituationen: (a) Öffnungen in Wänden, (b) Öffnungen in Decken, (c) Wandartige Träger aus BSP, (d) BSP-Balken, (e) Punktlager und konzentrierte Lasten, (f) Kragarme, (g) asymmetrische Querschnittsaufbauten [19]

Befragt nach ihrer möglichen Qualifikation zur Lösung dieser speziellen Themen, meinen 43.4 % der Ingenieure, eigentlich alle Probleme lösen zu können (siehe Abbildung 75). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass mehr als die Hälfte der Befragten auf Probleme ohne zufriedenstellende Lösung stößt. Punktstützungen oder konzentrierte Lasten (10.3 %), gefolgt von Öffnungen in Brettspertholzelementen (8.8 %) und asymmetrischem BSP-Querschnitte (7.4 %), werden von den meisten Befragten als unlösbare Situationen beschrieben. Um den Ingenieuren in der Praxis die Bemessung zu erleichtern, sollte der Wissensstand in diesen Bereichen durch weitere Forschung erweitert und mit Hilfe von Bemessungshilfsmitteln den Anwendern zugänglich gemacht werden.

Tabelle 35: Die anspruchsvollsten Bemessungssituationen für die Teilnehmer [19]









Most challenging design issues	Designer  [63 replies]	Constructor  [33 replies]	Researcher  [26 replies]	Total  [141 replies]
Openings in walls	20.6 %	24.2 %	26.9 %	18.4 %
Openings in floors	15.0 %	15.2 %	11.5 %	14.9 %
Deep beams	6.3 %	12.1 %	7.7 %	7.8 %
Holes in beams	6.3 %	9.1 %	7.7 %	9.9 %
Point supports / concentrated loads	28.6 %	18.2 %	11.5 %	22.7 %
Cantilevers	4.8 %	0.0 %	23.1 %	7.1 %
Asymmetrical lay-ups	9.5 %	9.1 %	7.7 %	9.9 %
I have not encountered any of the above	7.9 %	12.1 %	3.8 %	9.2 %

Tabelle 36: Hintergründe für die Schwierigkeit in der jeweiligen Bemessungssituation [19]

	Designer  [63 replies]	Constructor  [33 replies]	Researcher  [26 replies]	Total  [141 replies]
Missing / incomplete...				
Design concepts	54.0 %	42.3 %	52.2 %	46.5 %
Material / design parameters	16.0 %	19.2 %	17.4 %	19.3 %
Software implementation	24.0 %	23.1 %	17.4 %	21.9 %
Geometric parameters	0 %	7.7 %	0 %	2.6 %
Other	6.0 %	7.7 %	13.0 %	9.6 %

62 replies - open question

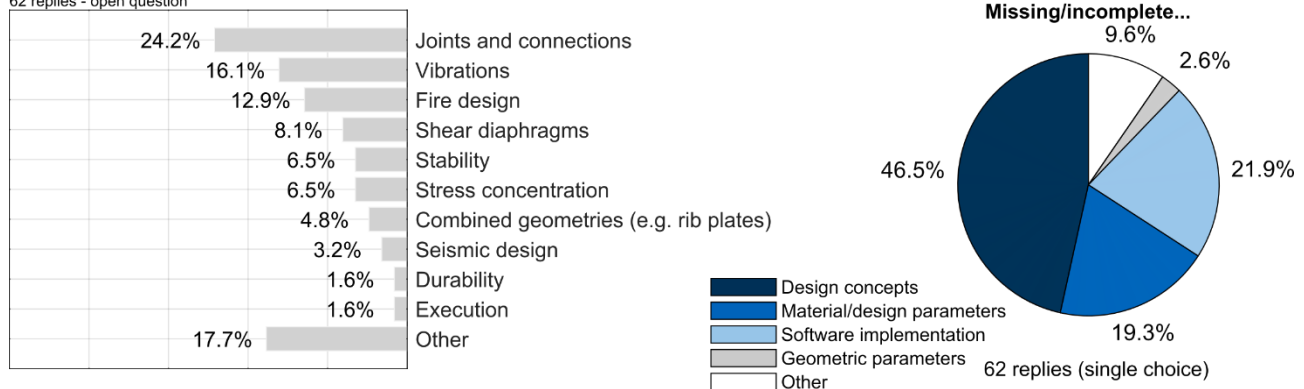


Abbildung 75: Weitere Schwierigkeiten in der Bemessung (links) und Ursachen für die Schwierigkeiten (rechts) [19]

a

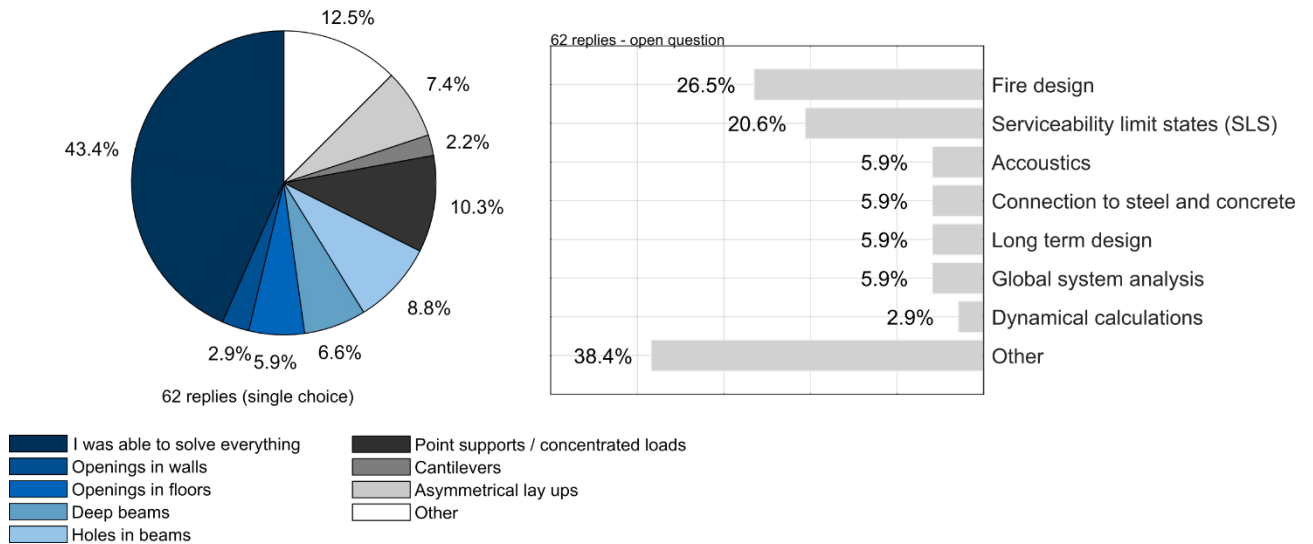


Abbildung 76: Ungelöste Bemessungssituationen (links) und weitere unlösbare Aufgaben (rechts) [19]

3.1.4 Anschlüsse und Verbindungen in Brettsperrholzkonstruktionen

Anschlüsse und Verbindungen sind häufig maßgebend in der Bemessung von Holzkonstruktionen, auch Brettsperrholz bildet hier keine Ausnahme. Steifigkeiten und Tragfähigkeiten ergeben sich als Kombination entsprechender Werte des Verbindungsmittels und des verwendeten Werkstoffes. In der Umfrage wurden die in der Praxis dafür verwendeten Modellierungsannahmen evaluiert.

Auf die Frage, mit welchem Ersatzsystem Anschlüsse und Verbindungen typischerweise modelliert werden, gab die Mehrheit der Teilnehmer das Federmodell an (siehe Tabelle 37). Auch starre Kopplungen werden in einem Drittel der Fälle modelliert. Die prozentuale Verteilung der gewählten Modellierung ist in den verschiedenen Anschlusssituationen (dargestellt in Abbildung 77) weitestgehend ähnlich. So werden Federn in 41.1 % der Fälle bei einer Verbindung von BSP-Wand zu BSP-Wand und in 46.8 % der Fälle bei einer Verbindung von Platte zu Wand verwendet.

Das Federmodell erfordert einen diskreten Steifigkeitswert. Für die Definition eines solchen Wertes verlassen sich die meisten Teilnehmer auf die Angaben der Verbindungsmittelhersteller (32.3 %) sowie auf Dokumentationen der BSP-Hersteller (23.4 %) (siehe Tabelle 38). Es fällt zudem auf, dass sich eine große Zahl der teilnehmenden Ingenieure zudem stark auf ihr eigenes technisches Urteilsvermögen stützt (21.0 %).

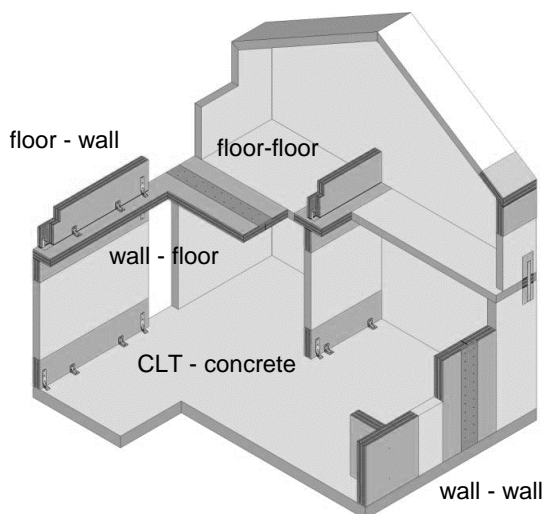


Abbildung 77: Anschlüsse und Verbindungen in BSP-Strukturen [30]

Prinzipiell sind die Teilnehmer mit den existierenden Hilfsmitteln zur Bemessung von Anschlüssen und Verbindungen in Brettsperrholzkonstruktionen nicht zufrieden. Sie sehen das größte Verbesserungspotenzial in einer automatisierten Implementierung von Anschlussmodellierungen in kommerzielle FEM-Software oder in der Aufbereitung der entsprechenden Anschlusssteifigkeitswerte (siehe Abbildung 78).

Tabelle 37: Modellierung von Anschlüssen [19]








Connection stiffness	Rigid	Spring	Joint	None
				
CLT wall - CLT wall	29.1 %	41.1 %	22.7 %	7.1 %
CLT floor - CLT floor				
CLT floor - CLT wall	31.9 %	46.8 %	17.7 %	3.5 %
CLT wall - CLT floor				
CLT - concrete	31.2 %	41.1 %	19.9 %	7.8 %

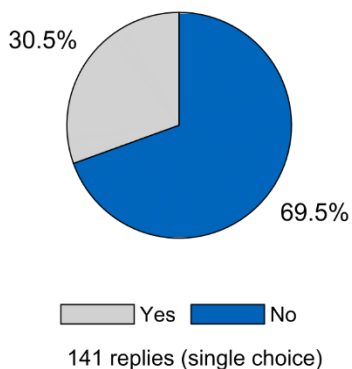
Tabelle 38: Herkunft der angesetzten Anschluss-Steifigkeiten [19]

Origin of the assumed stiffness of the connections	Designer	Constructor	Researcher	Total
				
	[63 replies]	[33 replies]	[26 replies]	[141 replies]
Documentation from CLT producer	19.4 %	21.3 %	19.0 %	23.4 %
Documentation from fastener/connector producer	32.6 %	36.1 %	35.7 %	32.3 %
Engineering judgement based on experience	22.5 %	21.3 %	14.3 %	21.0 %
γ -method	3.9 %	1.6 %	4.8 %	3.6 %
Relevant literature ^a	20.9 %	16.4 %	26.2 %	18.5 %
Other	0.8 %	3.3 %	0 %	1.2 %

^a i.e.:

EN 1995-1-1 [2] (78.5 %)
 Wallner-Novak [8],[25] (36.4 %)
 Karacebeyli + Douglas [27] (30.6 %)
 Scientific papers (6.6 %)
 ETAs based on [23] (4.1 %)
 TRA [26] (2.5 %)
 CSA O86 [24] (0.8 %)
 Other (2.5 %)

Do you deem existing tools for the calculation of joints as sufficient?



44 replies - open question

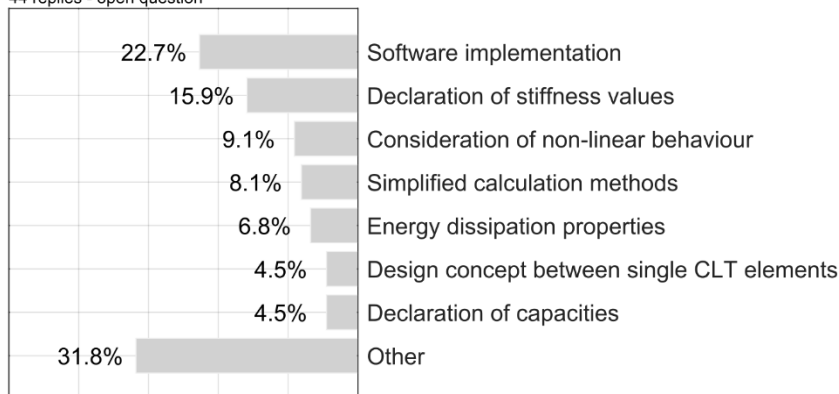


Abbildung 78: Zufriedenheit der Teilnehmer mit den bestehenden Hilfsmitteln für Anschlüsse und Verbindungen (links) und mögliches Verbesserungspotenzial (rechts) [19]

3.1.5 Modellierung und Bemessung von Brettsperrholzkonstruktionen in erdbebengefährdeten Gebieten

Auch die Bemessung im Erdbebengebieten wurde näher untersucht. Teilnehmer die nie in Erdbebengebieten geplant hatten (58.9 %), wurden in der Auswertung des folgenden Frageblocks ausgenommen. Vor allem teilnehmende Ingenieure aus südeuropäischen Ländern wie Italien (20.7 %) oder Slowenien (13.8 %) hatten bereits Erfahrung mit Erdbebenbemessung. Der Anteil an Tragwerksplanern ist im Vergleich zur gesamten Stichprobe leicht höher (47.4 % + 6.1 % = 53.5 %). Der Anteil an Forschenden mit Erfahrung in der Erdbebenbemessung liegt etwas niedriger (23.7 % - 6.8 % = 16.9 %).

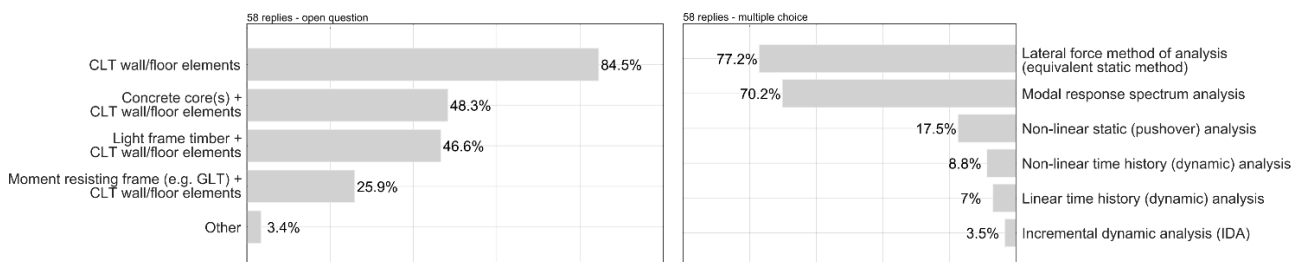


Abbildung 79: Einsatz von möglichen Brettsperrholzkonstruktionen in erdbebengefährdeten Gebieten (links) und verwendete Bemessungsverfahren (rechts) [19]

Wie in Abbildung 79 gezeigt, verwenden die meisten der befragten Ingenieure im Fall der Erdbebenbemessung von Brettsperrholzgebäuden massive BSP-Wandkonstruktionen als Aussteifungssystem (84.5 %). Knapp die Hälfte der Befragten plant auch mit Mischbauweisen, so beispielsweise leichten Holzrahmenbauten plus Brettsperrholz-Wand-/Deckenelemente (46.6 %) oder Betonkerne plus Brettsperrholz-Wand-/Deckenelemente (48.3 %).

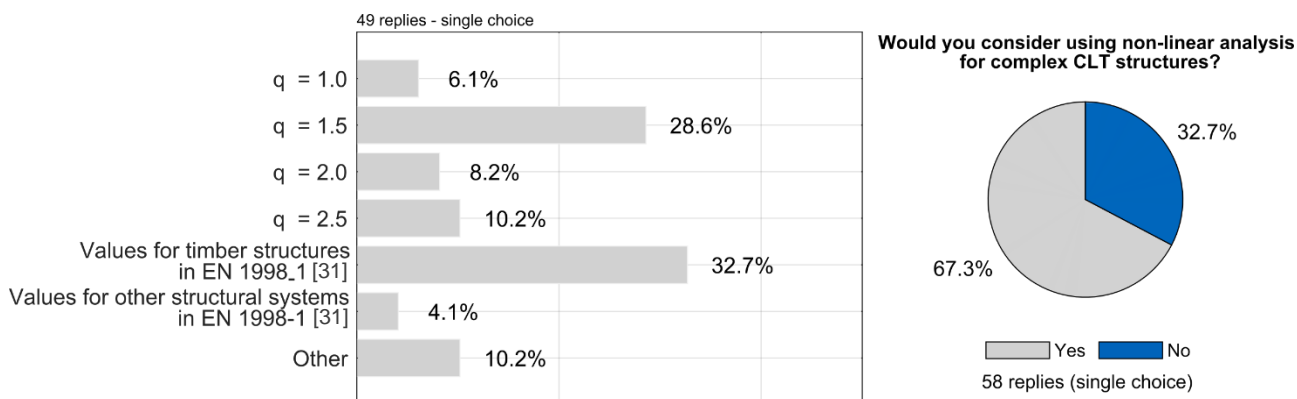


Abbildung 80: Berechnungsmethoden zur Erdbebenbemessung [19]

Für die Bemessung unter dynamischen Einwirkungen wie Erdbeben gibt es verschiedene Berechnungsansätze. Lineare Berechnungsmethoden, wie die Verwendung einer horizontalen Ersatzlast

(engl. „lateral force method“ 77.2 %) und die modale Antwortspektrumanalyse (engl. „modal response spectrum analysis“ 70.2 %) werden von etwa drei Vierteln der Befragten verwendet. Ein ähnlicher Prozentsatz würde aber auch nichtlineare Methoden für komplexere BSP-Konstruktionen in Betracht ziehen (siehe Abbildung 80, rechts).

Für den in der Erdbebenbemessung nach [31] notwendigen Duktilitätsbeiwert (auch Verhaltensbeiwert oder q-Faktor genannt), werden in der Praxis unterschiedliche Werte gewählt (siehe Abbildung 80, links). Etwa ein Drittel (32.7 %) der Befragten wendet die Werte aus Eurocode 8 für Holzkonstruktionen auch auf Brettsperrholz an. Ähnliche viele Ingenieure (28.6 %) rechnen mit geringer duktilem Materialverhalten (q-Faktor von 1.5). Es werden aber auch höhere Werte wie q-Faktoren von 2.0 oder 2.5 von den teilnehmenden Ingenieuren genannt. Letztere Werte stammen nach Angaben der Befragten u.a. aus der nationalen Norm Italiens [32] (q = 2.5) und aus dem neuen Entwurf des Eurocode 8 der zweiten Generation (q = 2.0) [33]. Der Grund schließlich, warum BSP-Konstruktionen nur selten für mehrgeschossige Gebäude in Erdbebengebieten eingesetzt werden, liegt nach Angaben der Teilnehmer nicht darin, dass andere Bausysteme oder -produkte besser geeignet wären oder dass die Kosten für BSP zu hoch wären, sondern vielmehr in fehlender Standardisierung und Normung und der fehlenden Qualifizierung der am Bau beteiligten in Brettsperrholzbauweise (siehe Abbildung 81).

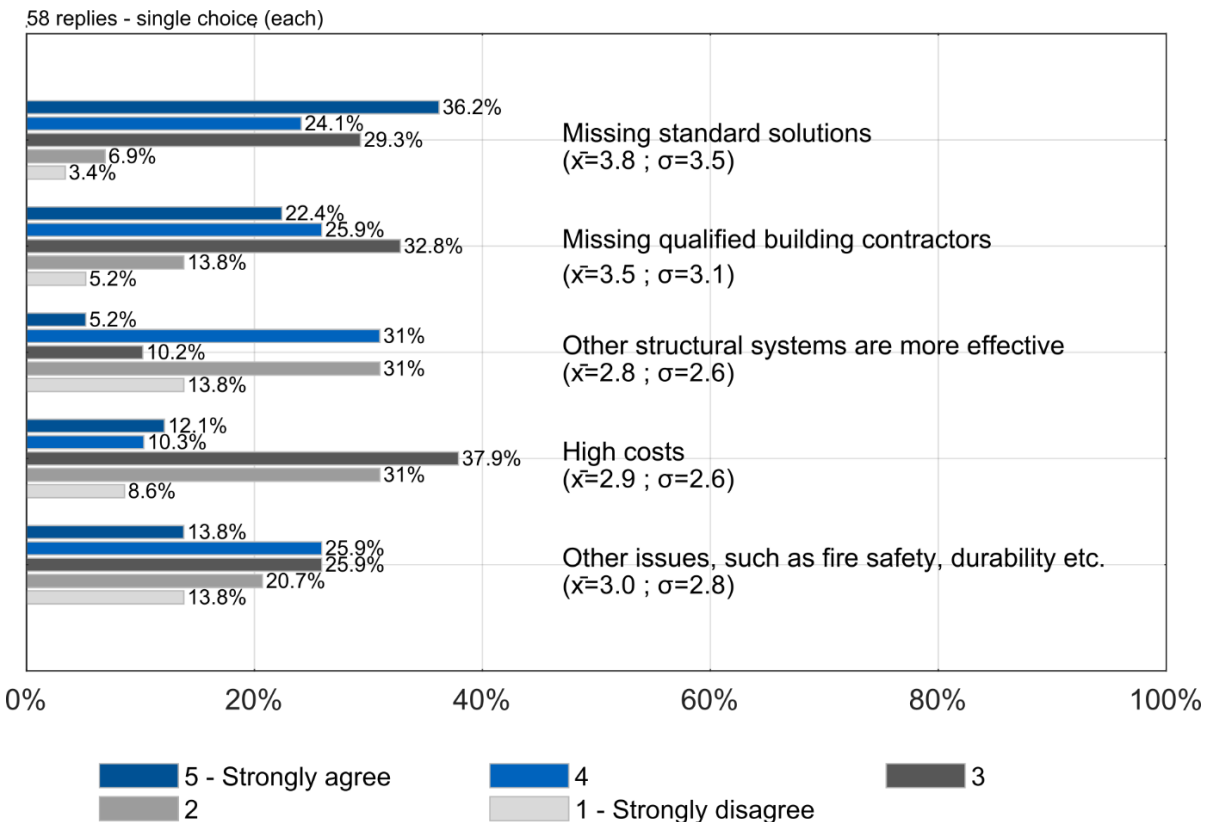


Abbildung 81: Markthindernisse für mehrgeschossige BSP-Gebäude in erdbebengefährdeten Gebieten [19]

3.1.6 Zusammenfassung der Umfrage

Die Erfahrungen und Methoden der Praxis für die Bemessung von Brettsperrholzkonstruktionen wurden mit dem dargestellten digitalen Fragebogen erfolgreich evaluiert.

Wie die Ergebnisse zeigen, stammt die Mehrheit der befragten Ingenieure aus mittelgroßen europäischen Betrieben mit Auftragsschwerpunkt im Holzbausektor. Die Untersuchungen geben nicht nur ein Überblick über die Erfahrung von den mit Brettsperrholz arbeitenden Ingenieuren, sondern auch über typische Nachweismethoden und deren gängige Implementierung in Bemessungssoftware. Darüber hinaus konnte ein klares Bild über den Kenntnisstand der Befragten und ihre Zufriedenheit mit entsprechenden Hilfsmitteln aufgezeigt werden. Obwohl sich mehr als die Hälfte der Befragten selbst als sehr vertraut mit der BSP-Bauweise bezeichnet, zeigen die Ergebnisse, dass eine große Schere zwischen gut und schlecht informierten Ingenieuren existiert. Ein Teil der Befragten hat sich scheinbar sehr intensiv mit dem Material Brettsperrholz beschäftigt und ist mit den erforderlichen Theorien vertraut. Eine andere, breite Gruppe hat sich jedoch eher oberflächlich mit dem Thema beschäftigt. Diese zweite Gruppe kennt lediglich einige grundlegenden Material-Besonderheiten, typischerweise aus den technischen Datenblättern der BSP-Hersteller und vereinfachte Berechnungsmethoden mit begrenzter Anwendung, wie die γ -Methode. Darüber hinaus verfügt ein Teil der Befragten nicht über ein ausreichend fundiertes Wissen über den Werkstoff, wie die Tatsache zeigt, dass von 10 % - 20 %, die Hintergründe und Randbedingungen der eigenen verwendeten Bemessungshilfsmittel nicht kannten.

Die Auswertung der Umfrage ergab auch, dass in der Baupraxis eine Vielzahl unterschiedlicher Literatur für die Bemessung verwendet wird. Es kann kein einheitlich verwendetes Hintergrunddokument identifiziert werden. Die meisten der Befragten verweisen auf verschiedene veröffentlichte Handbücher zur Bemessung von Brettsperrholz. In Anbetracht der relativ jungen Entwicklung des Materials und der angegebenen langjährigen Berufserfahrung der befragten Personen kann davon ausgegangen werden, dass die meisten der Befragten sich die Bemessung von Brettsperrholz selbst beigebracht haben. Es zeigt sich also, dass es derzeit in der Praxis noch an einer formalen Grundausbildung mit dem Werkstoff fehlt. Dieser Gedanke wird noch deutlicher, wenn man die Antworten auf die konkreten Fragen zu den verwendeten Software-Hilfsmitteln betrachtet. Auch hier scheinen die meisten der Befragten über ein breites Repertoire an verschiedenen Ansätzen zu verfügen, die auf einer Vielzahl von Literatur basieren. Dabei ist aber die Mehrheit der Befragten mit der verfügbaren bzw. verwendeten Software zufrieden. Verschiedene Programme, die auf jeweils eigene Randbedingungen aufbauen und dabei unterschiedliche Genauigkeitsgrade aufweisen, können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Es ist fraglich, ob diese Heterogenität ein einheitlich hohes Maß an Zuverlässigkeit erzeugen kann.

Im Gegensatz dazu beziehen sich die meisten Befragten bei den Materialparametern auf die Produktnorm für Brettsperrholz oder die Europäischen Technischen Bewertungen, die jeweils offizielle Dokumente für die Materialeigenschaften von BSP darstellen. Die Harmonisierung und Kommunikation zu den Materialparameter scheinen also weiter fortgeschritten als selbiges der Bemessung. Auch bei den Materialparametern stimmt jedoch das Ergebnis der Umfrage mit den vorherigen Schlussfolgerungen über den Bedarf weiterer Ausbildung überein. Eine große Wissensschere ist erkennbar.

Durch die Umfrage konnte festgestellt werden, dass der tatsächliche Anteil von BSP-Konstruktionen im Vergleich zu anderen Holzprodukten recht gering ist. Es stellt sich die Frage, warum dem so ist. Die Analyse der Umfrage zeigt, dass der Grund möglicherweise nicht mit dem Produkt selbst zusammenhängt, da die meisten Befragten mit der Leistung des Materials zufrieden scheinen. Dies scheint selbst in anspruchsvollen Situationen wie mehrgeschossige Gebäude in Erdbebengebiete der Fall. Die Ergebnisse der Umfrage weisen vor allem auf die fehlende Normung und unvollständige Vorschriften hin. Die meisten Planer benötigen mehr Informationen oder eine bessere Dokumentation für ihre Planungsaufgaben. Das Fehlen einer einheitlichen Bemessungsvorschrift für Brettsperrholz könnte zu einer erschwerten Wettbewerbssituation führen. Es stellt sich aber auch die Frage, ob ein einheitlich hohes Sicherheitsniveau gewährleistet werden kann, wenn eine ganze Vielfalt von uneinheitlichen Referenzen verwendet wird. Diese unklare Situation führt dazu, dass die Errichtung eines Bauwerks in Massivholzbauweise entsprechende Erfahrung und Qualifizierung erfordert und daher nur von einigen Ingenieuren durchgeführt werden kann.

In Zukunft muss also der Schwerpunkt weniger auf der Erforschung zur Verbesserung der Materialeigenschaften liegen, sondern auf der Entwicklung geeigneter Werkzeuge und Modelle für die Anwendung des Produkts. Die Auswertung der Umfrage zeigt, dass einfache Konstruktionsregeln erforderlich sind. Insbesondere sollten allgemeingültige Ansätze für komplexere Entwurfsprobleme entwickelt werden. In einem weiteren Schritt sollte an der Umsetzung von komplexeren Entwurfsproblemen in Softwarelösungen gearbeitet werden. Weitere Forschungsarbeiten können und müssen die Anwendbarkeit von Brettsperrholz weltweit erhöhen, um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Baustoffen stärken.

3.2 Interviews

3.2.1 Methodik und Überblick

Basierend auf den Ergebnissen der digitalen Umfrage wurden im Sommer 2020 persönliche Interviews mit acht in der Praxis tätigen Expert:innen mit langjähriger Berufserfahrung mit Brettsperrholz geführt. Anders als im generischen digitalen Fragebogen, erlaubt das offene Gespräch, geleitet anhand der Beispiel-Abbildungen und qualitativen Fragen (siehe Anhang B) die ausführliche Beschreibung spezifischer Lösungsansätze oder üblicher Anwendungsvorgänge. Generell kann nach [15] bei Experteninterviews davon ausgegangen werden, dass der Interviewte objektiv antwortet und keine persönlichen oder individuellen Besonderheiten darstellt. Dennoch kann auch in Experteninterviews subjektive Deutungen nicht ausgeschlossen werden [15]. Die Beantwortbarkeit der Fragen wurde im Vorfeld mit zwei der assoziierten Partner des Forschungsprojektes geprüft. Ziel der Interviews war es, konkrete Lösungsansätze des Entwurfs und der Bemessung, aber auch Fragestellungen der Praxis an die Forschung im mehrgeschossigen Bauen mit Brettsperrholz zu evaluieren. Teilgenommen haben bis Oktober 2020 insgesamt fünf Ingenieure aus Tragwerksplanungsbüros sowie drei Ingenieure aus ausführenden Unternehmen. Sitz der international tätigen Experten waren die Länder Deutschland, Österreich, Italien und Spanien. Die Unternehmen werden in der weiteren Auswertung anonym gehalten. Die Vorbereitung und Auswertung der Interviews erfolgten in englischer Sprache.

3.2.2 Entwurf und Bemessung

Der Entwurf und die Bemessung von Brettsperrholzwänden in mehrgeschossigen Gebäuden ist von einigen Randbedingungen abhängig. Im üblichen Fall wird der Entwurf und die Bemessung von Wänden unter vertikaler Belastung in Flächenebene anhand vereinfachender Stabstatik gelöst. Abbildung 82 b), d) und f)

stellt einige der möglichen Segmentierungsvarianten einer einfachen Brettsperrholzwand dar. Basierend auf der Segmentierung werden durch den Planer statische Ersatzsysteme gebildete und Drucknachweis bzw. Stabilitätsnachweis geführt (siehe Kapitel III 1.3.3). Für beide Nachweise ist der Lastfluss in den Segmenten und damit die ansetzbare mitwirkende Breite entscheidend. Zum Teil unterscheiden sich die in der Praxis für den Drucknachweis und den Stabilitätsnachweis angesetzten Breiten. Hier wurde Forschungsbedarf aufgezeigt.

Neben der Ermittlung der mitwirkenden Breite ergibt sich auch die Frage nach einer maximal ansetzbaren mitwirkenden Breite ($B_{3,max}$), denn es ist davon auszugehen, dass im Falle eines sehr großen ungestörten Elementes, nicht immer das ganze Segment für eine mitwirkende Breite eines Ersatzstabes herangezogen werden kann.

Tabelle 39: Lastausbreitung unter Belastung in Plattenebene

Do you assume an angle of stress distribution in an in-plane loaded wall?	
a)	$\alpha = 0^\circ$
b)	$\alpha = 30^\circ$
c)	$\alpha = 9.5^\circ$, respectively 1:6
d)	$\alpha = 15^\circ$
e)	$\alpha = 20^\circ$
f)	$\alpha = 15^\circ$
g)	$\alpha = 45^\circ$
h)	$\alpha = 0^\circ$

Tabelle 39 i.V.m. Abbildung 82 listet die aus den Interviews ermittelten Werte für einen Lastausbreitungswinkel α in Brettsperrholzwandelementen unter Druckbelastung in Elementebene. Hier werden Werte im Bereich zwischen 0° und 45° gegeben, wobei der Wertebereich zwischen 10° und 20° überwiegt. Es bleibt die Frage offen, ob sich die Lastausbreitung unter diesem Winkel endlos fortsetzen lässt, oder aber eine Änderung des Lastflusses ab einer definierten Höhe $h_{\alpha,max}$ zudem existiert.

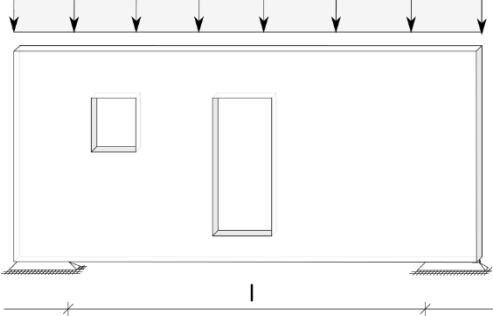
Für die vernachlässigbare Öffnungsgrößen gaben die Experten Werte in einer Größenordnung von 0,2 m - 1,2 m der Öffnungsgeometrien an, siehe Tabelle 40 i.V.m. Abbildung 82.

Tabelle 40: Übermessbare Öffnungsgrößen in Wänden

Do you have an estimation of size of openings that can be neglected?	
a)	<i>No answer.</i>
b)	<i>No answer.</i>
c)	Yes, b_{hole} and $h_{hole} \leq 1$ m.
d)	Yes, b_{hole} and $h_{hole} \leq 0.2$ m.
e)	Yes, b_{hole} and $h_{hole} \leq 2t$.
f)	Yes, b_{hole} and $h_{hole} \leq 1.2$ m.
g)	Yes, b_{hole} and $h_{hole} \leq 1$ m.
h)	No, not a general one. It depends on the position and dimension related to geometries of the CLT panel: an opening witch is small related to rest of the CLT panel and not near to edges could possibly be neglected, e.g. b_{hole} and $h_{hole} \leq 0.2$ m.

Von den Experten unbeantwortet geblieben – ist die Frage nach einer minimal notwendigen Geometrie ($B_{min,rig}$ und $H_{min,rig}$), um die Einspannung einer starren Rahmenecke in einem Ersatz-Stubtragwerk zu verwirklichen, siehe Abbildung 82. Solch eine Einspannung wäre auch im Stubwerk zur Lösung wandartiger Träger mit Öffnungen denkbar. Wandartige Träger mit und ohne Öffnungen werden in der Praxis aber scheinbar vor allem mit den numerischen Hilfsmitteln der finite Elemente Programme gelöst. Bei wandartigen Trägern kommt neben der vertikalen Normalkräfte in der Wand noch eine Biege- und Schubbeanspruchung in Plattenebene hinzu. Aufgrund der Anisotropie des Holzes und der unterschiedlichen Festigkeiten auf Biegung, Druck und Zug, ist die Spannungsverteilung über die Höhe in Biegeträgern von herausragender Bedeutung für die Nachweise. Bei linearer Spannungsverteilung führen die interviewten Ingenieure Biegenachweise. Konstante Spannungsanteile für Druck und Zug (Gurtkräfte), siehe Abbildung 54, werden anhand der entsprechenden Festigkeiten bemessen. Die Verhältnis Spannweite l zu Höhe h eines auf Biegung belasteten Trägers unter denen die lineare Spannungsverteilung angenommen wird, ist in Tabelle 41 dargestellt. Von einigen Tragwerksplanern wurden die Schubnachweise an den Auflagern des wandartigen Trägers als kritischer Punkt angegeben. Eine weiche Bettung auf Ersatzfedern die den Steifigkeiten der anschließenden Bauteile entsprechen wird hier empfohlen.

Tabelle 41: Annahme linearer Spannungsverteilung

For which ratio l/h do you assume a linear bending stress distribution?	
	a) $l/h \leq 3/1 \dots 4/1$
	b) $l/h \leq 4/1$
	c) $l/h \leq 5/1$
	d) $l/h \leq 10/1 \dots 20/1$
	e) We always assume linear bending stress distribution in deep beams.
	f) We apply the stress distribution according to a numerical model.
	g) Always Bernoulli beam theory.
	h) <i>No answer.</i>

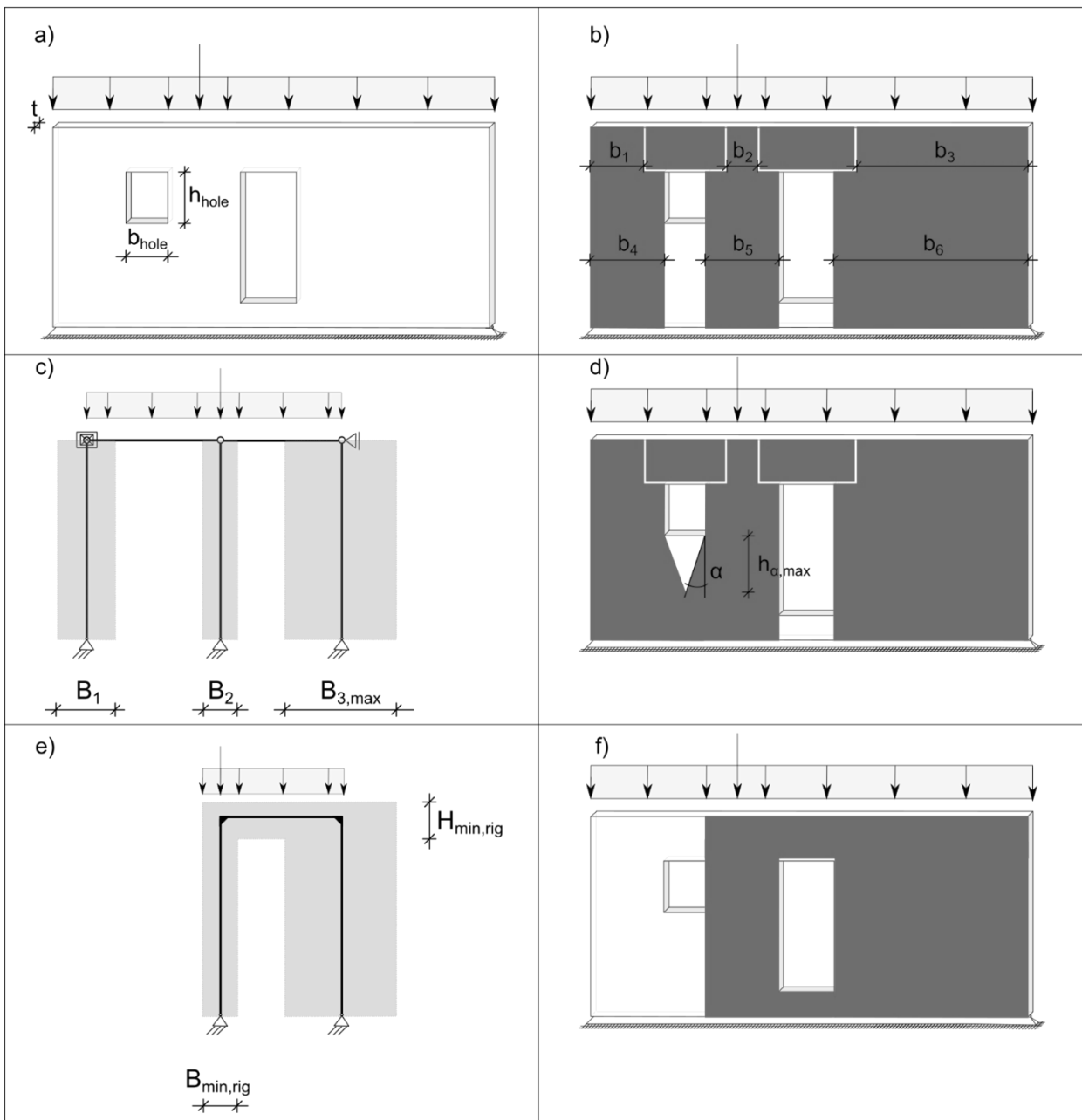


Abbildung 82: Segmentierungen von Brettsperrholzwänden mit Überzug und statische Ersatzsysteme

Ähnlich wie einfache Wände, werden auch Decken in mehrgeschossigen Brettsperrholzkonstruktionen üblicherweise mit Stabstatik berechnet. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind die Nachweise Biegung, Schub und Querdruck üblicherweise die maßgeblichen. Jedoch zeigten Untersuchungen nach [34], dass in

Brettsperrholzdecken üblicherweise nicht die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit, sondern die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bemessungsrelevant sind, siehe Kapitel IV.2.2.

Auch bei den Decken stellt sich die Frage nach der am Lastabtrag beteiligten Geometrie. Im Fall von Biegung und Schub ist die mitwirkende Plattenbreite entscheidend. Auch in den Durchbiegungs- und Schwingungsnachweisen im GZG ist die Ermittlung dieser Breite von entscheidender Bedeutung.

Abbildung 83 und Formeln (AP6-44) - (AP6-48) zeigen einen im Gespräch dargelegten praxisorientierten Lösungsansatz für die mitwirkende Breite einer über ein Feld spannenden Platte, hergeleitet anhand einer Einzellast F in Feldmitte.

$$w_1 = w_2 \quad (\text{AP6-44})$$

mit

$$w_1 = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI_{y,1,net}} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot k_1 \cdot \frac{B \cdot t^3}{12}} \quad (\text{AP6-45})$$

$$w_2 = \frac{F \cdot 2L^3}{48 \cdot EI_{y,2,net}} = \frac{F \cdot 2L^3}{48 \cdot E \cdot k_2 \cdot \frac{L \cdot t^3}{12}} \quad (\text{AP6-46})$$

$$k_1 = \frac{I_{y,1,net}}{I_{y,1,brutto}} \quad (\text{AP6-47})$$

$$k_2 = \frac{I_{y,2,net}}{I_{y,2,brutto}} \quad (\text{AP6-48})$$

wobei

w_i	Durchbiegung des Ersatzstabs in Richtung i ;
F	Einwirkung in Feldmitte;
L	Länge der Platte;
E	Elastizitätsmodul längs zur Faser;
B	Mitwirkende Breite unter Einzellast;
t	Dicke des Elements;
k_i	Steifigkeitsverhältnis in Richtung i ;
$I_{y,i,net}$	Netto Flächenträgheitsmoment des Ersatzstabs in Richtung i um die lokale y -Achse;
$I_{y,i,brutto}$	Brutto Flächenträgheitsmoment des Ersatzstabs in Richtung i um die lokale y -Achse.

Gleichung (AP6-45) - (AP6-48) in Gleichung (AP6-44) eingesetzt ergibt sich die mitwirkende Breite eines Einfeldträgers:

$$B = H \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{2} \cdot \frac{k_1}{k_2}} \quad (\text{AP6-49})$$

Analog ergibt sich für das Durchlaufträgersystem:

$$B = H \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{16} \cdot \frac{k_1}{k_2}} \quad (\text{AP6-50})$$

Als Lastausbreitwinkel unter einer Plattenbeanspruchung wird von den Befragten vor allem ein Wertebereich von 30° - 45° genannt, siehe Tabelle 42.

Für die vernachlässigbaren Öffnungsgrößen gaben die interviewten Experten sehr heterogene Angaben, siehe Tabelle 43. Dies scheint in den sich überschneidenden Anforderungen aus GZT und GZG begründbar. Es scheint zu den Öffnungen in Brettsperrholzdecken weiterer Forschungsbedarf zu existieren.

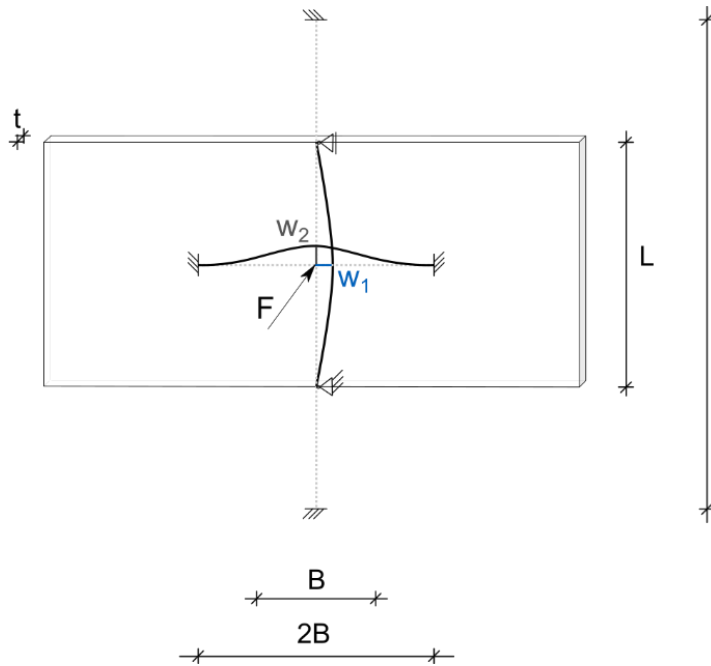


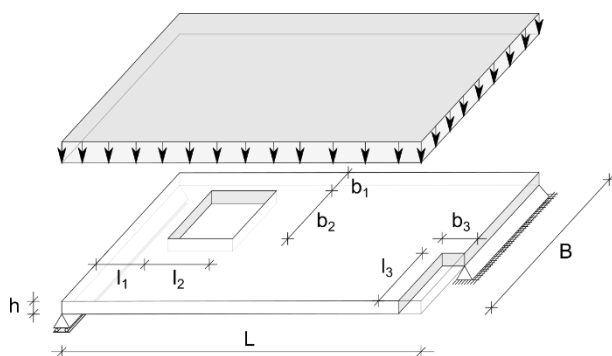
Abbildung 83: Statisches Ersatzsystem zur Ermittlung der mitwirkenden Breite einer Einfeld-Platte

Tabelle 42: Lastausbreitung unter Belastung rechtwinklig zur Plattenebene

Do you assume an angle of stress distribution in an out-of-plane loaded floor?	
a)	$\alpha = 45^\circ$
b)	No answer.
c)	$\alpha = 45^\circ$
d)	$\alpha = 30^\circ$
e)	$\alpha = 35^\circ$
f)	$\alpha = 45^\circ$
g)	$\alpha = 45^\circ$
h)	$\alpha = 0^\circ$

Tabelle 43: Übermessbare Öffnungsgrößen in Decken

Do you have an estimation of size of openings that can be neglected?	
a)	Yes, minimum width: b_1 and $l_1 \geq 3h$ and $b_3 \leq 0,6B$
b)	Yes: b_2 and $l_2 < h$
c)	Yes: b_2/L and $l_2/L < 10$
d)	Yes: b_2 and $l_2 < 0,05L$
e)	Yes, openings close to supports
f)	Yes: 1×1 m is negligible, with minor exceptions related to shear concentrations
g)	Yes, depending on the ratio of opening factor to utilization factor e.g.: $\frac{(l_2 \cdot b_2)}{L \cdot B} \leq 30\% \dots 60\%$
h)	No, there are too many influencing boundary conditions.



3.2.3 Anschlüsse und Verbindungen

Im mehrgeschossigen Bauen mit Brettsperrholz wird von den Befragten die Bauweise in Balloon-framing zur Reduzierung der Querdruckbeanspruchungen und der zugehörigen Verformungen bevorzugt. Für weniger hochbeanspruchte Gebäude ist das Platform-framing aufgrund der einfachen Montage praxisnäher.

Annähernd einig sind sich die interviewten Ingenieure im angewandten Standardanschluss der Elemente in Decken und Wänden. Längsstöße von Elementen scheinen in der Praxis vermieden zu werden. Als Verbindungsstöße zwischen den quergestoßenen Elementen werden Anschlüsse mit Falzbrett oder auch Stufenfalz bevorzugt, siehe Abbildung 84. Zur Erstellung eines biegesteifen Anschlusses werden die beiden Anschlüsse aus Abbildung 84 mit überkreuzten Vollgewindeschrauben häufig von den Ingenieuren genannt.

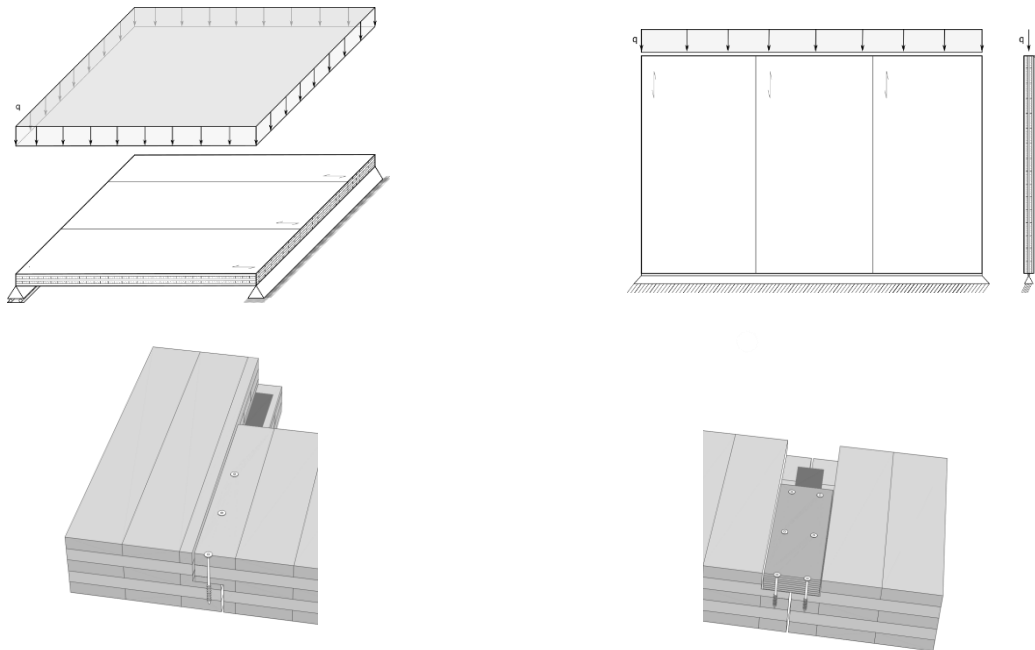


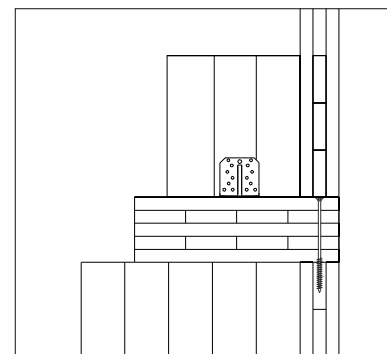
Abbildung 84: Standardlösung für den Elementstoß in Brettsperrholzdecken und -wänden (oben) exemplarisch Stufenfalz (links) und Falzbrett (rechts) aus [35]

Im Fall von Wand-Decke-Anschlüssen wird in der Praxis häufig auf Stahlwinkelanschlüsse zurückgegriffen, siehe Tabelle 44. Für Decke-Wand-Anschlüssen werden Holzbauschrauben verwendet. Eine Unterscheidung von Haupt- und Nebentragrichtung wird in der Anschlussausführung nicht gemacht. Auch bei Anschlüssen an Betonwände und -fundamente werden Stahlwinkel in Verbindung mit Betonankern häufig gewählt. Ein wichtiger Punkt scheint die Einleitung von Zugkräften in die Fundamente. Ein Teil der Ingenieure setzt hier auf massive Zugverankerungen am Anfang und Ende einer Brettsperrholzwand, ein anderer Teil bevorzugt die Einleitung der Kräfte über kontinuierlich verteilte Stahlwinkel. Besonders im ersteren Fall ist hier auf den Einfluss von Öffnungen in Wänden zu achten. Ein einheitliches Berechnungsverfahren scheint zu fehlen.

Tabelle 44: Typische Hauptanschlüsse zwischen Brettsperrholzwände und -decken nach [35]

Do you have a typical connection that you apply between CLT wall and CLT floor elements in primary direction?

- No answer.
- Yes, steel brackets.
- Yes, wall to floor: steel brackets, floor to wall: screws.
- Yes, fully threaded screws and steel brackets.
- Yes, inclined fully threaded screws
- Yes, fully threaded screws and steel brackets. Steel brackets especially in cases of high acoustic requirements.
- Yes, fully threaded screws and steel brackets.
- Yes, screws.



Insgesamt wird üblicherweise angenommen, dass die Verbindungsmittel Schubkräfte oder Momente aufnehmen sollen. Normalkräfte – so die Annahme – werden über die Brettsperrholzelemente direkt weitergegeben.

Für die Verbindungsmittelsteifigkeiten verweist in etwa die Hälfte der Ingenieure auf [2] die andere Hälfte der Ingenieure gab hierzu keine Antwort, siehe Tabelle 45.

Tabelle 45: Quelle für die Anschlusssteifigkeit [35]

Where do you get the stiffness (slip modulus) for your typical connections?	
a)	<i>No answer.</i>
b)	I do not consider it.
c)	EN 1995-1-1 and ETAs.
d)	I do not consider it up to now.
e)	EN 1995-1-1.
f)	EN 1995-1-1.
g)	EN 1995-1-1 and testing.
h)	<i>No answer.</i>

3.2.4 Zusammenfassung der Interviews

Tabelle 46 fasst die wichtigsten Ergebnisse aus den Experteninterviews zusammen. Es konnte gezeigt werden, dass die offenen Forschungsfragen in den üblichen Bemessungssituationen auf einige wenige Parameter eingegrenzt werden können, um Brettsperrholz auf die derzeit verwendeten Bemessungsmethoden nach [2] anwendbar zu machen. Umfangreicher scheint der Forschungsbedarf im Bereich des Einflusses der Öffnungen sowie der Stabilität von wandartigen Trägern aus Brettsperrholz. Zwar scheinen die verwendeten Verbindungsmittel weitgehend standardisiert, Informationen zu Steifigkeit für die Modellierung sowie globale Effekte scheinen hier bisher nicht ausreichend bekannt. In den Interviews zeigt sich zudem, dass solange keine vereinfachten Bemessungsmethoden vorliegen, Ingenieure auf numerische Lösungen mittels der finiten Elemente zurückgreifen. Hierzu wurde im Rahmen der Interviews von den Ingenieuren immer wieder auf das Fehlen von Leitfäden und praxisnaher Beispiele zur Kalibrierung der verwendeten Modelle, hingewiesen.

Tabelle 46: Zusammenfassung der Interviewergebnisse

	Bemessungssituation/kritischer Punkt	Forschungsbedarf/Lösungsvorschlag
Wände	Ermittlung der Spannungsverteilung bei Druckbelastung in der Ebene	Lastausbreitwinkel
		Mitwirkende Breite eines Stabtragwerks für einfache Handbemessung
	Stabilitätsnachweis	Mitwirkende Breite bei Stabilitätsversagen (Knicken)
	Berücksichtigung von Öffnungen	Vernachlässigbare Öffnungsgrößen
Wandartige Träger	Ermittlung der Spannungsverteilung bei Biegebelastung in der Ebene	Grenzwert zur Annahme linearer Spannungsverteilung
	Übertragung von Biegemomenten um Öffnungen	Minimale Geometrien zur Annahme ausreichender Einspannung
	Schubnachweis bei Belastung in der Ebene (z.B. am Auflager)	Singularitäten und Einspanneffekte
	Stabilitätsversagen	Biegedrillknicken von wandartigen Trägern
Decken	Ermittlung der Spannungsverteilung bei Druckbelastung quer zur Ebene	Lastausbreitwinkel
		Mitwirkende Breite eines Stabtragwerks für einfache Handbemessung im GZT
	Schwingungsverhalten	Mitwirkende Breite eines Stabtragwerks für einfache Handbemessung im GZG
Berücksichtigung von Öffnungen	Übermessbare Öffnungsgrößen im GZT und GZG	
Verbindungen	Verbindungssteifigkeit	Ermittlung der Verbindungssteifigkeit
		Zusammenwirken von Steifigkeiten im globalen Gesamtsystem
	Aussteifung	Berechnungsverfahren für Zugverankerungen

FEM	Modellierung	FE-Leitfaden mit Beispielen
	Kalibrierung	

3.3 Zusammenfassung des Stands des Wissens in der Praxis

Ziel des Projektes war die Entwicklung von zuverlässigen praxisorientierten Entwurfs- und Modellierungsstrategien, von einfachen Entwurfsformeln sowie Bemessungsansätzen für großflächige und mehrstöckige Brettsperrholz-Gebäude. Grundlage für die Zielerreichung ist eine sorgfältige Evaluierung des Kenntnisstandes in der Praxis. Dies konnte anhand eines digitalen Fragebogens (44 Fragen, 141 Teilnehmer weltweit) und persönlicher Interviews mit ausgewählten Experten (27 Fragen, 8 Experten, europaweit) umgesetzt werden.

Die Fragebögen ergaben als kritischste Bemessungssituationen mit dem meisten Forschungsbedarf aus Sicht der Praxis:

- Punktstützungen und konzentrierte Lasten
- Öffnungen in Wänden und Decken
- Anschlüsse und Verbindungen

Auch ergab der Fragebogen, dass unter den Materialparametern vor allem der Einfluss der Torsionssteifigkeit weithin unbekannt erscheint.

Neben dem Grenzzustand der Tragfähigkeit wird aus den beiden Umfragen deutlich, dass folgende Themen häufig Schwierigkeiten für die Praxis in der Bemessung mit sich bringen:

- Schwingungen (Globalsystem und auf Bauteilebene)
- Dauerhaftigkeit (konstruktives Konzept und Langzeiteffekte)
- Ausführung mit Einfluss auf die Bemessung (Feuchtigkeit und Imperfektionen)

Generell scheinen einige Experten sich sehr gut mit dem Thema Brettsperrholz auszukennen. Jedoch scheint gleichzeitig auch eine fehlende Ausbildung und Erfahrung der breiten Masse an Ingenieure mit Brettsperrholzkonstruktionen ersichtlich. Dies kann verbessert werden durch:

- Entwicklung von Anwendungsbeispielen
- Entwicklung von Bemessungshilfsmitteln

4. Erweiterte Modellierung und komplexe Bemessungssituationen

4.1 Allgemeines

Um die Zugänglichkeit des Marktes zu erhöhen und den Wettbewerb zu fördern, hat das Europäische Komitee für Normung (CEN) im Auftrag der Europäischen Kommission harmonisierte Baunormen entwickelt. Derzeit überarbeitet das CEN die europäischen Bemessungsnormen hin zu einer zweiten Generation. Während Brettsperrholz in der ersten Generation der Bemessungsnorm kaum Erwähnung fand, wird die Integration der Bemessung grundlegender BSP-Anwendungsfälle – wie Wand- und Deckenelementen – in die zweite Generation der Norm vorbereitet [6]. Im Folgenden werden, basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel IV.2 und Kapitel IV.3, Bemessungssituationen für mehrgeschossige BSP-Gebäude untersucht, die noch nicht in den Bemessungsnormen von heute und aufgrund fehlender wissenschaftlicher Hintergründe voraussichtlich auch nicht in der kommenden zweiten Generation der Eurocodes Berücksichtigung finden.



© KOZ Architects



© Schlosser Holzbau GmbH



© Peter Eichler



© ABA Holz van Kempen



© ABA Holz van Kempen



© Klaus Klever

Abbildung 85: Beispielhafte Brettsperrholzkonstruktionen

4.2 Erweiterte Modellierungs–Methoden

4.2.1 Laminattheorie

Bei der Laminattheorie werden die Lagen eines geschichteten Materials starr miteinander verbunden und bilden so das Laminat. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass ein nachgiebiger Verbund nur über die Materialschichten und nicht über die Steifigkeit von Verbindungsmitteln berücksichtigt werden kann. Das heißt es ist im Moment nicht möglich bspw. genageltes BSP mit der Laminattheorie abzubilden. Bei geklebtem BSP hingegen wird die Nachgiebigkeit über die Querschichten definiert, weshalb eine Anwendung mit der Laminattheorie möglich ist.

Bei der Laminattheorie wird versucht den geschichteten Aufbau auf eine Ebene zu bringen. Dadurch ist es möglich Laminat trotz ihres nicht konstanten Aufbaus als Fläche zu rechnen. Abbildung 86 zeigt den Aufbau und die Definitionen des Laminates hinsichtlich des Querschnittes. Jede einzelne Schicht besitzt eine obere und untere Grenze und einen Schwerpunkt. Die Schichten können von unten oder von oben nummeriert werden. z_{SP} definiert die Lage des Schwerpunkts des Laminates und dient als Referenzebene.

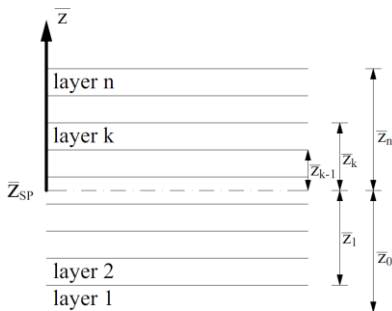


Abbildung 86: Querschnittsdefinition des Laminats [3]

Um die Nachgiebigkeit der Querlagen zu berücksichtigen, sollte eine Plattentheorie verwendet werden, welche die Schubverformungen berücksichtigt. In vielen FE-Programmen wird die First-Order Shear Deformation (FOSD) verwendet, was eine Erweiterung der Reissner-Mindlin Plattentheorie ist. Nach [37] können die Verformungen des Laminates über die Verformungen und Verdrehungen der idealisierten Ebene berechnet werden. Dabei sind u_0, v_0, w_0 als Translationen und φ_x, φ_y als Rotationen anzusehen. Die Verformungen an gewissen Punkten im Querschnitt können über folgende Gleichungen ermittelt werden:

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= u_0(x, y) + \bar{z} \cdot \varphi_x \\
 v(x, y, z) &= v_0(x, y) + \bar{z} \cdot \varphi_y \\
 w(x, y, z) &= w_0(x, y)
 \end{aligned}
 \tag{AP6-51}$$

Die Verformungen, bzw. die Herleitung der obigen Gleichungen kann mithilfe von Abbildung 87 nachvollzogen werden.

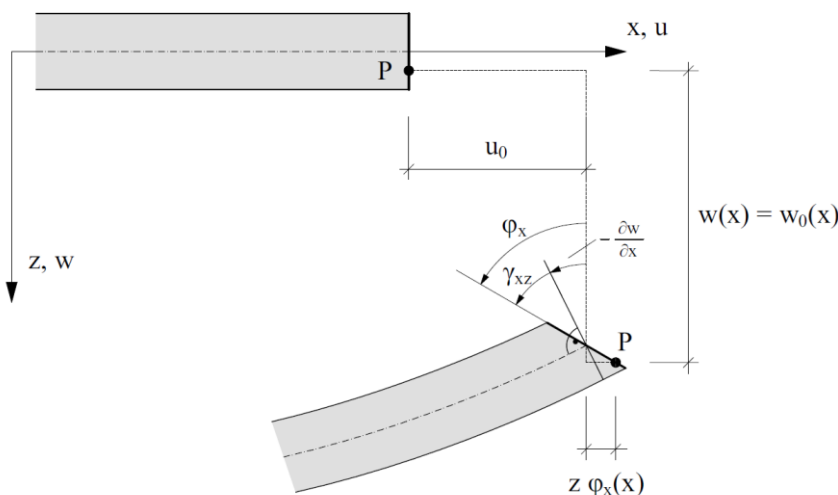


Abbildung 87: Verformungen eines Schalenelementes [3]

Die Ableitung der oben genannten Verformungsgleichungen resultiert in den Dehnungen. Die Dehnung in der Ebene $\boldsymbol{\varepsilon}$ setzen sich zusammen aus den Membrandehnungen $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ und den Dehnungen aus Biegung $\boldsymbol{\varepsilon}_b$. In Gleichung (AP6-52) ist die Ermittlung der Dehnungen in der Ebene angegeben. Die transversalen Schubdehnungen $\boldsymbol{\gamma}$ sind in Gleichung (AP6-53) angegeben.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\varepsilon}_m + \bar{z} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_b = \begin{bmatrix} u_{0,x} \\ v_{0,y} \\ u_{0,y} + v_{0,x} \end{bmatrix} + \bar{z} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{x,x} \\ \varphi_{y,y} \\ \varphi_{x,y} + \varphi_{y,x} \end{bmatrix} \quad (\text{AP6-52})$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_x - w_{0,x} \\ \varphi_y - w_{0,y} \end{bmatrix} \quad (\text{AP6-53})$$

Für die Berechnung der Laminatsteifigkeitsmatrix müssen die Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Schichten bekannt sein. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Ebene der einzelnen Schicht wird in Gleichung (AP6-54) nach [3] dargestellt, wobei \overline{Q}_{ij}^k die elastischen Konstanten der Schicht k in Richtung der gewählten Koordinatenausrichtung des Laminats sind. Die technische Schubdehnung γ_{xy} ist definiert als das Zweifache der rechnerischen Dehnung mit $\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{xy}$. Die Dehnungen und Spannungen sind in Gleichung (AP6-54) ebenfalls in Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats angegeben.

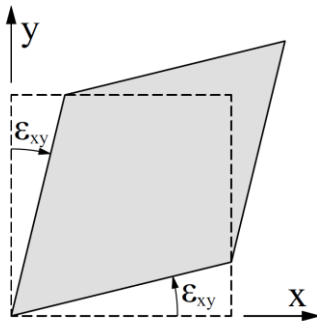


Abbildung 88: Darstellung eines Elementes in purer Schubverformung [3]

$$\boldsymbol{\sigma}^k = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{1,1} & \overline{Q}_{1,2} & \overline{Q}_{1,6} \\ \overline{Q}_{1,2} & \overline{Q}_{2,2} & \overline{Q}_{2,6} \\ \overline{Q}_{1,6} & \overline{Q}_{2,6} & \overline{Q}_{6,6} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}^k = \overline{\boldsymbol{Q}}^k \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^k \quad (\text{AP6-54})$$

Mit:

$\boldsymbol{\sigma}^k$ = Normalspannung der Schicht k mit Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats

$\overline{\boldsymbol{Q}}^k$ = Steifigkeit der Schicht k mit Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats

$\boldsymbol{\varepsilon}^k$ = Dehnung der Schicht k mit Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung für transversalen Schub ist in Gleichung (AP6-55) angegeben. Die Spannungen und Dehnungen sowie die Steifigkeiten sind auch hier in Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats angegeben.

$$\boldsymbol{\tau}_z^k = \begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} k_{13}^2 \cdot \overline{Q}_{S,1,1} & k_{13} \cdot k_{23} \cdot \overline{Q}_{S,1,2} \\ k_{13} \cdot k_{23} \cdot \overline{Q}_{S,2,1} & k_{23}^2 \cdot \overline{Q}_{S,2,2} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}^k = \overline{\boldsymbol{Q}}_S^k \cdot \boldsymbol{\gamma}^k \quad (\text{AP6-55})$$

Mit:

$\boldsymbol{\tau}_z^k$ = Schubspannung der Schicht k mit Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats

$\overline{\boldsymbol{Q}}_S^k$ = Schubsteifigkeit der Schicht k mit Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats

$\boldsymbol{\gamma}^k$ = Transversale Schubdehnung der Schicht k mit Bezug auf das Koordinatensystem des Laminats

Die Steifigkeit der einzelnen Schicht k bezüglich des lokalen Koordinatensystems der Schicht k kann mit Gleichung (AP6-56) für Steifigkeiten in der Ebene und mit Gleichung (AP6-57) für Steifigkeiten transversal zur Ebene beschrieben werden.

$$\mathbf{Q}^k = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{AP6-56})$$

Mit:

E_1 = Elastizitätsmodul in Faserrichtung

E_2 = Elastizitätsmodul quer zur Faser

ν_{12}, ν_{21} = Querdehnzahl (i.d.R. im Holzbau zu null gesetzt)

G_{12} = Schubmodul in Faserrichtung

$$\mathbf{Q}_S^k = \begin{bmatrix} G_{13} & 0 \\ 0 & G_{23} \end{bmatrix} \quad (\text{AP6-57})$$

Mit:

G_{13} = Schubmodul in Faserrichtung

G_{23} = Rollschubmodul

Mithilfe von Transformationsmatrizen können Steifigkeiten, Dehnungen und Spannungen zwischen dem Koordinatensystem des Laminates und des der einzelnen Schicht transformiert werden. Gleichung (AP6-58) und (AP6-59) zeigen die Transformationsmatrizen, wobei $s = \sin(\theta)$, $c = \cos(\theta)$ und θ der Abweichungswinkel zwischen dem Koordinatensystem der Schicht und dem Koordinatensystem des Laminates sind.

$$\mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2 \cdot c \cdot s \\ s^2 & c^2 & 2 \cdot c \cdot s \\ c \cdot s & -c \cdot s & c^2 - s^2 \end{bmatrix}^k \quad (\text{AP6-58})$$

$$\mathbf{T}_{S,k} = \begin{bmatrix} c & -s \\ s & c \end{bmatrix}^k \quad (\text{AP6-59})$$

Die Transformation der Steifigkeiten von dem Koordinatensystem der einzelnen Schicht zu dem des Laminates erfolgt mit Gleichung (AP6-60) für Steifigkeiten in der Ebene und mit Gleichung (AP6-61) für Steifigkeiten transversal zur Ebene.

$$\overline{\mathbf{Q}}^k = \mathbf{T}_k \cdot \mathbf{Q}^k \cdot \mathbf{T}_k^T \quad (\text{AP6-60})$$

$$\overline{\mathbf{Q}}_S^k = \mathbf{T}_{S,k} \cdot \mathbf{Q}_S^k \cdot \mathbf{T}_{S,k}^T \quad (\text{AP6-61})$$

Das mechanische Verhalten eines Laminates kann über Gleichung (AP6-62) beschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_m \\ \boldsymbol{\varepsilon}_b \end{bmatrix} = \mathbf{C}_p \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (\text{AP6-62})$$

Mit:

$\mathbf{N} = [N_x \quad N_y \quad N_{xy}]^T$ als Normalkraftresultierende

$\mathbf{M} = [M_x \quad M_y \quad M_{xy}]^T$ als Momentresultierende

\mathbf{A} als die [3x3] Scheibensteifigkeitsmatrix des Laminats

\mathbf{B} als die [3x3] Kopplungssteifigkeitsmatrix des Laminats

\mathbf{D} als die [3x3] Biegesteifigkeitsmatrix des Laminats

\mathbf{C}_p als die zusammengefasste Steifigkeitsmatrix des Laminates für Scheibenbeanspruchung und Biegung ohne transversalen Schub

Die **ABD**-Matrix besteht aus drei verschiedenen Submatrizen, die zusammen das elastische Verhalten des Laminats beschreiben. Abbildung 89 zeigt die resultierenden Verformungen aus den Einträgen der **ABD**-Matrix. Die Submatrix **A** beinhaltet die Steifigkeitseinträge des Laminates hinsichtlich der

Scheibenbeanspruchung. Die Submatrix **B** beinhaltet die Kopplungssteifigkeiten des Laminates. Diese koppelt Verformungen in der Ebene zu Verformungen transversal zur Ebene. Bei symmetrischen Laminaten (üblicherweise bei BSP) ergibt sich die Kopplungssteifigkeit zu einer Nullmatrix. Submatrix D beinhaltet die Steifigkeitswerte des Laminates gegen Biegung und Verdrillung.

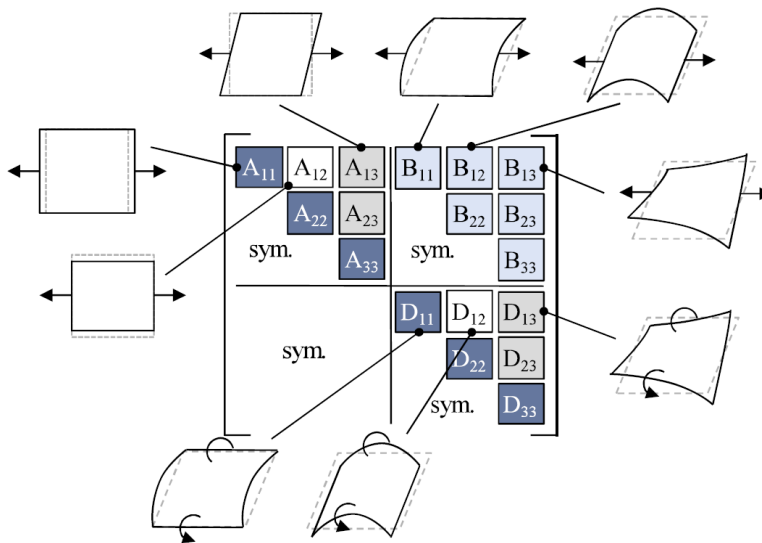


Abbildung 89: Graphische Darstellung der Steifigkeitsanteile der ABD-Matrix [52]

Nach Altenbach [38] lassen sich die Steifigkeitseinträge der **ABD**-Matrix mit Hilfe der Gleichungen (AP6-63) bis (AP6-65) berechnen, wobei n die Anzahl der Lagen, \overline{Q}_{ij}^k die ausgerichteten Materialparameter der Schicht, z_k die obere Grenze der Schicht (siehe Abbildung 86) und z_{k-1} die untere Grenze der Schicht sind.

$$A_{i,j} = \sum_{k=1}^n (z_k - z_{k-1}) \cdot \overline{Q}_{ij}^k \quad i, j = \{1; 2; 6\} \quad \hat{i}, \hat{j} = \{1; 2; 3\} \quad (\text{AP6-63})$$

$$B_{i,j} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k^2 - z_{k-1}^2) \cdot \overline{Q}_{ij}^k \quad i, j = \{1; 2; 6\} \quad \hat{i}, \hat{j} = \{1; 2; 3\} \quad (\text{AP6-64})$$

$$D_{i,j} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{k=1}^n (z_k^3 - z_{k-1}^3) \cdot \overline{Q}_{ij}^k \quad i, j = \{1; 2; 6\} \quad \hat{i}, \hat{j} = \{1; 2; 3\} \quad (\text{AP6-65})$$

Bei transversalem Schub kann das Verhalten des Laminates mit Gleichung (AP6-66) beschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{13}^2 \cdot C_{1,1} & k_{13} \cdot k_{23} \cdot C_{1,2} \\ k_{13} \cdot k_{23} \cdot C_{1,2} & k_{23}^2 \cdot C_{2,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_s \cdot \boldsymbol{\gamma} \quad (\text{AP6-66})$$

Mit:

Q_x, Q_y als Querkraftresultierende

k_{13}, k_{23} als Schubkorrekturfaktoren

$$C_{i,j} = \sum_{k=1}^n (z_k - z_{k-1}) \cdot \overline{Q}_{S,i,j}^k \quad i, j = \{1; 2\}$$

\mathbf{C}_s als die transversale Schubsteifigkeitsmatrix des Laminates

Die Schubkorrekturfaktoren werden benötigt um die tatsächlichen Schubsteifigkeiten anzunähern, da diese ohne die Beiwerte überschätzt werden würden. Durch die Annahme eines konstanten Schubspannungsverlaufes und der Tatsache, dass bei dieser Annahme die Schubspannungen am Rand des Verbundquerschnittes nicht null sind, muss eine Abminderung der Steifigkeiten durchgeführt werden. Schubkorrekturbeiwerte wurden nach [38] u.a. von Vlachoutsis [39], Altenbach [40], Whitney [41] sowie Gruttmann und Wagner [42] erforscht.

Die oben hergeleiteten Steifigkeiten sind als Materialsteifigkeitsmatrizen unter Berücksichtigung der Dicke anzusehen. Diese Matrizen können nun in der Finiten Elemente Methode angewendet werden, um Elementsteifigkeitsmatrizen und schlussendlich globale Systemsteifigkeitsmatrizen zu erstellen. Die Weiterverwendung der Materialsteifigkeitsmatrizen hängt von den jeweiligen FEM- Programmen intern ab und wird hier nicht behandelt. Einige FEM-Programme bieten die Möglichkeit Lamine mit speziellen Modulen oder direkt bei der Querschnittseingabe zu modellieren und zu berechnen. Die oben gezeigte Herleitung soll zur Überprüfung der Steifigkeitswerte dienen.

Um zu zeigen, dass mithilfe der Laminattheorie und einer 2D Flächenmodellierung in FEM das γ -Verfahren sowie das Schubanalogieverfahren adequat ersetzt werden können, wird im Anhang AP6 eine Beispielrechnung an einem ausgewählten System gezeigt. Darin hat sich ergeben, dass die Laminattheorie in dem ausgewählten Beispiel zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie die beiden etablierten Modellierungsmethoden führt.

4.2.2 Leitfaden für die 2D-Modellierung mit der Laminattheorie

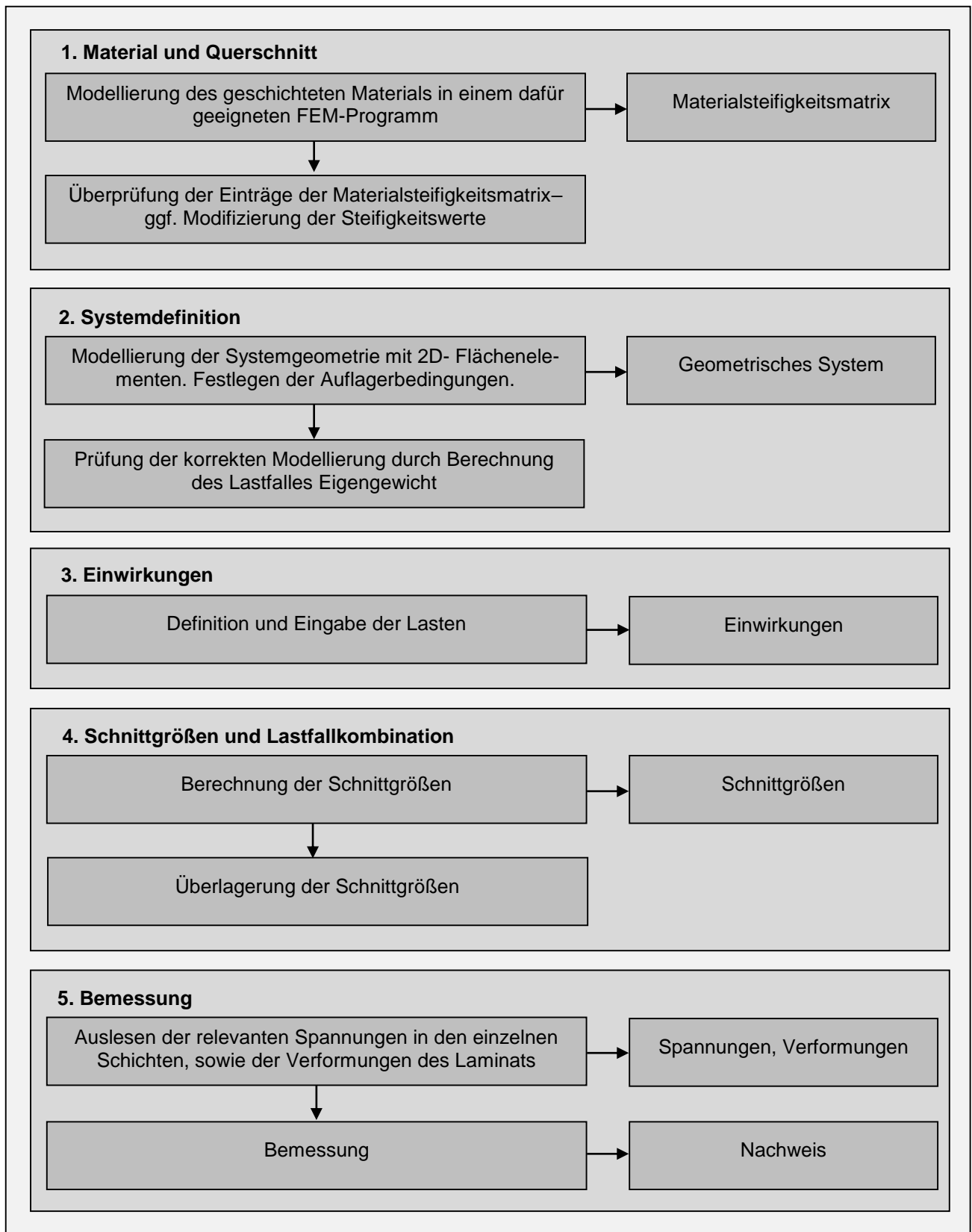


Abbildung 90: Leitfaden für Modellierung mit der Laminattheorie

4.3 Erweiterte Bemessung von Brettsperrholz

4.3.1 Punktgestützte Brettsperrholzdecken

Vor allem im modernen Hochbau kommen immer häufiger punktgestützte Decken zum Einsatz, da die Verwendung von Stützen anstelle von Wänden eine große Nutzungsflexibilität im Lebenszyklus des Gebäudes bietet. Mit der punktuellen Auflagerung der Decke sind aufgrund der konzentrierten Einwirkung in vielen Fällen konstruktive Maßnahmen erforderlich um die Standsicherheit des Bauteils zu gewährleisten. Als Verstärkungsmaßnahme kommen u.a. Fallplatten, Stützenkapitelle, Vollgewindeschrauben sowie komplexere Systeme wie der Spider Connector zum Einsatz. Die Bemessung der Platte hängt demnach grundlegend von der Verstärkungsmaßnahme ab. Abbildung 91 zeigt ein mögliches Vorgehen bei der Bemessung von BSP-Platten in punktgestützten Bereichen.

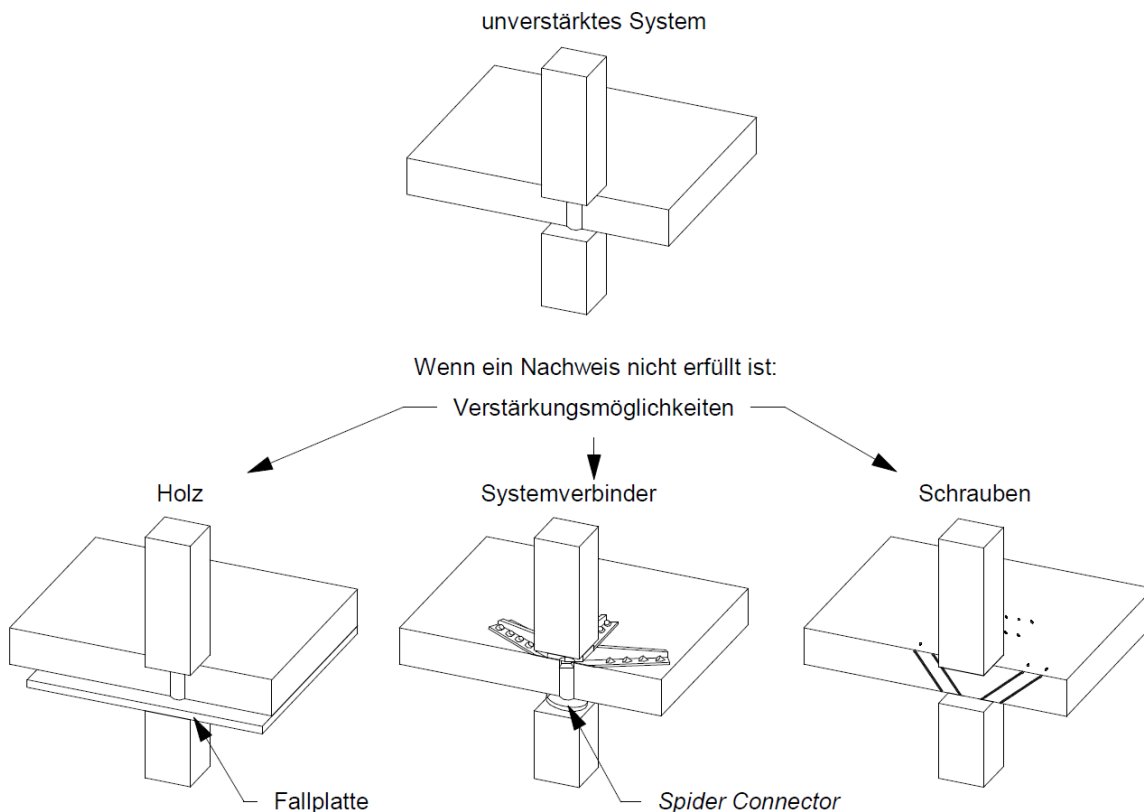


Abbildung 91: Vorschlag zum Vorgehen bei der Bemessung [43]

Im Folgenden werden die oben genannten Verstärkungsszenarien hinsichtlich der Bemessung ausgearbeitet und im Anschluss miteinander verglichen.

Ohne Verstärkung

Mestek verwendet in [7] das Schubanalogieverfahren um eine punktgestützte BSP-Platte zu modellieren und zu berechnen. Hierfür wird das in Abbildung 92 abgebildete System angewandt. Auch bei den punktgestützten Bereichen, verändert sich die Grundidee des Schubanalogieverfahrens nicht. Es werden zwei Ebenen (A und B), wie in Kapitel IV.2 angegeben, berechnet. Unterschiedlich zum grundsätzlichen Verfahren ist die Koppelung des Stützenkopfes mit der BSP-Platte durch nachgiebige Federn. In [7] wird der Stützenkopf nach Mestek in vielen Fällen mit einer Stahlplatte ausgeführt. Diese Annahme hat lediglich für die Abmessung des Auflagers Relevanz und wird nicht weiter behandelt.

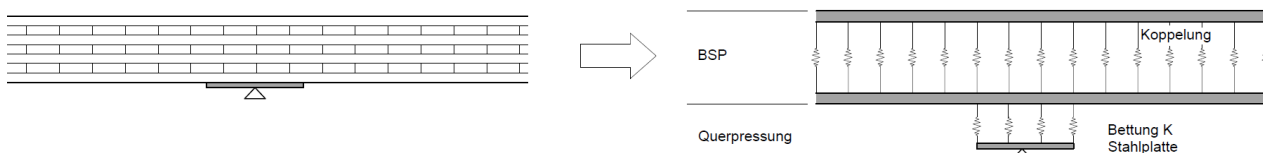


Abbildung 92: System im Schubanalogieverfahren zur Berechnung der punktgestützten BSP-Decke nach Mestek [7]

Mit:

- $\sigma_{c,z,d}$ = Querdruckspannung
- $k_{c,90}$ = Beiwert zur Berücksichtigung der Lastausbreitung gemäß Gleichung (AP6-80)
- $f_{c,z,d}$ = Querdruckfestigkeit von BSP
- k_{mat} = Faktor zur Berücksichtigung des Materialverhaltens

Der Beiwert zur Berücksichtigung der Lastausbreitung kann gemäß Abbildung 95 nach Gleichung (AP6-80) berechnet werden.

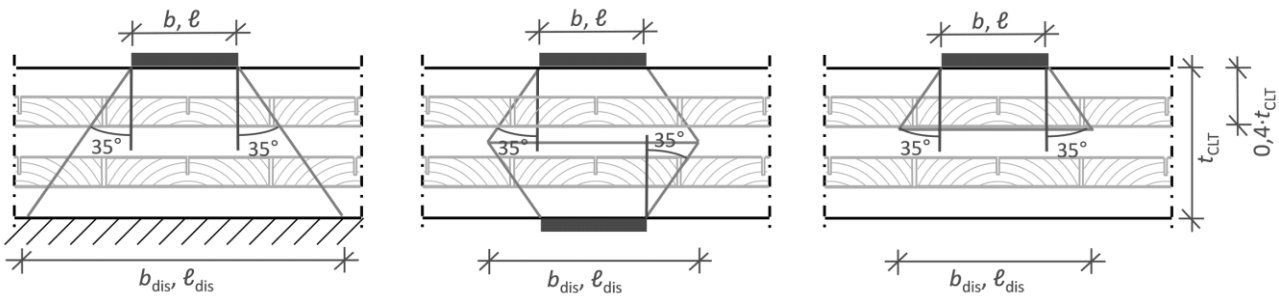


Abbildung 95: Lastausbreitung bei Querdruck [6]

$$k_{c,90} = \sqrt{\frac{b_{dis} \cdot l_{dis}}{b \cdot l}} \leq 4 \tag{AP6-80}$$

Mit:

- b_{dis} = Abmessung der Nachweisfläche in Nebentragrichtung
- l_{dis} = Abmessung der Nachweisfläche in Haupttragrichtung
- b, l = Abmessungen der Lasteinleitungsfläche

Mit Verstärkung durch Fallplatte oder Stützenkapitell

Bei der Verstärkung der punktgestützten Bereiche mittels Verstärkungsmöglichkeiten aus Holz können entweder Fallplatten oder Stützenkapitelle ausgebildet werden. Der wesentliche Unterschied zwischen Stützenkapitell und Fallplatte ist der, dass das Stützenkapitell die Auflagerfläche erhöht, während die Fallplatte den Querschnitt im Bereich der Punktstützung stärkt. Der Unterschied beider Varianten wird in Abbildung 96 verdeutlicht.

Stützenkapitell: Durch das Stützenkapitell werden sowohl die Schubspannung durch die Vergrößerung des kritischen Rundschnittes, sowie auch die Beigemomente aufgrund der größeren Ausrundung durch die größere Auflagefläche verringert. Das Stützenkapitell wird in der Regel aus Laubholz ausgeführt, da Laubholz höhere Festigkeiten vorweist als Nadelholz.

Fallplatte: Durch die Fallplatte wird in dem Bereich der Punktstützung ein höherer Querschnitt geschaffen, der im Vergleich zur unverstärkten Platte höhere Festigkeiten und Steifigkeiten vorweist. Die Auflagerfläche für die eigentliche BSP-Platte erhöht sich aufgrund der geringen Höhe der Fallplatte kaum.

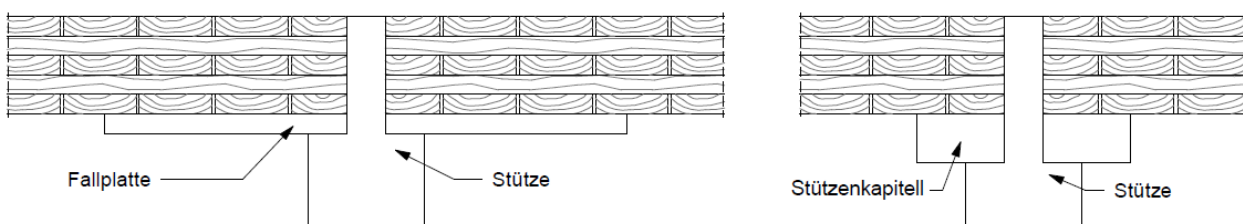


Abbildung 96: Unterschied von Stützenkapitell und Fallplatte [43]

Der folgende Abschnitt zeigt die Bemessung eines Stützenkapitells nach Muster [45]. Dabei müssen nach [45] die folgenden Anwendungsgrenzen eingehalten sein:

- BSP aus Fichtenholz (*picea abies*)
- Nur Kurzzeiteffekte berücksichtigt
- Nur Nutzungsklasse 1
- BSP-Platten mit einer Dicke zwischen 60 mm und 360 mm
- Anzahl der Schichten zwischen 3 und 9
- Größe der Öffnung zwischen 50 mm und 300 mm
- Größe der Auflagerung zwischen 100 mm und 400 mm

Berechnung des Nachweises für **Querdruck** nach Muster [45]:

Die Querdruckspannungen können gemäß Muster mit Gleichung (AP6-81) berechnet werden. Dabei ist $\sigma_{c,90,ef}$ die effektive Querdruckspannung, $\sigma_{c,90}$ die Querdruckspannung bezüglich der wahren Auflagerfläche, k_{col} der Faktor zur Anpassung der Druckspannung quer zur Faser und v_x, v_y die Querkraft in x- bzw. y- Richtung.

$$\sigma_{c,90,ef} = \sigma_{c,90} \cdot k_{col} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\max(v_x, v_y)}{v_x + v_y} \right) \quad (\text{AP6-81})$$

Der Beiwert k_{col} zur Erhöhung der Spannungen in Abhängigkeit der Punktstützung kann nach Muster mit Gleichung (AP6-82) ermittelt werden.

$$k_{col} = \max \left\{ k_{c,90,0} + k_{c,90,sup} \cdot \frac{d_{sup}}{1.0} - k_{c,90,t} \cdot t_{BSP} \right\} \quad (\text{AP6-82})$$

Mit:

- $k_{c,90,0}$ = Allgemeiner Faktor nach Tabelle 47
- $k_{c,90,sup}$ = Parameter zur Berücksichtigung der Stützenbreite nach Tabelle 47
- d_{sup} = Stützenbreite
- $k_{c,90,t}$ = Parameter zur Berücksichtigung der Plattendicke nach Tabelle 47
- t_{BSP} = Höhe des BSP- Querschnittes

Tabelle 47: Parameter für die Berechnung von k_{col} nach Muster [45]

Stützenform	$k_{c,90,0}$	$k_{c,90,sup}$	$k_{c,90,t}$
rund	0.6	0.0035	0.0025
rechteckig	0.7	0.0080	0.0065

Die Design- Querdruckfestigkeit $f_{c,90,d}$ des BSP-Elementes kann mit Gleichung (AP6-83) berechnet werden.

$$f_{c,90,d} = f_{c,90,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \quad (\text{AP6-83})$$

Der Nachweis ergibt sich unter Verwendung des Beiwertes zur Berücksichtigung der Erhöhung der Druckfestigkeit $k_{c,90}$ in Gleichung (AP6-84).

$$\sigma_{c,90,ef} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \quad (\text{AP6-84})$$

Der Beiwert kann aus dem Verhältnis der tatsächlichen Auflagerfläche A_c sowie der effektiven Auflagerfläche $A_{c,ef}$ mit Gleichung (AP6-85) berechnet werden.

$$k_{c,90} = \sqrt{\frac{A_{c,ef}}{A_c}} \quad (\text{AP6-85})$$

Berechnung des Nachweises für **Rollschub** nach Muster [45]:

Muster verwendet die Streifenmethode in Kombination mit einem Trägerrost um die Auflagerkräfte ausreichend genau bestimmen zu können. Hierfür werden die Parameter β_x sowie β_y verwendet, welche Abhängig sind von den Spannweiten l_x, l_y und den Biegesteifigkeiten EI_x, EI_y in den unterschiedlichen Richtungen. Der Parameter β_x kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\beta_x = \frac{1}{2} \cdot \frac{l_y}{l_x} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{EI_x}{EI_x + EI_y} \right) \tag{AP6-86}$$

Es folgt die Berechnung von β_y mit Gleichung (AP6-87).

$$\beta_y = 1 - \beta_x \tag{AP6-87}$$

Es folgt für die Aufteilung der Last in x- und y Richtung mithilfe der oben berechneten Parameter:

$$q_{x/y} = \beta_{x/y} \cdot q \tag{AP6-88}$$

Abbildung 97 zeigt das Grundsystem sowie die Aufteilung der Last auf die jeweiligen Streifen und die Auflagerkräfte welche mit Gleichung (AP6-90) nach Muster [45] berechnet werden können.

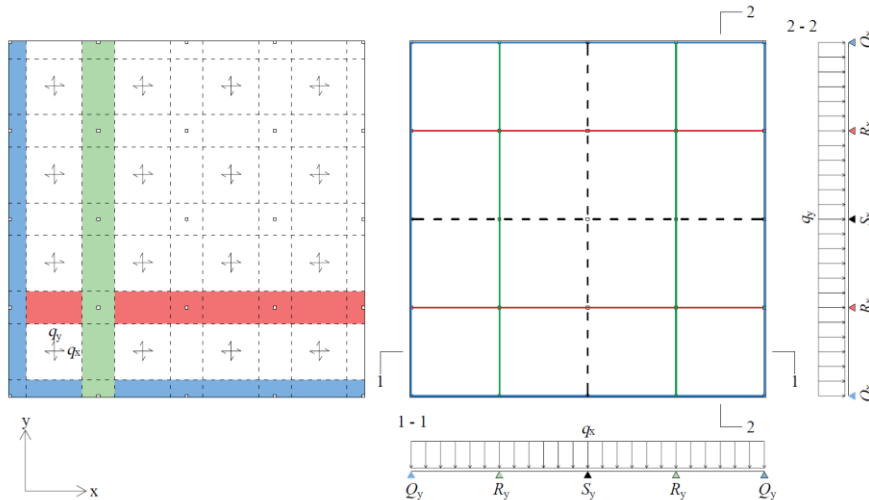


Abbildung 97: Streifenmethode als Trägerrost zur Ermittlung der Auflagerkräfte [45]

$$\begin{aligned} Q_x &= 0.4 \cdot q_y \cdot l_y & Q_y &= 0.4 \cdot q_x \cdot l_x \\ R_x &= 1.14 \cdot q_y \cdot l_y & R_y &= 1.14 \cdot q_x \cdot l_x \\ S_x &= 0.93 \cdot q_y \cdot l_y & S_y &= 0.93 \cdot q_x \cdot l_x \end{aligned} \tag{AP6-90}$$

Die Auflagerkraft der inneren Stützung ergibt sich lt. Muster zu:

$$F_{int} = R_x \cdot 1.14 \cdot l_x + R_y \cdot 1.14 \cdot l_y = 1.3 \cdot (l_x \cdot l_y) \cdot q \tag{AP6-91}$$

Die Rollschubspannungen $\tau_{R,x,y}$ können anschließend gemäß Muster mit den Gleichungen (AP6-92) (für rechteckige Stützen) und (AP6-93) für runde Stützen ermittelt werden.

$$\tau_{R,x,y} = \frac{1.5 \cdot F_{int} \cdot (0.5 + \beta_{x,y})}{4 \cdot (d_{sup,x,y} + \tan 35^\circ \cdot t_{BSP}) \cdot t_{BSP}} \tag{AP6-92}$$

$$\tau_{R,x,y} = \frac{1.5 \cdot F_{int} \cdot (0.5 + \beta_{x,y})}{(d_{sup,x,y} + \tan 35^\circ \cdot t_{BSP}) \cdot \pi \cdot t_{BSP}} \tag{AP6-93}$$

Mit:

- $d_{sup,x,y}$ = Auflagerbreite
- t_{BSP} = Dicke der BSP- Platte

Für Punktstützungen am Rand der Platte muss gemäß Muster ein Faktor k_A (siehe Tabelle 48) ergänzt werden, da Mestek und Dietsch [46] herausgefunden haben, dass die berechneten Rollschubspannungen geringer waren, als die tatsächlich vorhandenen. Weiters muss gemäß Muster der Faktor k_{Edge} zur Berücksichtigung von Öffnungen im Bereich der Punktstützung (vgl. Abbildung 98) eingeführt werden, der die Erhöhung der Spannungen aufgrund der Öffnung berücksichtigt. Mit folgender Gleichung nach Muster [45] kann der Faktor k_{Edge} berechnet werden.

$$k_{Edge} = 1 + \frac{d_{op}}{3 \cdot d_{sup}} \tag{AP6-94}$$

Mit:

$d_{op} =$ Öffnung bei der Punktstützung

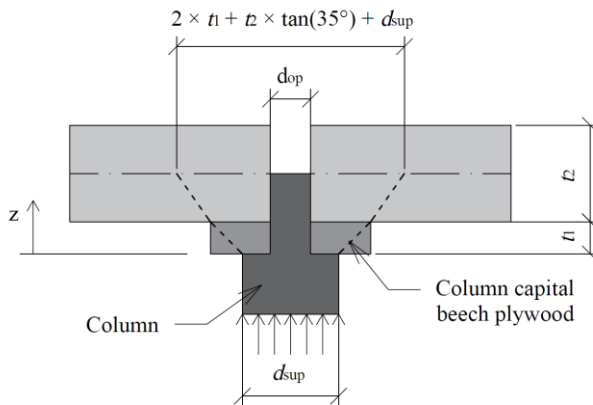


Abbildung 98: Definition der Abmessungen [45]

Tabelle 48: Faktor k_A nach Mestek und Dietsch aus [45]

$d_{sup,ef}/t_{BSP}$	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 2.0
k_A	1.35	1.50	1.65

Die Rollschubspannung in der BSP- Platte bei einer Randstütze kann gemäß Muster mit folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\tau_R = \frac{1.5 \cdot V_{edge,r,l} \cdot k_A \cdot k_{Edge}}{\left(d_{sup} + \tan 35^\circ \cdot t_{BSP} \cdot \frac{1}{2}\right) \cdot t_{BSP}} \quad (AP6-95)$$

Mit:

$V_{edge,r,l} =$ Querkraft am Schnitufer nach Muster [45]

Der Nachweis der Rollschubspannungen ergibt sich nach Muster folglich zu:

$$\tau_R \leq \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{r,pu} \cdot f_{R,k} \quad (AP6-96)$$

Mit:

$k_{r,pu} = 1.6$ Anpassungsfaktor des Rollschubwiderstands bei punktgestützten BSP- Platten nach Mestek [47]

$f_{R,k} =$ Charakteristische Rollschubfestigkeit des BSP- Elementes

Berechnung des Nachweises für **Biegung** nach Muster [45]:

An den Innenstützen kann das Moment gemäß Muster [45] mit Gleichung (AP6-97) unter Berücksichtigung der Auflagerbreite und der resultierenden Ausrundung des Momentenverlaufes berechnet werden.

$$M_{int,x} = \frac{F_{int} \cdot \beta_x \cdot l_x}{10} - \frac{F_{int} \cdot \beta_x \cdot d_{sup,ef,x}}{8} \quad (AP6-97)$$

$$M_{int,y} = \frac{F_{int} \cdot \beta_y \cdot l_y}{10} - \frac{F_{int} \cdot \beta_y \cdot d_{sup,ef,y}}{8}$$

Die Spannung lässt sich nun ermitteln zu:

$$\sigma_{m,x} = \frac{M_{int,x}}{I_x} \cdot z_x \quad (AP6-98)$$

$$\sigma_{m,y} = \frac{M_{int,y}}{I_y} \cdot z_y$$

Die effektive Spannung unter Berücksichtigung der Öffnung im Bereich der Punktstützung kann mithilfe des Parameters k_{SC} in folgender Gleichung nach Muster berechnet werden.

$$\sigma_{m,ef} = k_{SC} \cdot \sigma_m \quad (\text{AP6-99})$$

Der Parameter k_{SC} kann mit Hilfe der folgenden Gleichung und Tabelle 49 berechnet werden.

$$k_{SC} = k_{0,SC} + d_{op} \cdot k_{op,SC} + d_{sup} \cdot k_{sup,SC} + t_{BSP} \cdot k_{t,SC} \quad (\text{AP6-100})$$

Mit:

$k_{0,SC}$ = Beiwert nach Tabelle 49

$k_{op,SC}$ = Beiwert nach Tabelle 49

$k_{sup,SC}$ = Beiwert nach Tabelle 49

$k_{t,SC}$ = Beiwert nach Tabelle 49

Tabelle 49: Parameter zur Berechnung von k_{SC} nach Muster [45]

	$k_{0,SC}$	$k_{op,SC}$	$k_{sup,SC}$	$k_{t,SC}$
Edge column	1.10	00050	-0.00033	0.00050
Interior column	1.05	0.0025	-0.00010	0.00025

Mit Verstärkung durch Systemverbinder (SPIDER Connector- Rothoblaas)

Der Spider Connector ist ein metallisches Verstärkungsmittel bei Punktstützungen für BSP- Decken. Forschung hierzu wurde u.a. betrieben von Maurer [48]. Durch die Lastdurchleitung über die Verstärkungsmaßnahme wird die BSP-Platte nicht durch Lasten von darüberliegenden Geschossen auf Querdruck belastet. Weiters verstärken die Vollgewindeschrauben die BSP-Elemente gegen ein Rollschubversagen. Durch die Montage des Spider Connectors auf der Oberseite der BSP-Platte erhöht sich nach [49] ebenso die Biegebeanspruchbarkeit. Abbildung 99 zeigt die Zusammensetzung und die Beanspruchung des Spider Connectors mit $F_{co,up,d}$ als Einwirkung aus den oberen Geschossen und $F_{slab,d}$ als Einwirkung aus dem betrachteten Geschoss.

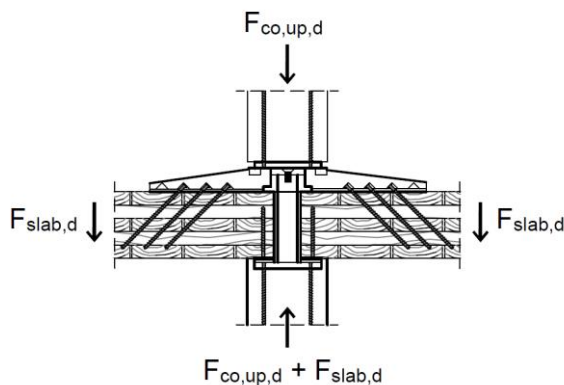


Abbildung 99: Einwirkungen auf den Spider Connector [48]

Bei der hier gezeigten Bemessung wird nach dem Technischen Datenblatt von Rothoblaas [50] vorgegangen. Gemäß Rothoblaas muss die BSP-Platte einige Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit des Spider Connectors erfüllen (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 50: Notwendige Eigenschaften der BSP- Platte nach Rothoblaas [50]

Parameter	$160 \text{ mm} \leq t_{BSP} < 200 \text{ mm}$	$t_{BSP} \geq 200 \text{ mm}$
EI_x/EI_y	0.68 – 1.46	0.84 – 1.19
GA_{zx}/GA_{zy}	0.71 – 1.40	0.76 – 1.31
$\min(EI_x, EI_y)$	1525 kNm ² /m	3344 kNm ² /m
$\max(EI_x, EI_y)^*$	2229 kNm ² /m	3989 kNm ² /m
$\min(GA_{zx}, GA_{zy})$	11945 kN/m	17708 kN/m
$\max(GA_{zx}, GA_{zy})^*$	16769 kN/m	23261 kN/m
t_{lam}	$\leq 40 \text{ mm}$	$\leq 40 \text{ mm}$
b_{lam}/t_{lam}	≥ 3.5	≥ 3.5
Mindestfestigkeitsklasse gemäß EN 338	C 24 / T14	C 24 / T14
Maßtoleranz bei der Stärke der BSP- Platte	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ mm}$

*Nach Bauer [43] sind die Maximalwerte aus den Versuchen in die Voraussetzungen übernommen worden. In [43] ist angemerkt, dass gemäß Rothoblaas auch höhere Steifigkeitswerte der BSP- Platte möglich sind.

Folgende Versagensmechanismen des Spider Connectors müssen gemäß Rothoblaas [50] überprüft und nach ETA-19/0700 [51] nachgewiesen werden:

- $R_{timber,up,d}$ Druck des oberen Holzelements
- $R_{timber,down,d}$ Druck des unteren Holzelements
- $R_{tp,d}$ Biegung der oberen Platte
- $R_{bp,d}$ Biegung der unteren Platte
- $R_{b,d}$ Kompression des Zylinders
- $R_{lt,d}$ Übertragung der Lasten

Abbildung 100 zeigt die möglichen Versagensmechanismen des Spider Connectors. Diese Nachweise können gemäß ETA-19/0700 [51] durchgeführt werden und werden hier nicht gesondert behandelt. Die Versagensmöglichkeiten der BSP-Platte sind in obiger Aufzählung und in Abbildung 100 nicht aufgeführt.

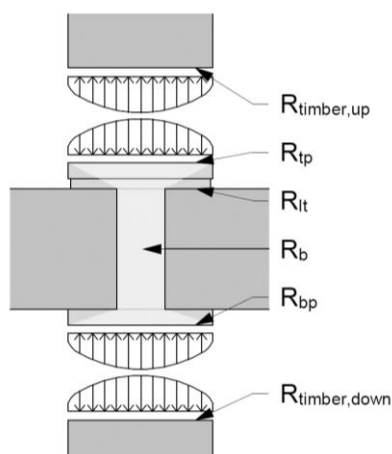


Abbildung 100: Versagensmechanismen nach Rothoblaas [50] aus [43]

Der Querkraftnachweis der BSP- Platte wird durch den Durchstanznachweis an der Punktstützung geführt und kann gemäß ETA-19/0700 [51] durchgeführt werden. Gleichung (AP6-101) zeigt die Berechnung der Design-Durchstanzfestigkeit $F_{PILLAR,Rd}$ der BSP-Platte in Kombination mit dem Systemverbinder gemäß ETA-19/0700 [51], mit k_{mod} als Beiwert zur Berücksichtigung der Nutzungsklasse und der Klasse der Lasteinwirkungsdauer sowie dem Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Holzwerkstoffe.

$$F_{PILLAR,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{PILLAR,Rk}}{\gamma_M} \quad (\text{AP6-101})$$

Mit:

$$F_{PILLAR,Rk} = \text{Charakteristische Durchstanzfestigkeit nach Tabelle A4.6 der ETA-19/0700 [51]}$$

Der Nachweis auf Durchstanzen folgt dann mit Gleichung (AP6-102), wobei $F_{PILLAR,Ed}$ die einwirkende Querkraft am Schnittufer ist.

$$\frac{F_{PILLAR,Ed}}{F_{PILLAR,Rd}} \leq 1.0 \tag{AP6-102}$$

Mit Verstärkung durch Schrauben

Die Verstärkung der BSP-Platte im Bereich von Punktstützungen mittels Schrauben wurde in hohem Maße von Peter Mestek in [47] erforscht. Mestek hat für die Berechnung einer mit Schrauben verstärkten BSP-Platte ein Fachwerkmodell aufgestellt, welches das Tragverhalten der BSP-Platte mit den Vollgewindeschrauben als Verstärkung widerspiegelt.

Basierend auf experimentellen Untersuchungen leitete Mestek Bemessungsgleichungen unter den folgenden Randbedingungen ab:

- Symmetrischer Querschnittsaufbau
- Vollgewindeschrauben im 45° Winkel
- Minimale und maximale Abstände der Vollgewindeschrauben nach Gleichung (AP6-103)

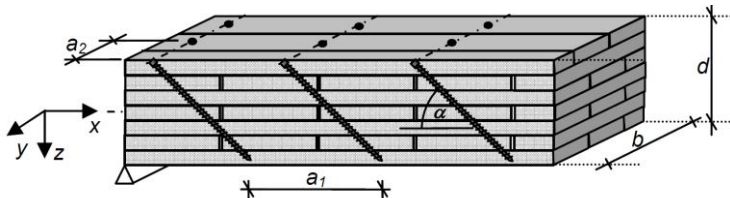
$$\frac{t_{BSP}}{3} \leq a_1 \leq t_{BSP}$$

$$\frac{t_{BSP}}{3} \leq a_2 \leq 1.5 \cdot t_{BSP} \tag{AP6-103}$$

$$\alpha = 15^\circ$$

Mit:

- t_{BSP} = Dicke der BSP- Platte
- a_1, a_2 = Abstand der Schrauben
- α = nach Abbildung 101



Anwendungsgrenzen:

$$d/3 \leq a_1 \leq d$$

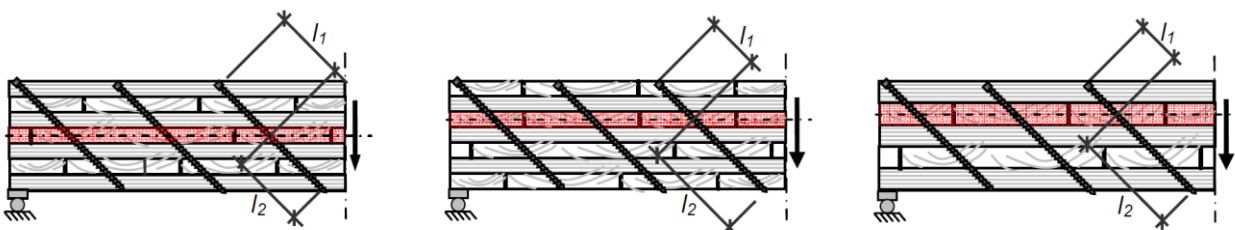
$$d/3 \leq a_2 \leq 1,5 \cdot d$$

$$\alpha = 45^\circ$$

Abbildung 101: Schraubenanordnung [47]

Die effektive Einbindelänge $l_{ef,x/y}$ kann lt. Mestek [47] nach Gleichung (AP6-104) berechnet werden, wobei $l_{1,x/y}$ sowie $l_{2,x/y}$ die Verankerungslängen der Schrauben, gemessen von der Schwerachse der maßgebenden Querlage bis zum oberen bzw. unteren Ende der Vollgewindeschraube, ist. Abbildung 102 zeigt schematisch die Verankerungslängen der Vollgewindeschrauben.

$$l_{ef,x/y} = \min \left\{ \begin{matrix} l_{1,x/y} \\ l_{2,x/y} \end{matrix} \right\} \tag{AP6-104}$$



--- Schwerachse der maßgebenden Querlage

Abbildung 102: Ermittlung der effektiven Einbindelänge [47]

Die Schubtragfähigkeit der Vollgewindeschrauben wird gemäß Mestek [47] größtenteils durch den Herauszieh Widerstand bestimmt. Der Herauszieh Widerstand der Schraube in x- oder y- Richtung $R_{ax,x/y}$ kann für Schrauben mit 45° Neigung mit Gleichung (AP6-105) berechnet werden.

$$R_{ax,x/y} = \min \left\{ \begin{array}{l} 24.8 \cdot d^{0.8} \cdot l_{ef,x/y}^{0.9} \\ R_{t,u} \end{array} \right\} \quad (\text{AP6-105})$$

Mit:

- d = Schraubendurchmesser
 $l_{ef,x/y}$ = Effektive Einbindelänge der Vollgewindeschraube in x- oder y- Richtung
 $R_{t,u}$ = Zugtragfähigkeit der Vollgewindeschraube

Im Folgenden werden sowohl die Tragfähigkeit auf Querdruck als auch auf Schub nach Mestek [47] aufbereitet. Der Querdruck wird u.a. für die Spannungsinteraktion von Rollschub- und Querdruckspannungen benötigt.

Berechnung des **Querdrucks** nach Mestek [47]:

Für die Querdruckermittlung nach Mestek wird der effektive Schraubenabstand $a_{2,ef}$ senkrecht zur Faserrichtung benötigt, welcher mit Gleichung (AP6-106) berechnet werden kann.

$$a_{2,ef} = \max \left\{ \begin{array}{l} a_2 \\ b_{ef,x}/n_{\perp} \end{array} \right\} \quad (\text{AP6-106})$$

Mit:

- $b_{ef,x}$ = Effektive Auflagerbreite in x-Richtung
 n_{\perp} = Anzahl der Schraubenreihen senkrecht zur betrachteten Tragrichtung

Die effektive Auflagerbreiten $b_{ef,x/y}$ lassen sich lt. Mestek mit Gleichung (AP6-107) ermitteln. Diese ergeben sich aus der tatsächlichen Lasteinleitungsweite $b_{sup,x/y}$ sowie der Gesamtdicke der BSP- Platte d_{BSP} und einem Lastausbreitungswinkel von 35°.

$$b_{ef,x/y} = b_{sup,x/y} + d_{BSP} \cdot \tan 35^{\circ} \quad (\text{AP6-107})$$

Die Querdruckspannung unter Berücksichtigung der effektiven Auflagerbreiten sowie der Verbindungsmittelabstände und der Herausziehfestigkeit der Vollgewindeschrauben kann lt. Mestek mit Gleichung (AP6-108) berechnet werden.

$$\sigma_{c,90} = \frac{F_{int}}{b_{ef,x} \cdot b_{ef,y}} + \frac{R_{ax}/\sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} \quad (\text{AP6-108})$$

Mit:

- F_{int} = Stützkraft
 $b_{ef,x}$ = Effektive Auflagerbreite in x- Richtung
 $b_{ef,y}$ = Effektive Auflagerbreite in y- Richtung
 R_{ax} = Herauszieh Widerstand einer Vollgewindeschraube
 a_1 = Schraubenabstand parallel zur betrachteten Tragrichtung
 $a_{2,ef}$ = effektiver Schraubenabstand senkrecht zur betrachteten Tragrichtung

Berechnung der Tragfähigkeit auf **Rollschub** nach Mestek [47]:

Folgende Voraussetzungen sind für das vereinfachte Verfahren zur Ermittlung der Rollschubspannungen nach Mestek einzuhalten:

- Symmetrischer Querschnitt
- Konstante Lamellendicke ($t_x = t_y$)
- Mindestens fünf und maximal 11 Schichten
- Quadratische Lasteinleitung- bzw. Auflagerflächen

Die Querkraft in Haupttragrichtung je Schnittrufer kann gemäß Mestek mit Gleichung (AP6-109) abgeschätzt werden, wobei n die Anzahl der Schichten und F_{int} die Auflagerkraft ist.

$$V_x \approx \begin{cases} 0.33 \cdot n^{-0.1} \cdot F_{int} & \text{für zentrische Punktstützungen} \\ 0.67 \cdot n^{-0.1} \cdot F_{int} & \text{für Punktstützungen im Eckbereich} \end{cases} \quad (\text{AP6-109})$$

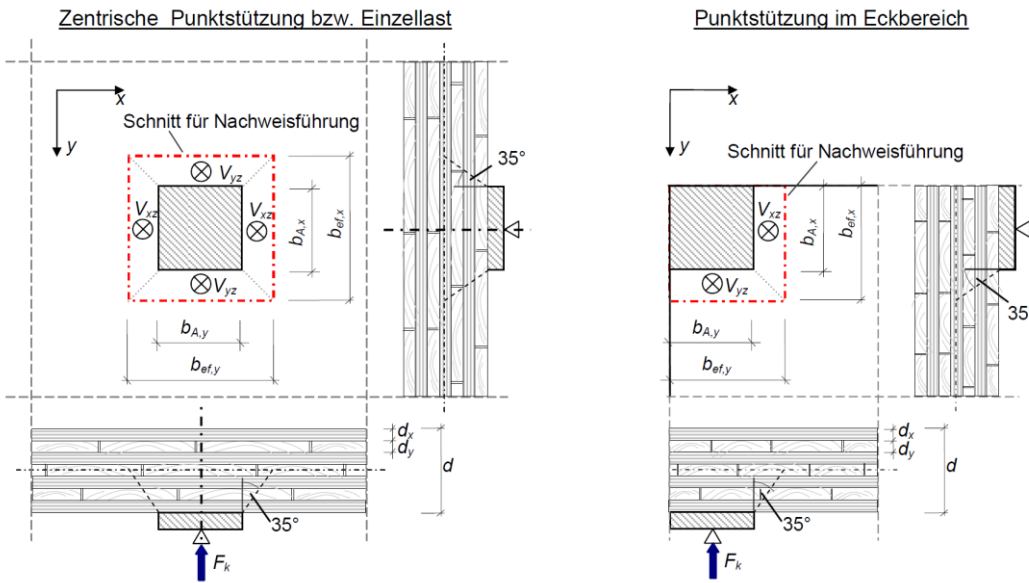


Abbildung 103: Definition zentrische Punktstützung sowie Punktstützung im Eckbereich [47]

Die Querkraft in Nebentragrichtung je Schnitthufer kann aus dem Gleichgewicht der vertikalen Kräfte bestimmt werden gemäß Gleichung (AP6-110).

$$V_y = 0.5 \cdot F_{int} - V_x \quad (\text{AP6-110})$$

Die Rollschubspannung in Haupt-, sowie in Nebentragrichtung $\tau_{R,(x/y)z}$ kann gemäß Mestek [47] anhand von Gleichung (AP6-111) ermittelt werden, mit $V_{(x/y)z}$ als Querkraft am betrachteten Schnitthufer und $b_{ef,(x/y)}$ als mitwirkenden Breite.

$$\tau_{R,(x/y)z} = \frac{V_{(x/y)z} / b_{ef,(x/y)}}{k_{R,(x/y)} \cdot (t_x + t_y)} \quad (\text{AP6-111})$$

Mit:

$V_{(x/y)z}$ = Querkraft am betrachteten Schnitthufer

$k_{R,(x/y)}$ = Beiwert zur Berücksichtigung des Schubverlaufes über den Querschnitt

Tabelle 51: Beiwerte $k_{R,x}$ und $k_{R,y}$ zur Berücksichtigung des Schubverlaufes über den Querschnitt nach Mestek [47]

Anzahl der Schichten	5	7	9	11
$k_{R,x}$	2.00	2.50	3.33	3.89
$k_{R,y}$	1.00	2.00	2.50	3.33

Durch die Zugbeanspruchung der Schrauben, wird das BSP- Element mit Querdruckspannungen belastet, was zu einem positiven Effekt bei der Tragfähigkeit gegen Rollschubspannungen führt. Dieser positive Effekt kann anhand des Beiwertes $k_{R,90}$ aus Gleichung (AP6-112) berücksichtigt werden, welcher sich positiv auf den Nachweis der Rollschubspannungen auswirkt.

$$k_{R,90} = \min \left\{ 1 + \frac{0.35 \cdot \sigma_{c,90,k}}{1.20} \right\} \quad (\text{AP6-112})$$

Die charakteristische Tragfähigkeit der verstärkten BSP-Platte $\bar{f}_{R,k}$ kann gemäß Mestek mit Gleichung (AP6-113) berechnet werden. Auf die Tragfähigkeit der verstärkten BSP-Platte haben der Interaktionsbeiwert für Querdruck und Schub $k_{R,90}$, die charakteristische Rollschubfestigkeit der BSP-Platte ohne Verstärkung $f_{R,k}$, die Herausziehfestigkeit $R_{ax,k}$ sowie die Abstände $a_1, a_{2,ef}$ der Vollgewindeschrauben

einen Einfluss. Abbildung 104 zeigt schematisch, wie sich die Tragfähigkeit der verstärkten BSP-Platte zusammensetzt.

$$\bar{f}_{R,k} = k_{R,90} \cdot f_{R,k} + \frac{R_{ax,k}/\sqrt{2}}{a_1 \cdot a_{2,ef}} \quad (\text{AP6-113})$$

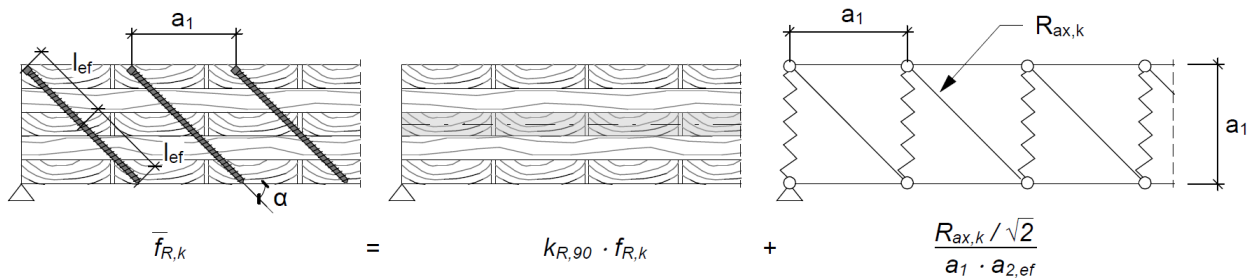


Abbildung 104: Zusammensetzung der Tragfähigkeit einer verstärkten BSP-Platte [47]

Als Nachweis der Rollschubspannungen $\tau_{R,d}$ muss Gleichung (AP6-114) eingehalten sein, wobei k_{mod} der Modifikationsbeiwert hinsichtlich der Nutzungsklasse und Klasse der Lasteinwirkungsdauer ist und γ_M der Sicherheitsbeiwert für BSP.

$$\tau_{R,d} \leq k_{mod} \cdot \frac{\bar{f}_{R,k}}{\gamma_M} \quad (\text{AP6-114})$$

Diskussion der unterschiedlichen Ausführungsvarianten

Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Verstärkungsmethoden kann nur erschwert ein Vergleich der Berechnungen geführt werden. Bei der Ausführung hingegen gibt es einige Unterschiede, die in Tabelle 52 aufgelistet sind. Unterschiede bei den Varianten zeigen sich u.a. in der Tragfähigkeit und bei der Lastdurchleitung von Lasten aus oberen Geschossen.

Tabelle 52: Eigenschaften der unterschiedlichen Varianten im Vergleich

Eigenschaft / Variante	Ohne Verstärkung	Mit Fallplatte bzw. Stützenkapitell	Mit Systemverbinder Spider Connector	Mit Vollgewindeschrauben
Belastung der BSP-Decke aus oberen Geschossen auf Querdruck	Ja	Ja/Nein	Nein	Ja
Rollschubverstärkung durch eingebrachte Vollgewindeschrauben	Nein	Nein	Ja	Ja
Querschnittserhöhung der BSP-Platte im Bereich der Punktstützung	Nein	Ja	Nein	Nein
Reihung hinsichtlich der Tragfähigkeit	4	3	1	2
Anwendung empirisch ermittelter Kenngrößen	Nein	Ja	Ja	Ja

Leitfaden für die Bemessung von BSP-Platten in punktgestützten Bereichen

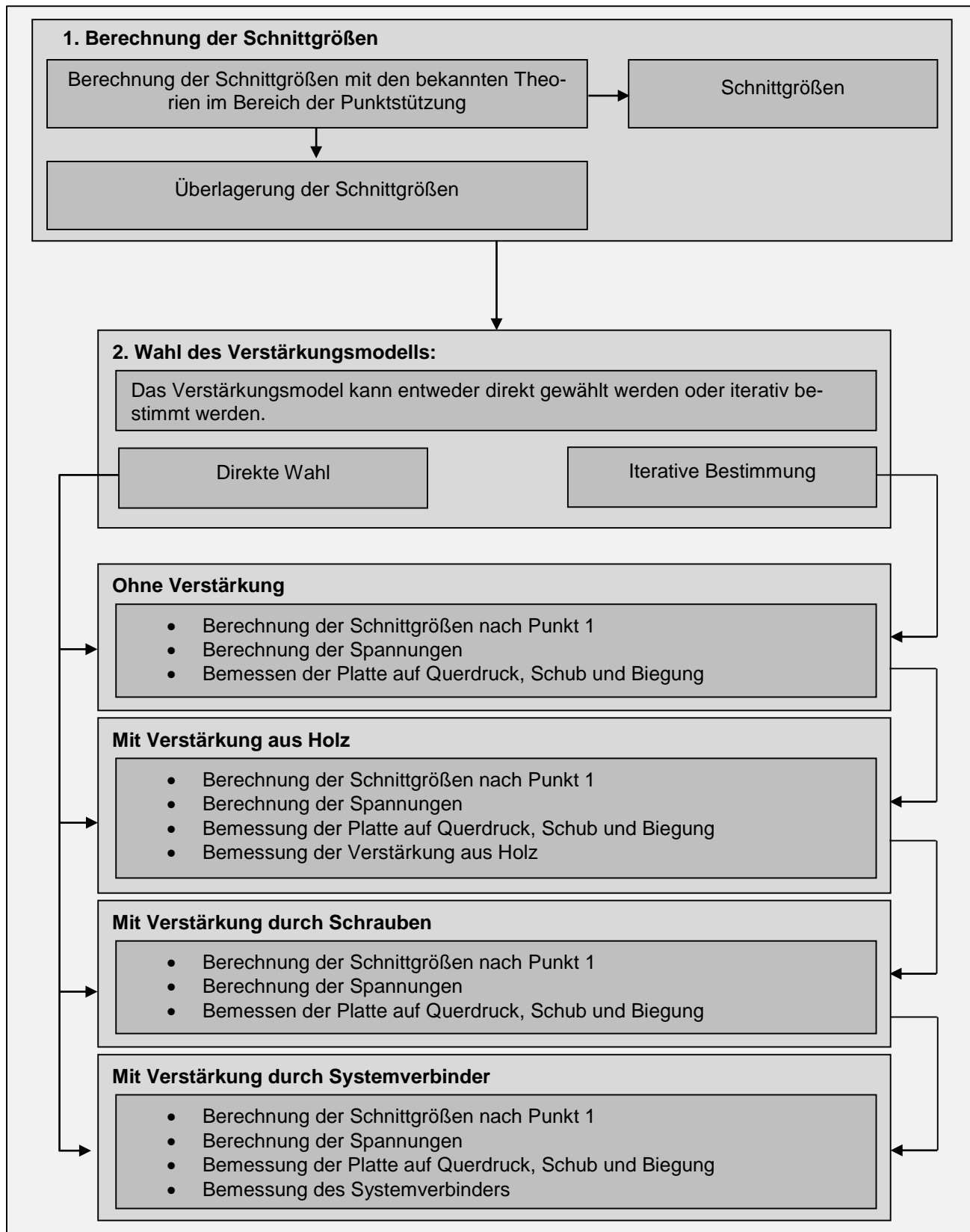


Abbildung 105: Leitfaden für die Bemessung von BSP-Platten im Bereich von Punktstützungen

4.3.2 Brettsperrholzdecken mit Öffnungen

Einführung:

Wie zuvor gezeigt sind Öffnungen in Brettsperrholzdecken von maßgeblichem Forschungsinteresse für die Praxis, siehe Kapitel IV.3.3.

Öffnungen in Brettsperrholzdecken sind als planmäßige Durchführungen technischer Gebäudeausstattung (TGA), für Treppenhäuser aber auch architektonisch, wie beispielsweise in Form von Lichtkuppeln oder Galerien, relevant. Außerplanmäßig können Deckendurchbrüche bei der Sanierung von Schäden notwendig sein. Öffnungen stellen aus statischer Sicht eine Steifigkeits- und Massediskontinuität dar. Der Abtrag von Lasten um die Öffnungsränder herum führt zu einer Konzentration der Schnittgrößen (Biegung und Schub), welche für den Grenzzustand der Tragfähigkeit zu berücksichtigen sind. Auch eine erhöhte Verformung entlang der Öffnung und der Einfluss der Öffnung auf das Schwingungsverhalten der Decke sind für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu beachten.

Den Angaben der Literatur folgend können Decken mit Öffnungen unter anderem mit Hilfe eines Ersatzstabsystem (z.B. Trägerrostmodell) oder der Methode der finiten Elemente abgebildet werden, siehe Kapitel IV.2 und [25]. In [25] wird ein Anwendungsbeispiel für eine Trägerrostberechnung einer in einer Brettsperrholzplatte mittig angeordneten Öffnung dargelegt. Bei Verwendung der finiten Elemente Methode können numerische Singularitäten auftreten. Als Singularitäten bezeichnet man nach [25] Spannungsspitzen numerischer Rechenmethoden, welche mit einer Verfeinerung der Diskretisierung gegen unendlich streben. Unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens sind die Einflüsse solch numerischer Singularitäten im Vergleich zu tatsächlich auftretenden Spannungsspitzen nicht abgrenzbar. Ein möglicher Umgang mit numerischen Singularitäten ist die Integration der Ergebniswerte über einen definierten Bereich. Durch die Integration bleiben die Einwirkung und Reaktionen im Gleichgewicht, wobei aber zugleich die Ergebnisse für die Bemessung realistische Beträge annehmen [25]. In ebenda sind für die genaue Länge der Integration keine Werte angegeben. [56] gibt bei Netzweiten von ca. 0,5 – 1 mm einen Integrationsbereich von 1 – 5-fachen Elementabstand an. Eine solche Diskretisierung übersteigt aber selbst bei erhöhter Netzfeinheit in kritischen Bereichen die übliche Diskretisierung baupraktischer Dimensionen um ein Vielfaches.

Anhand der ermittelten Werte in der Literatur für Biegespannungen [57] und den ebenda durchgeführten numerischen Untersuchungen kann, in Abhängigkeit von einer Deckenstärke t bei einer Netzweite von $2t$ bis $t/4$, in einer Entfernung von 100 mm die entsprechende Schnittgröße ohne zusätzliche Integration für eine realistische Bemessung verwendet werden, siehe Abbildung 106. Dies gilt es experimentell zu untersuchen.

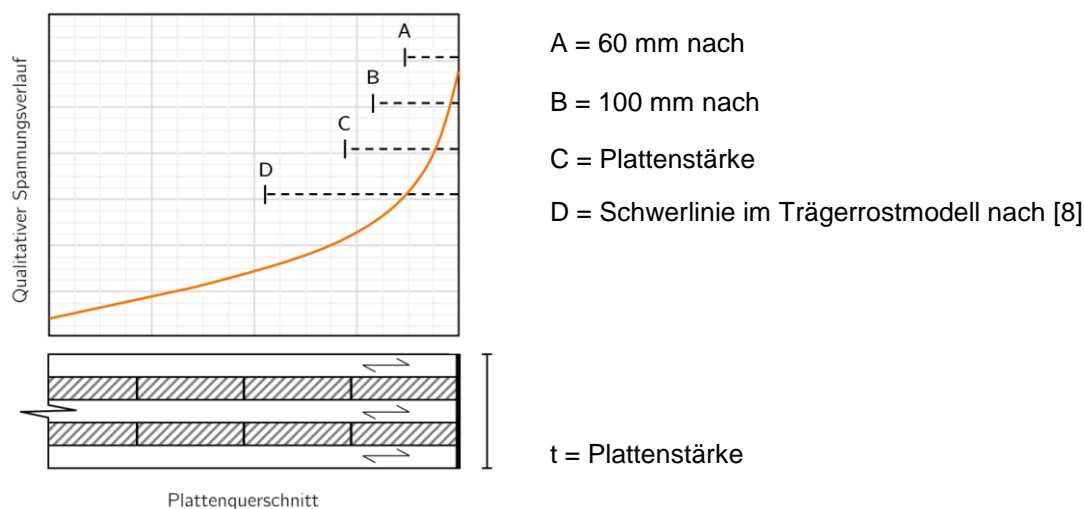


Abbildung 106: Ansätze zur Mittelung von Spannungskonzentrationen aus [53]

Die maximale Abmessung einer kleinen Öffnung darf nach Wallner-Novak 10 % der Stützweite der Platte betragen [25]. [36] empfiehlt eine maximale Öffnungsgröße anhand des Absolutwertes von 200 mm. In Tabelle 43 sind die in der Praxis verwendeten geometrischen Grenzen für Öffnungen dargelegt. Die dort ermittelten Werte sind sehr heterogen. Eine einheitliche Bemessungsregel bspw. im Eurocode 5 [2] gibt es bisher nicht. Es gilt also auch eine maximal übermessbare Öffnungsgröße zu untersuchen.

Experimentelle Untersuchungen:

Im Rahmen von InnoCrossLam AP 6 wurden daher im Zeitraum Dezember 2021 bis Februar 2022 zwei Versuchsserien im Prüflabor der Technischen Universität München durchgeführt, um den Einfluss von Öffnungen in Brettsperrholzdecken für die Praxis zu untersuchen, siehe Abbildung 107. Die im folgenden dargestellten Untersuchungen wurde unterstützt durch eine Abschlussarbeit [53] und werden voraussichtlich im Jahr 2023 in Konferenzbeiträgen [54] und [55] veröffentlicht werden.

Die Prüfreihe (A1-A3) liefert Informationen über Biegesteifigkeit, Spannungskonzentrationen und Verformungen. Die geprüften Probekörper waren alle 100 mm hoch und bestanden aus fünf 20 mm dicken Lamellenlagen ohne Schmalseitenverklebung. Aufgrund der kreuzweisen Anordnung der Schichten waren die Proben relativ homogen. Die Probekörper wurden vor dem Abbund sortiert, so dass sie in den vorhergesagten Versagenszonen keine großen Störungen wie beispielsweise Äste, aufwiesen. Es wurden 6 Probekörper mit einer Länge von 2400 mm und einer Breite von 1200 mm ohne (Prüfreihe A1) und mit Öffnungsgeometrien von 300 mm x 300 mm (Prüfreihe A2) bzw. von 600 mm x 300 mm (Prüfreihe A3) geprüft, siehe Abbildung 107. Die mittlere Dichte ρ der Probekörper betrug 435.6 kg/m^3 ($\text{VarK} = 0.01$) und der mittlere Feuchtigkeitsgehalt u betrug 11.2% ($\text{VarK} = 0.02$). Zur Ermittlung der Steifigkeit (Prüfkonfiguration 1) wurden die Prüfkörper mit einem hydraulischem Druckzylinder und mittels Stahltraversen über die volle Probenbreite und senkrecht zur Faser belastet, siehe Abbildung 108. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde gemäß EN 408:2012 [58] mit EN 16351:2015 [28] so eingestellt, dass die zu erwartende Höchstlast $F_{c,90,max,est}$ innerhalb von $300 \pm 120 \text{ s}$ erreicht wurde. Abbildung 109 (links) zeigt schematisch den Versuchsaufbau. Die Probekörper wurden einaxial spannend gelagert. Die Probekörper wurden mittig zwischen den beiden Auflagern und Lasteinleitungspunkten der Prüfvorrichtung platziert. Die Druckplatten waren auf einem Kalottenlager auf Stahlträgern gelagert (HEB 100), wodurch eine zentrische Krafteinleitung im Abstand zum Auflager $l_1 = 900 \text{ mm}$, siehe Abbildung 114, gewährleistet war. Die Verformung wurde lokal mit induktiven Wegaufnehmern und global mittels Seilzuglängengeber gemessen. Die Verformungsmessungen wurden beidseits angeordnet, um anschließend die gemittelte Verformung zu berechnen. Um eine Spannungumlagerung um die einspringende Ecke messen zu können, wurden die Prüfkörper bis zum Bruch belastet (Prüfkonfiguration 2). Hierfür wurde die Lasteinleitung und damit auch das statische System geändert. Die Stahlträger wurden aus dem zuvor beschriebenen Prüfaufbau entfernt, siehe Abbildung 108 (rechts). Zur Kontrolle der mitwirkenden Plattenanteile und Steifigkeit in der veränderten Lastkonstellation wurden in dieser zweiten Konfiguration in der Prüfreihe A1 erneut die jeweiligen Steifigkeiten ermittelt. Wie in Tabelle 53 gezeigt verbleibt die Steifigkeit trotz verändertem System im gewählten Versuchsaufbau vergleichbar. Tabelle 53 stellt

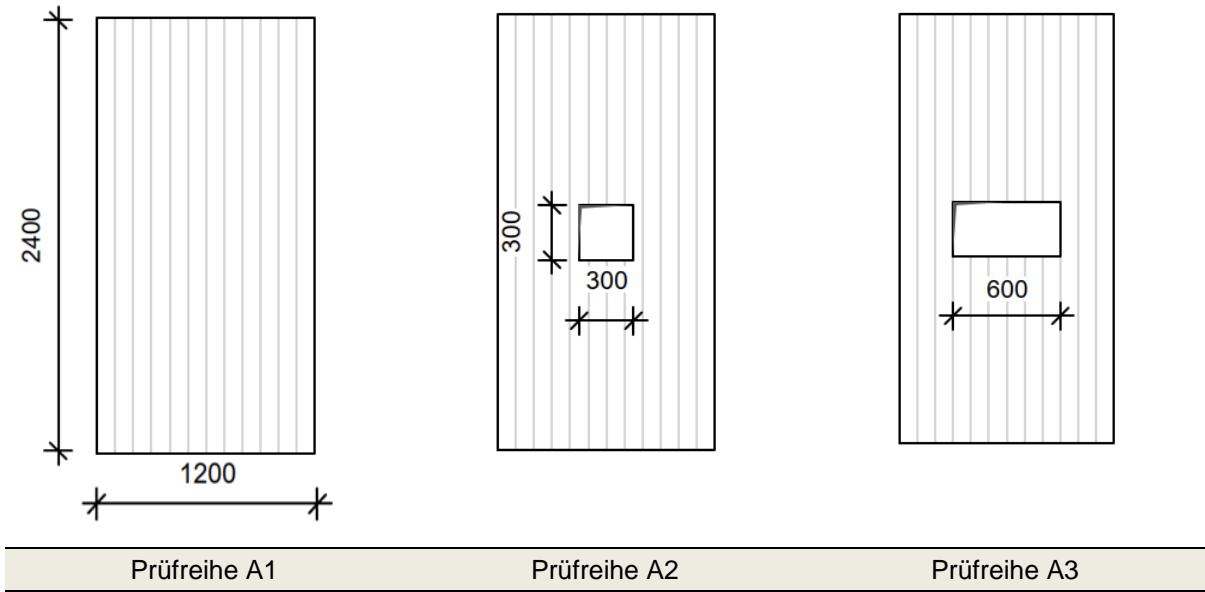


Abbildung 107: Überblick über die Prüfreihe nach [59]

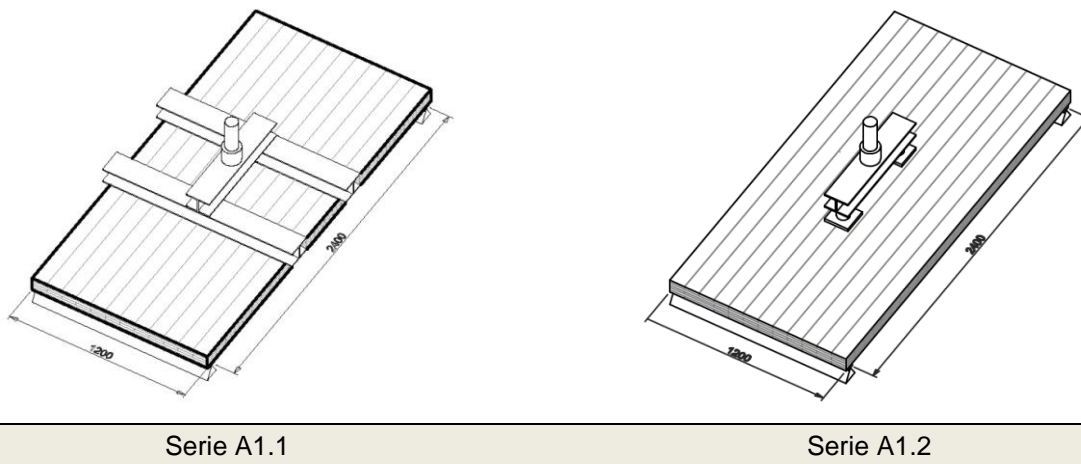
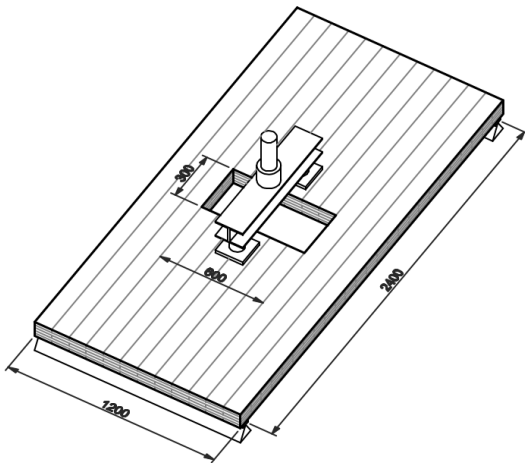


Abbildung 108: Isometrie der Prüfkonfiguration 1 und der Prüfkonfiguration 2 zur Steifigkeitsermittlung aus [59]

hierzu die gemessene und mittels [60] ausgewerteten mittleren Steifigkeiten der Serie A1.1 und A1.2 exemplarisch gegenüber. Rechnerisch wurde mit dem nach Hersteller gegebenen E-Modul von 12 000 MN/m² an den Netto-Querschnittsflächen eine Biegesteifigkeit von 950 kNm² ermittelt. Abbildung 112 zeigt zudem die Entwicklung der lokalen Biegesteifigkeit mit zunehmender Öffnungsgröße. Die Biegesteifigkeit sinkt bei Halbierung der Plattenbreite von im Mittelwert 1049 kNm² auf etwa die Hälfte mit 583 kNm². Die Werte der Biegesteifigkeiten bei mittlerer Öffnungsgröße liegen deutlich über dem errechenbaren Mittelwert von $0.75 \cdot 1049 \text{ kNm}^2 = 787 \text{ kNm}^2$. Bis zum Bruch belastet wurden schließlich vier Prüfkörper der Serie A3.2 (große Öffnung). Zu Referenzzwecken wurden zwei Prüfkörper der Serie A1.2 (ohne Öffnung) ebenfalls bis zur Bruchlast geprüft, siehe Tabelle 54. Die Prüfkörper versagten alle aufgrund von Biegezugspannungen nahe der Feldmitte, siehe Abbildung 112. In der Realität weisen die Prüfkörper eine größere Festigkeit und Tragfähigkeit auf als rechnerisch vorab anhand von Mittelwerten abgeschätzt ($F_{mean,max,cal} = 70 \text{ kN}$; $w_{mean,max,cal} = 25.6 \text{ mm}$), siehe Tabelle 54. Somit kann die abgeschätzte Annahme der mittleren Festigkeitswerte als zu konservativ eingeschätzt werden. Ein möglicher Grund ist, dass die im Brettsperrholzquerschnitt verwendeten Bretter qualitativ besser sind, als die in der Zulassung angegebene Sortierklasse C24.

Die durchgeführten Tests an 6 Brettsperrholzplatten zeigen, dass die Biegesteifigkeit mit zunehmender Querschnittsschwächung abnimmt. Eine Veränderung der Lasteinleitung von Linien- auf Punktlast hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Steifigkeit in der gewählten Versuchskonfiguration. Die Platten mit Öffnungen versagten in allen Versuchskonfigurationen auf Biegezug am Ort der schwächsten Faser in der Nähe der Feldmitte. Ein vereinfachender Umgang mit der numerischen Spannungssingularität an der einspringenden Öffnungsecke erscheint daher erstrebenswert.



Serie A3.2

Serie A3.2 in der Prüfmaschine

Abbildung 109: Isometrie der Serie A3.2 zur Traglastermittlung aus [59] und Durchführung aus [54]

Tabelle 53: Ermittlung der Biegesteifigkeit nach [53]

Prüfkörper-Nr.	$(EI)_{\text{lokal,gemittelt}}$		Abweichung
	Serie A1.1	Serie A1.2	
1	1047	1055	+ 0.8 %
2	1090	987	- 9.5 %
3	1001	1031	+ 2.9 %
4	1030	987	- 4.2 %
5	1131	1149	+ 1.6 %
6	1153	1083	- 6.2 %
Mittelwert	1075	1049	- 2.6 %

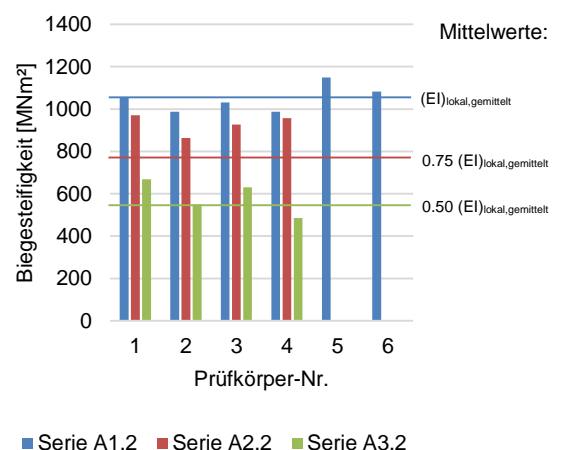


Abbildung 110: Ermittlung der lokalen Biegesteifigkeit mit und ohne Öffnung nach [60]

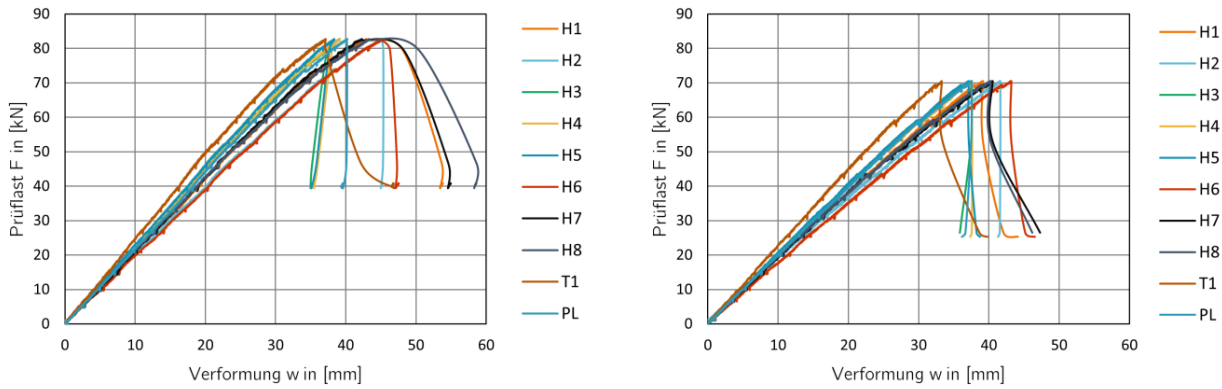


Abbildung 111: Last-Verformungs-Kurve exemplarisch am Prüfkörper A3.2-1 und A3.2-2 [29]

Tabelle 54: Ermittlung der Bruchlast nach [53]

Prüfung	Last [kN]	Mittelwert [kN]	Verformung [mm]	Mittelwert [mm]
A3.2-1	82.8		45.2	
A3.2-2	70.6	75.7	43.1	43.2
A3.2-3	86.3		46.5	
A3.2-4	63.3		38.1	
A1.2-5	117.8	111.7	38.0	37.6
A1.2-6	105.6		36.7	



Abbildung 112: Biegezugversagen der Platten aus [53]

Numerische Untersuchungen:

Anhand einer am Ersatzstab vereinfachten analytischen Berechnung über ein Grenzmoment, dass aus der einwirkenden Bruchlast folgt, siehe Gleichung (AP6-115) wurde in einem numerischen Modell eine mögliche Abgrenzung dieser Singularität weiter untersucht. Die Simulationen mit 2D-Flächenelementen der Platten mit und ohne Öffnungen zeigen, dass die Spannungen und Verformungen dargestellt werden können. Mit diesen Daten wurde der in [57] vorgestellte Ansatz zur Beschreibung der Singularität validiert und seine Grenzen aufgezeigt. Ausgearbeitet ist diese Untersuchung in [53]. Die geprüften Platten wurden als 2D-Modell mit der Finite-Elemente-Software der Firma SOFiSTiK AG modelliert. Die Auflager an den Rändern wurden als gelenkige Lager mit blockierten Verschiebungen in z- und y-Richtung modelliert, siehe Abbildung 113. Die aus den vom Hersteller gegebenen Materialeigenschaften ermittelten Steifigkeiten sind in Tabelle 55 aufgeführt. Das Modell wurde ausschließlich viereckig diskretisiert. Die Elementformulierung der vierknotigen Schalenelemente entspricht Bathe-Dvorkin-Elementen [61]. Die Querdehnzahl wird mit $\nu = 0$ berücksichtigt. Anhand der experimentell ermittelten Bruchlasten und Verformungen kalibriert, wurden die Steifigkeit des Modells schließlich angepasst, siehe [53] und Tabelle 55.

Tabelle 55: Eingabesteifigkeiten (siehe [53])

	B_x [kNm ² /m]	B_y [kNm ² /m]	B_{xy} [kNm ² /m]	S_{xz} [kN/m]	S_{yz} [kN/m]
nach Hersteller Angaben	792	208	33.8	7 980	4 420
an Versuchen kalibriert	948	249	33.8	7 971	4 415

$B_x; B_y...$ Biegesteifigkeit
 $B_{xy}...$ Torsionssteifigkeit
 $S_{xz}; S_{yz}...$ Schubsteifigkeit

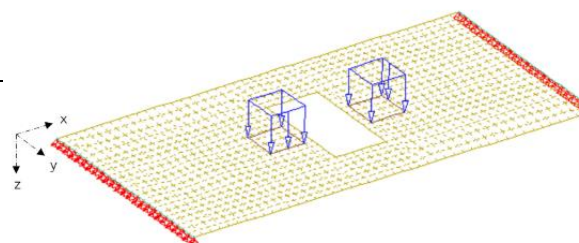


Abbildung 113: Numerisches Modell aus [53]

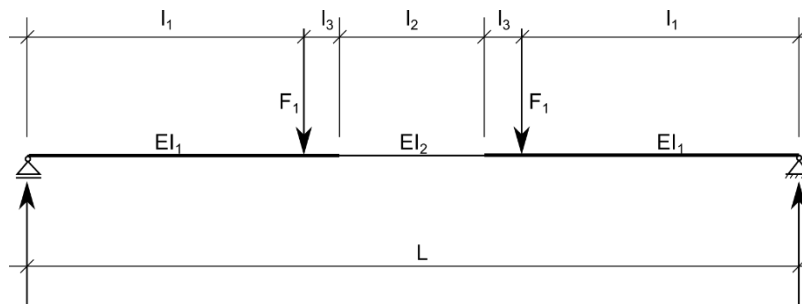


Abbildung 114: Ersatzstab zur Ermittlung des kritischen Grenzmoments

Wie in [53] ausführlich gezeigt, kann die numerische Singularität für die untersuchten Platten über eine Abgrenzung des kritischen Momentes eines Ersatzsystems im Bereich nach der folgenden Gleichung analytisch ermittelt werden:

$$m_{x,krit} = \frac{F_{l,max} \cdot l_1}{b_2} \quad (\text{AP6-115})$$

Mit:

- $m_{x,krit}$ = kritisches Biegemoment
- $F_{l,max}$ = Bruchlast
- l_1 = Abstand der Kraft zum Auflager
- b_2 = Restgesamtbreite des Prüfkörpers an der Öffnung

Zudem wurde im Rahmen dieser Forschung der Einfluss von Öffnungen auf das Verformungsverhalten in einer geometrisch parametrisierten Studie einer einaxial gelagerte Platte der Breite $L_y = 3$ m und einer Länge $L_x = 3$ m...7 m untersucht [53]. Die Platte wurde dabei mit einer Einheitslast von 5 kN/m^2 belastet. Die Öffnung wurde mittig angeordnet und hatte eine Länge $l_x = 1$ m (siehe Abbildung 116 oben) bzw. $l_x = 1.5$ m (siehe Abbildung 116 unten). Die Öffnungsbreite l_y wurde in den Verhältnissen l_y/L_y 0.10 / 0.25 / 0.50 / 0.67 / 0.80 variiert. Anhand eines Verformungsfaktors $U_{n,max}/U_{0,max}$, der die Verformung einer Platte mit Öffnung der Platte ohne Öffnungen gegenüberstellt, wurde der Einfluss der Öffnung in dieser Studie ausgewertet.

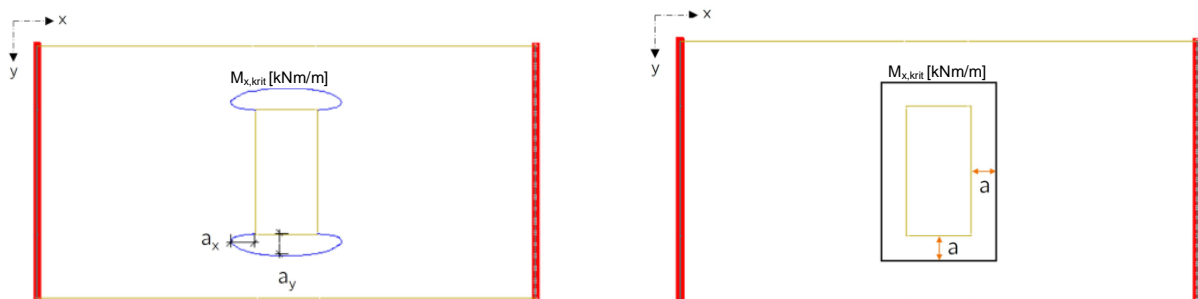


Abbildung 115: Kritisches Biegemoment (links) und Vorschlag für Abgrenzung der numerischen Singularität (rechts) [53]

Für eine Öffnungslänge von $l_x = 1.0$ m ergeben sich Verformungsfaktoren von 1.0 - 3.0 für variierte Öffnungsbreiten von $l_y = 0.30 \text{ m} / 0.75 \text{ m} / 1.5 \text{ m} / 2.0 \text{ m} / 2.4 \text{ m}$. Gerade kleine Öffnungen scheinen einen eher geringen Einfluss auf die Gesamtverformung der Platte zu besitzen. Im oberen Größenbereich nimmt dieser Einfluss stark zu. Vergleichbare Verläufe ergeben sich bei einer Öffnungslänge von $l_x = 1.5$ m. In Absolutwerten sinkt der Einfluss auf die Verformung durch die größere Öffnung (siehe [53]). Eine mögliche Erklärung kann in diesem Fall der Einfluss der mit abnehmender Öffnungsgeometrie parallel lineare Rückgang der aufgetragenen Gesamtlast sein.

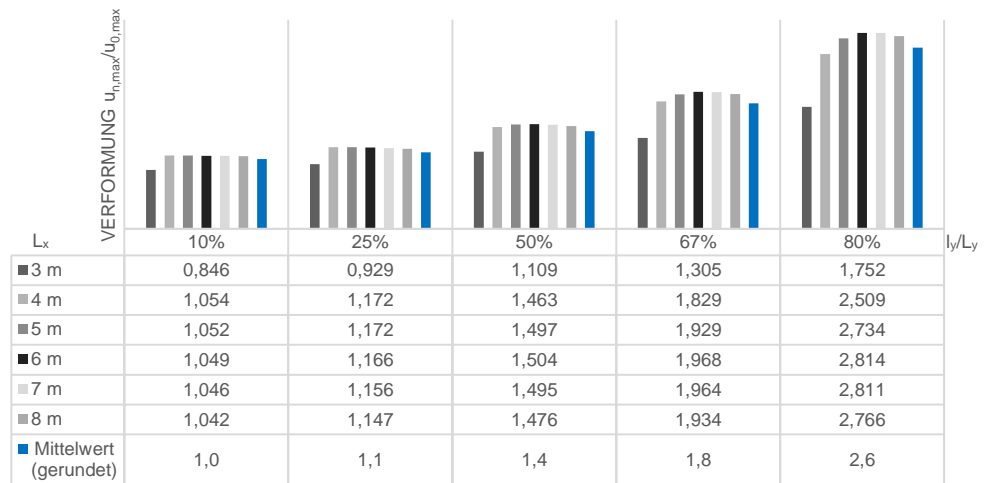
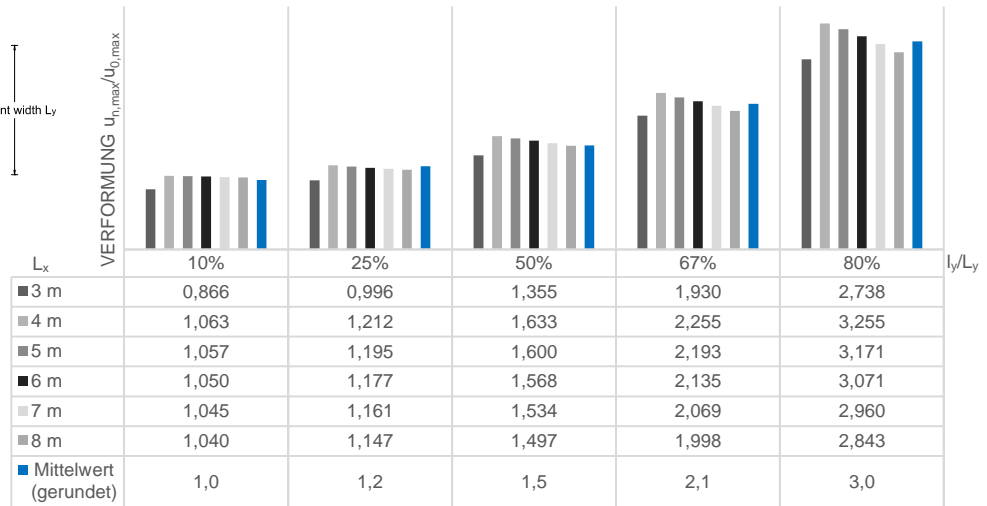
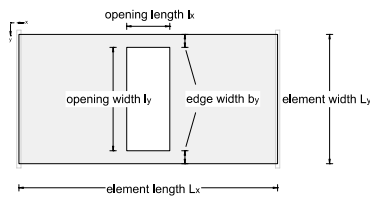


Abbildung 116: Definition der parametrisierten Geometrien (links) [54] und Verformungsfaktor u_z (rechts) für eine Öffnungslänge $l_x = 1.0$ m (oben) und $l_x = 1.5$ m (unten)

Diskussion der Ergebnisse:

In experimentellen Untersuchungen wurden Platten mit zentralen Öffnungen geprüft. Ermittelt wurden Steifigkeitswerte, Traglasten und Verformungen unter iterativ vergrößerten Öffnungsgeometrien. Die Ergebnisse der Versuche dienten dann als Kalibrierungswerte für ein numerisches Modell zur parametrischen Untersuchung.

Die numerische Untersuchung der Platten mit zentralen Öffnungen ermöglichte eine Überprüfung der theoretischen Überlegungen zu numerischen Singularitäten in [57]. Eine an den experimentellen Untersuchungen ausgerichtete vereinfachte analytische Überlegung anhand eines kritischen Grenzmomentes ermöglicht eine vereinfachte Schnittgrößenermittlung. Erweitert werden könnte diese Studie noch mit einheitlichen Werten für einen Schnittabstand a (siehe Abbildung 115) in wechselnden Last- und Lagerkonstellationen. Die vereinfachte analytische Lösung zur Ermittlung des Schnittabstandes a muss im Fall veränderten Last- und Lagerkonstellationen angepasst werden.

Die numerischen Untersuchungen zeigten weiterhin, dass durch geometrischer Parametrisierung Verformungsfaktoren ermittelt werden können, die den Einfluss der Öffnungen vereinfacht für Entwurfsbemessung abschätzbar machen, siehe Abbildung 116. Dies wird im folgenden Berechnungsbeispiel illustriert.

Berechnungsbeispiel aus [53]:

Die einachsig gespannte und gelenkig gelagerte Brettsperrholzplatte ist in Abbildung 117 schematisch dargestellt. Die Bemessung erfolgt nach den in Kapitel IV.2 vorgestellten Bemessungsgrundsätzen und aktuell gültigen Normen für Brettsperrholz. Die Biegesteifigkeit wird nach dem γ -Verfahren berechnet.

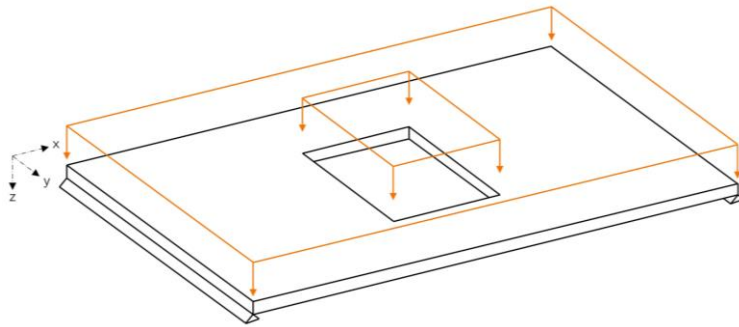


Abbildung 117: Statisches System der Brettsperrholzplatte

- Geometrie der Platte:

Spannweite	$L_x = 4.5 \text{ m}$
Plattenbreite	$L_y = 3.0 \text{ m}$
Plattendicke	$d = 0.1 \text{ m}$
Lamellendicke	$d_i = 0.02 \text{ m}$
Lamellenbreite	$b_i = 0.2 \text{ m}$
Plattendicke-Spannweiten-Verhältnis	$\min\left(\frac{d}{L_x}; \frac{d}{L_y}\right) = \left(\frac{0.1}{4.5}; \frac{0.1}{3.0}\right) = \frac{1}{30}$

- Geometrie der Öffnung:

Öffnungslänge in x-Richtung	$l_x = 1.0 \text{ m}$
Öffnungsbreite in y-Richtung	$l_y = 1.5 \text{ m}$
Öffnungsfaktor in x-Richtung	$\frac{l_x}{L_x} = \frac{1.0}{4.5} = 0.22$
Öffnungsfaktor in y-Richtung	$\frac{l_y}{L_y} = \frac{1.5}{3.0} = 0.5$

Verformungsfaktor nach Abbildung 116	$k_{uz} = 1.5$
--------------------------------------	----------------

- Material:

Die Platte besteht aus dem fünfplagigen Brettsperrholz der Dicke $t = 100 \text{ mm}$ nach [61]. Die Materialkennwerte nach [22] sind in Tabelle 56 gegeben.

Tabelle 56: Materialsteifigkeiten

Eigenschaft	Formelzeichen	Wert in N/mm^2
Elastizitätsmodul in Faserrichtung	$E_{0,\text{mean}}$	12000
Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung	$E_{90,\text{mean}}$	370
Schubmodul	$G_{0,\text{mean}}$	690
Rollschubmodul	$G_{R,\text{mean}}$	50

Biegefestigkeit	$f_{m,k}$	24
Zugfestigkeit	$f_{t,0,k}$	16.5
Druckfestigkeit in Faserrichtung	$f_{c,0,k}$	24
Querdruckfestigkeit	$f_{c,90,k}$	2.7
Schubfestigkeit	$f_{v,k}$	2.7
Rollschubfestigkeit	$f_{R,k}$	1.4 ¹
Rohdichte	ρ_{mean}	380 in m/kg3

¹ Gültig für $t_q \leq 45$ mm mit t_q = Dicke der Querlage

▪ **Beiwerte zur Berechnung:**

Teilsicherheitsbeiwerte (GZG)	$\gamma_G = \gamma_Q = 1.0$
Nutzungsstufe 1 und Lasteinleitungsdauer	KLED = Mittel
Modifikationsbeiwert	$k_{mod} = 0.8$
Verformungsbeiwert	$k_{def} = 0.8$
Kombinationsbeiwert	$\psi_2 = 0.3$

▪ **Einwirkungen und Lastfallkombination:**

Eigengewicht	$g_{k,EG} = \gamma \cdot d = 5.5 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.1 \text{ m} = 0.55 \text{ kN/m}^2$
Veränderliche Last	$q_k = 2.0 \text{ kN/m}^2$ (Büroflächen - Kategorie B2)

▪ **Berechnung der Querschnittswerte nach dem γ -Verfahren:**

Berechnung des Abminderungsbeiwertes

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{x,l} \cdot A_1 \cdot d_1}{G_{R,1} \cdot b_1 \cdot l^2}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 12000 \cdot 1.00 \cdot 0.02 \cdot 0.02}{50 \cdot 1.0 \cdot 4.5^2}} = 0.955$$

$$\gamma_2 = 1.0$$

Berechnung der Biegesteifigkeit $B_{x,ef}$ der Längslagen in x-Richtung

$$B_{x,ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) = 3 \cdot 12000 \cdot 1.0 \cdot \frac{0.02^3}{12} + 2 \cdot 0.955 \cdot 12000 \cdot 1.0 \cdot 0.02 \cdot 0.04^2 = 0.757 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

▪ **Durchbiegung:**

Berechnung der Durchbiegung $w_{i,k}$

$$w_{g,k} = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_k \cdot l^4}{B_{x,ef}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0.55 \cdot 4.5^4}{0.757} = 3.88 \text{ mm}$$

$$w_{q,k} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_k \cdot l^4}{B_{x,ef}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2.0 \cdot 4.5^4}{0.757} = 14.11 \text{ mm}$$

Berechnung der Durchbiegung mit Öffnung

$$k_{uz} \cdot w_{g,k} = 1.5 \cdot 3.88 \text{ mm} = 5.98 \text{ mm}$$

$$k_{uz} \cdot w_{q,k} = 1.5 \cdot 14.11 \text{ mm} = 21.73 \text{ mm}$$

- Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

Nachweis der Durchbiegungen in der quasi-ständigen Bemessungssituation (Nachweis des Erscheinungsbilds)

$$w_{fin,qs} \leq w_{fin,qs,zul}$$

$$w_{inst,qs} = w_{g,k} + \psi_2 \cdot w_{q,k} = 5.98 + 0.3 \cdot 21.73 = 12.5 \text{ mm}$$

$$w_{creep,qs} = k_{def} \cdot w_{inst,qs} = 0.8 \cdot 12.5 = 10.0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,qs} = w_{inst,qs} + w_{creep,qs} = 12.5 + 10.0 = 22.5 \text{ mm}$$

$$w_{fin,qs,zul} \leq \frac{l}{300} = \frac{4500}{300} = 15 \text{ mm}$$

$$\eta_{w,fin,qs} = \frac{22.5}{15} = 1.50 > 1.00$$

Nachweis der Durchbiegungen in der charakteristischen Bemessungssituation zur Schadensvermeidung:

Anfangsverformung

$$w_{inst,k} \leq w_{inst,k,zul}$$

$$w_{inst,k} = w_{g,k} + w_{q,k} = 5.98 + 21.73 = 27.71 \text{ mm}$$

$$w_{inst,k,zul} \leq \frac{l}{200} = \frac{4500}{200} = 22.5 \text{ mm}$$

$$\eta_{w,inst,k} = \frac{27.71}{22.5} = 1.2 \leq 1.00$$

Endverformung

$$w_{fin,k} = w_{inst,k} + w_{creep,k} = 27.71 + 10.0 = 37.71 \text{ mm}$$

$$w_{fin,k,zul} \leq \frac{l}{150} = \frac{4500}{150} = 30 \text{ mm}$$

$$\eta_{w,fin,k} = \frac{37.71}{30} = 1.26 \leq 1.00$$

Zusammenfassung:

Ziel des Projekts war die Entwicklung von zuverlässigen praxisorientierten Entwurfs- und Modellierungsstrategien, von einfachen Entwurfsformeln sowie Bemessungsansätzen für großflächige und mehrstöckige Brettsperrholz-Gebäude. Grundlage für die Zielerreichung war eine sorgfältige Evaluierung des Kenntnisstandes in der Praxis, siehe Kapitel IV.2 und IV.3. Als eines der kritischen Forschungsgebiete wurde das Thema der Öffnungen in Brettsperrholzdecken identifiziert.

Sowohl experimentell als auch numerisch wurden in AP6 folgende den Deckenöffnungen zugeordneten Forschungsthemen:

- Abgrenzung numerischer Singularitäten, siehe Seite 139.
- Einfluss der Öffnungen auf das Verformungsverhalten, siehe Seite 140.

Als *proof of concept* einer vereinfachten Bemessungsmethode konnte ein Berechnungsbeispiel erstellt werden, siehe Seite 141ff.

Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Schub- und Torsionssteifigkeit auf das Verformungsverhalten sowie Untersuchungen zum Einfluss von veränderten Lagerungsbedingungen und Plattengeometrien werden empfohlen, um das vorgestellte Bemessungskonzept allgemeingültig zu formulieren.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse in AP6: Statische Bemessung

Im Arbeitspaket 6 wurde mit Hilfe eines Online-Fragebogens, persönlicher Interviews und der parallel entwickelten Dokumente – wie z. B. Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten – über den Stand der Technik der Bemessung mehrgeschossiger Gebäude in Brettsperrholz berichtet, siehe Kapitel IV.3. Die Arbeit im AP6 wurde von mehr als 150 Experten weltweit begleitet, die die Forschung und Forschungspläne maßgeblich unterstützt haben. An der Online-Umfrage und Interviews nahmen Ingenieure aus über 25 Ländern weltweit teil, darunter 15 EU-Mitgliedsstaaten sowie Überseenationen wie Kanada und Neuseeland.

Ein gemeinsamer Workshop mit den Forschungspartnern und Industrievertretern zur Vorbereitung möglicher „Bemessungshilfsmittel“ anhand der bisher gewonnenen Ergebnissen der kollektiven Arbeit aller Partner wurde erfolgreich durchgeführt. Teilgenommen an diesem Workshop haben ca. 30 internationale Experten aus Ländern wie Österreich, Schweden und Neuseeland. Aus den Diskussionen des Workshops wurden weitere Schwerpunktthemen des Forschungsverbundes abgeleitet, siehe Zwischenbericht 2021. Die Entwicklung praxistauglicher Bemessungshilfen konnte erfolgreich begonnen werden.

Die Erkenntnisse zu – für die Anwendung – wichtigen Kerngebieten der Forschung ermöglichten den europäischen Partnern u.a. Arbeiten an *weiteren Modellierungsmethoden* wie der Laminattheorie sowie einer Zusammenfassung der *Bemessung von Punktstützungen* und der Darlegung einer Idee eines vereinfachten Bemessungskonzepts für *Öffnungen in Brettsperrholzdecken*, siehe Kapitel IV.4.

6. Literaturverzeichnis AP6

- [1] Brandner, R. ; Tomasi, R. ; et. al. (Hrsg.): Properties, Testing and Design of Cross Laminated Timber - A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 2. Shaker Verlag, 2018.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (Hrsg.): DIN EN 1995-1-1:2010-12: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008. Berlin, 2010.
- [3] Kainz, N.: Numerical Optimization Strategies of Additively Manufactured Laminates made of Carbon Short-Fiber Reinforced Concrete Considering Number of Layers, Layer Thickness, Arrangement and Fiber Orientation. Master's Thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau, 2022.
- [4] CEN – CENELEC (Hrsg.)(unveröffentlicht): CEN/TC 250/SC 5/PT 5: SC5.T1 - Cross laminated timber. Brüssel, 2018.
- [5] Kreuzinger, H.: Verbundkonstruktionen aus nachgiebig miteinander verbundenen Querschnittsteilen. In: Tagungsband 2000 Ingenieurholzbau Karlsruher Tage, Bruderverlag, Karlsruhe, 2000.
- [6] Dietsch, P. ; et. al.: Eurocode 5:2022 – Einführung in die neuen Abschnitte Brettsper Holz und Verstärkungen; in Karlsruher Tage 2018 – Holzbau – Forschung für die Praxis, Karlsruhe, 2018
- [7] Winter, S. ; Kreuzinger, H. ; Mestek, P.: Teilprojekt 15; TP 15 Flächen aus Brettstapeln, Brettsper Holz und Verbundkonstruktionen. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2008.
- [8] Wallner-Novak, M. ; Koppelhuber, J. ; Pock, K.: Brettsper Holz Bemessung — Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode. proHolz: Vienna, Österreich, 2013.
- [9] Kreuzinger, H. ; Scholz, A.: Flächentragwerke – Berechnung und Konstruktion. AiF Forschungsvorhaben, Schlussbericht, Technische Universität München, 2003.
- [10] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (Hrsg.): DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12; Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Berlin, 2013.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (Hrsg.): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Berlin, 2010.
- [12] Winter, S.: Vorlesungsfolien der Lehrveranstaltung Flächentragwerke im Holzbau, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2022
- [13] Winter, S. ; Hamm, P. ; Richter, A.: Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbund-Decken. AiF-Forschungsvorhaben, Technische Universität München, 2009.
- [14] Espinoza, O. ; Rodriguez-Trujillo V. ; et al.: Cross-Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe. Bioresources, Vol 11, 2016.
- [15] Baur, N. ; Blasius, J. (Hrsg.): Handbuch Methoden der Empirischen Sozialforschung. Springer, Berlin/Heidelberg, 2019.
- [16] Vehovar, V. ; Manfreda, K.: Overview: Online surveys. In The Sage Handbook of Online Research Methods, SAGE: Thousand Oaks, California, 2008.
- [17] Hübner, C.: Bemessung von Brettsper Holz - Stand der Technik 2020. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2021.
- [18] Schenk, M. ; Gonzalez-Serna P. ; Cabrero J.M.: Future research on cross laminated timber (CLT) for multi-storey buildings – a questionnaire among engineers active in practice. Proceedings of the World

- Conference on Timber Engineering (WCTE), Santiago de Chile, 2020.
- [19] Schenk, M. ; Hübner, C. ; Cabrero, J.M.: Cross-Laminated Timber: A Survey on Design Methods and Concepts in Practice. CivilEng, Vol 3, 2022.
- [20] CEN-CENELEC (Hrsg.): EN 14080:2013; Timber Structures — Glued Laminated Timber and Glued Solid Timber—Requirements. Brüssel, 2013.
- [21] CEN – CENELEC (Hrsg.): Policy guidelines and procedures for CEN/TC 250 Structural Eurocodes. CEN/TC 250 N 1250, Brüssel, Oktober 2021.
- [22] Österreichisches Institut für Bautechnik (Hrsg.): ETA-06/0138 - KLH CLT. Wien. 2006.
- [23] EOTA (Hrsg.): EAD 130005-00-0304; Solid Wood Slab Element to be Used as a Structural Element in Buildings. Brüssel, 2015.
- [24] Canadian Standards Association (Hrsg.): CSA O86:19; Engineering Design in Wood. Ontario, Kanada, 2019.
- [25] Wallner-Novak, M. ; Augustin, M. ; Koppelhuber, J. ; Pock, K.: Brettsper Holz Bemessung Band II — Anwendungsfälle. proHolz: Vienna, Österreich, 2018.
- [26] Börgström, E. ; Fröbel, J. (Hrsg.): CLT Structures — Facts and Planning. Swedish Wood: Stockholm, Sweden, 2019.
- [27] Karacabeyli, E. ; Douglas, B. (Hrsg.): Canadian CLT Handbook. FPInnovations: Edmonton, Quebec, Kanada, 2013.
- [28] CEN – CENELEC (Hrsg.): EN 16351:2015; Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. Brüssel, 2015.
- [29] Kleinhenz, M. ; Dietsch, P. ; Winter, S.: Eurocode 5 — A Halftime Summary of the Revision Process. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2016.
- [30] Schiermeyer, V.: Verbindungstechnik in der Brettsper Holz-Bauweise. 2. Forum Holzbau Beaune, 2012.
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (Hrsg.): DIN EN 1998-1:2010-12: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009. Berlin, 2010.
- [32] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (Hrsg.): NTC 2018 — Nuove Norme Sismiche per il Calcolo Strutturale; 2018. Available online: <https://www.studiopetrillo.com/ntc2018.html> (accessed on 16 June 2022).
- [33] CEN – CENELEC (unveröffentlicht): EN 1998-1: Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. CEN/TC 250/SC 8, Brüssel, 2020.
- [34] Moosbrugger, Th.; Bogensperger, Th.; Krenn H.: Bemessungsdiagramme für den biegebeanspruchten Stab im Holzbau - Teil 2 Deckentragwerke mit inhomogenem Stabquerschnitt. Bautechnik 92, Heft 4, 2015.
- [35] KLH Massivholz GmbH (Hrsg.): Bauteilkatalog – Konstruktion (Fassung 09/2019). <https://www.klh.at/wp-content/uploads/2019/07/bauteilkatalog-konstruktion-1.pdf>, Status: 25.10.2022.
- [36] Mestek, P. ; Kreuzinger, H. ; Winter, S.: Teilprojekt 15 - Flächen aus Brettstapeln, Brettsper Holz und Verbundkonstruktionen. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Technische Universität München, 2012.
- [37] Nguyen-Van, H. ; Duy, N. ; Cong Cong, T.: A simple and accurate four-node quadrilateral element using stabilized nodal integration for laminated plates. Computers, Materials and Continua, vol. 6, pp. 159–

- 175, 2007.
- [38] Altenbach, H. ; Altenbach, J. ; Kissing, W.: Mechanics of composite structural elements. Springer, Singapore, 2018.
- [39] Vlachoutsis, S.: Shear correction factors for plates and shells. International Journal for Numerical Methods in Engineering 33(7), 1537–1552, 1992.
- [40] Altenbach, H.: On the determination of transverse shear stiffnesses of orthotropic plates. Z. angew. Math. Phys. 51, 629–649, 2000.
- [41] Whitney, J. M.: Shear Correction Factors for Orthotropic Laminates Under Static Load. ASME. J. Appl. Mech., 40(1): 302–304, 1973.
- [42] Gruttmann, F. ; Wagner, W.: Shear correction factors for layered plates and shells. Computational Mechanics, vol. 59, no. 1, pp. 129–146, 2017.
- [43] Bauer, V.: Aufstellung einer Berechnungsgrundlage für die punktuelle Stützung einer Brettsperrholzdecke. Bachelor's Thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2022.
- [44] Bletzinger, K.-U.: Theory of Plates, Part II: Plates in Bending. Lecture Notes. Lehrstuhl für Statik der Technischen Universität München, 2000.
- [45] Muster, M.: Column-Slab Connection In Timber Flat Slabs. Dissertation, ETH Zürich, 2020.
- [46] Mestek, P. ; Dietsch, P.: Design concept for CLT-reinforced with selftapping screws. In: Proceedings of the European Conference on Cross Laminated Timber, S. 103–118, 2013.
- [47] Mestek, P.: Punktgestützte Flächentragwerke aus Brettsperrholz (BSP) – Schubbemessung unter Berücksichtigung von Schubverstärkungen. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2011.
- [48] Maurer, B.: Lösungsansätze für punktgestützte Flachdecken aus Brettsperrholz, Dissertation, Universität Innsbruck. 2020.
- [49] Maderebner, R. ; Maurer, B. ; Flach, M. ; Zingerle, P. ; Lang, P.: Systemlösungen für punktgestützte Flachdecken aus Brettsperrholz, Internationales Holzbau-Forum IHF, 2017.
- [50] Rothoblaas (Hrsg.): Spider: Verbindungs- und Verstärkungssystem für Pfosten und Böden, 2020. url: <https://www.rothoblaas.de/produkte/verbindungstechnik/verbinder-furpunktgestutze-decken/spider>, Stand: 30.10.2022.
- [51] Österreichisches Institut für Bautechnik (Hrsg.): European Technical Assessment (ETA) - 19/0700 SPIDER Connector and PILLAR Connector. Wien, 2020.
- [52] Franz, M. ; Schleich, B. ; Wartzack, S.: Variation Analysis of Design Parameters of Fibre-Reinforced Plastic Parts. in Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Delft, The Netherlands, 5-8 August 2019.
- [53] Husel, A.: Voruntersuchungen zu Öffnungen in Brettsperrholzdecken. Masterarbeit an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Institut für Technologie und am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München, 2022.
- [54] Schenk, M. ; Husel, A. ; Winter, S.: Cross-laminated timber floors with openings – serviceability verifications. World Conference on Timber Engineering (WCTE), Oslo, 2023.
- [55] González-Serna, P. ; Yurrita, M. ; Cabrero, J. M.: Experimental analysis of the influence of openings in cross-laminated timber plates loaded out of plane. World Conference on Timber Engineering (WCTE),

Oslo, 2023.

- [56] Welsch, M.: Bewertung von Spannungsspitzen und Singularitäten in FEM-Rechnungen. 11. Norddeutsches Simulationsforum, 2015
- [57] González-Serna, P. ; Schenk, M. ; Cabrero, J.M.: Parametric study on stress concentrations around openings in CLT plates loaded out-of-plane. World Conference on Timber Engineering (WCTE), Santiago de Chile, 2021.
- [58] CEN – CENELEC (Hrsg.): EN 408:2012; Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. Brüssel, 2012.
- [59] González-Serna, P. ; Schenk, M. ; Cabrero, J.M. (unveröffentlicht): Proposal for testing CLT floors with openings. Spanien, 2021.
- [60] CEN – CENELEC (Hrsg.): EN 16351:2021; Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. Brüssel, 2021.
- [61] Bathe, K.-J. ; Dvorkin, E. N.: A continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis. Massachusetts Institute of Technology Cambridge. 1983.
- [62] Aondio, P.: FE-Berechnung von geklebtem Brettsperholz – Teil 2: Beispiele, in Bauingenieur; Band 95 Nr. 2, Seite 75, 2020

V. Kurzbericht des Forschungsverbundes

Autoren: Boris Azinović¹, Erik Serrano², Henrik Danielsson², Josef Füssl³, Markus Lukacevic³, Philipp Dietsch⁴, Matthias Arnold⁵, Martin Schenk⁵, Jose Manuel Cabrero⁶, Pablo Gonzalez Serna⁶, Tomaž Pazlar¹

1. Project achievements

Project deliverables are presented in terms of achievements within each work package (WP), emphasising collaboration across the whole project group and between the WPs. The findings and results of the project are summarised in several professional and scientific publications that have been published or are in the process of being published (presumably in 2023). From an organisational point of view, the original project plan foresaw collaboration with industrial partners which had to be transferred to online platforms. More than 15 partner meetings were organised, with at least 5 meetings involving someone from industry. Additionally, the project involved practitioners by creating an online survey and conducting face-to-face interviews. In total, more than 150 professionals were involved, which provided tremendous support to our research and research plans. The research results presented below were selected based on input from the associated partners and discussions between the project partners.

In WP2 (Components and Joints), the focus was on model development for applications related to CLT at in-plane shear loading, notched CLT plates, CLT plates with/without openings, and high-capacity joints. Modelling approaches for CLT under in-plane shear loading and in-plane beam loading (M2.1) were developed, and a proposal for a rational and unified design approach was published (D2.1). An extensive experimental test campaign with CLT beams was conducted in collaboration between ZAG and LU, and a journal article with the results is in the process of publishing. In addition, modelling approaches for CLT plates, understanding the mechanical behaviour of CLT plates with/without openings, and corresponding design approaches have been developed (M2.2 and D2.2). This work was performed in collaboration between partners LU, ZAG, and UNAV. The behaviour of CLT floors under dynamic loading has also been studied in detail, including studies on ways to improve their structural low-frequency vibro-acoustic performance by using different softwood and hardwood species (M2.2 and D2.2). Another major accomplishment is the completion of testing of high-capacity joints using steel plates and laterally loaded self-tapping screws, and the identification of possible brittle failure modes for such joints, which is connected with the work done in WP4 and WP6 (UNAV). Point supports (M2.3/D2.3) were also investigated by TUW. The work within WP2 on high-capacity CLT joints included also research on inclined and cross-wise arranged screws. This work was done in collaboration with ZAG and another ForestValue project `hardwood_joint` (Karlsruhe Institute of Technology - KIT), which expanded the consortium within the same ForestValue funding scheme. In summary, the development of reliable and rational design approaches for CLT components and joints are important for the further development of safe and material-efficient timber construction.

In WP3 (Structural performance assessed by computational mechanics), a 3D multi-surface failure criterion for wood was extended to account for different densities and moisture contents of wood (D3.1). Together with an efficient return mapping algorithm, this criterion has been implemented in the finite element software Abaqus so that it can be applied to GLT and CLT structural simulations (M3.1). The associated user subroutine is also publicly available for download on GitHub. In order to describe quasi-brittle failure mechanisms, a phase field approach for orthotropic materials was developed that includes three phase fields (D3.2). However, implementation in Abaqus was only possible with one phase field, which should be sufficient to describe the basic failure modes in CLT. Based on an algorithm for approximating wood fibre deviations around knots and depending on the pith location, we generated hundreds of realistic virtual wooden boards. Here we collaborated also with a ForestValue project READiStrength, where the latest technological developments in round timber scanning, and sawn timber strength grading was used. The simulated realistic boards could be

¹ Boris Azinović & Tomaž Pazlar, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG Ljubljana), Slovenia, boris.azinovic@zag.si & tomaz.pazlar@zag.si

² Erik Serrano & Henrik Danielsson, Lund University, Sweden, erik.serrano@construction.lth.se & henrik.danielsson@construction.lth.se

³ Josef Füssl & Markus Lukacevic, Technical University of Vienna (TUW), Austria, josef.fuessl@tuwien.ac.at & markus.lukacevic@tuwien.ac.at

⁴ Philipp Dietsch, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany, dietsch@kit.edu

⁵ Matthias Arnold & Martin Schenk, Technical University of Munich (TUM), Germany, matthias.arnold@tum.de & martin.schenk@tum.de

⁶ José Manuel Cabrero & Pablo González Serna, University of Navarra (UNAV), Spain, jcabrero@unav.es & pgonzalezse@unav.es

used to assemble realistic CLT plates (M3.2), which were used to analyse various structural details with the developed finite element implementations (M3.3, D3.3). In addition, tremendous progress was made in simulating moisture transport in wood products, which was not originally planned to this extent in WP3 but was requested by the industry. In summary, major steps towards better and more realistic numerical simulations of wood products could be made in WP3. These steps have already been published extensively in high-impact international journals, predominantly by P3. Simulations that can represent the complex behaviour of wood products with sufficient accuracy will be necessary in the future to develop competitive wood products efficiently, reliably, and with the lowest possible material consumption.

The main objective of WP4 (Seismic behaviour) was seismic risk assessment of tall timber and hybrid buildings based on nonlinear numerical analyses (M4.2); ZAG played an important role in this milestone. Linear and nonlinear numerical analyses were performed for different case studies of tall CLT buildings. Based on the results, recommendations for the design of tall timber and hybrid buildings in seismic zones were proposed to engineers (D4.3), especially for the application of the nonlinear models. However, before the main objective, much basic research work was done. First, extensive research on the state of the art was conducted (M4.1) and summarised in a report (D4.1). Second, experiments were performed (M4.2) that were needed to calibrate the numerical models. The first set of experiments involved tests of high-capacity joints using steel plates and laterally loaded self-tapping screws, where brittle failure modes were discovered (D4.2). This was done in collaboration with WP2 (ZAG, LU, UNAV). The second set of experiments in the project concerned the influence of flexible sound insulation layers on the lateral resistance of CLT shear walls, which was used to calibrate the nonlinear model for CLT shear walls with angle bracket connections (D4.2). In parallel, model

calibration was performed in collaboration with the ForestValue project DynaTTB (InnoRenew), where a 5-story building was measured in-situ. This building was modelled using a numerical modelling approach used in WP4 and validated by ambient and shaker induced vibration tests performed by InnoRenew. In addition, work was carried out to improve the methods for calculating ductility and overstrength factors, in collaboration with another ForestValue project `hardwood_joint` (TU Graz and KIT). The experimental work from TU Graz and KIT was used for the theoretical development of a reliability-based optimization for joints/structures. The final joint outcome of WP4 and WP6 was a dissemination book with design recommendation of structural details for energy-efficient buildings on seismic areas (D4.3). This is especially important for CLT and other timber buildings, which are typically energy efficient and require special detailing on the thermal envelope of the building. All in all, the work of WP4 contributed to the more reliable design of seismic resistant CLT structures.

After initial analytical considerations, six different series of multifunctional CLT were designed and manufactured for mechanical, climatic and fire resistance testing (M5.1, D5.1). The compressive strength and stiffness, buckling load, in-plane shear strength and stiffness, and torsional stiffness of the multifunctional CLT were determined by extensive mechanical tests and subsequent numerical simulations (M5.2, M5.3, D5.2). In addition, the deformation behaviour of multifunctional CLT under moisture changes and possible cracking in the front layers were analysed in climatic experiments (M5.2, M5.3, D5.2, D5.3). Fire tests were conducted to determine the contribution of the multifunctional layers to fire resistance as well as the behaviour in cavity fires (M5.3). The results of the fire tests were compared with analytical methods (M5.2, D5.2). In parallel, out-of-plane shear stiffness, torsional stiffness, bending stiffness, and in-plane shear stiffness of DLT were determined by experimental, analytical, and numerical investigations (M5.2, M5.3, D5.2, D5.3). In summary, the WP5 research promises and supports more efficient future use of massive timber elements through the addition of features or diagonal layer arrangements. The results of the presented research have already been published in a high-ranking international journal and presented at international conferences, predominantly by P4. In addition, a dissertation on the results of the DLT research is currently being completed. Detailed guidance for production, dimensioning and implementation in future markets will be provided and is in the publication process (D5.3). To sum up, the findings of WP5 on the innovative multifunctional CLT and also for other applications such as DLT are important for the future research on products with increased added value in the mass timber sector.

WP6 aimed at developing a report on the state of the art of modelling techniques for CLT. This was achieved using the completed questionnaire and related documents (M6.1), such as the published papers, master theses, a book chapter in the dissemination book, and a book for design recommendations for seismic areas. The collective work of all partners has been incorporated into the WP6 deliverables (D6.1, D6.2 and D6.3) and has provided unique insight into current design and modelling practises for CLT buildings (M6.2). The observed constraints and unknowns from practice allowed for the development of a modified work plan focused on connections and lateral stability (M6.3). WP6, also due to the difficulties in continuing the work and collaborating with the practise due to the Covid-19 pandemic, worked in two different directions: (i) Modelling issues were addressed mainly through master theses focused on modelling connections and lateral stability, showing ways to model these areas and how some current assumptions change the obtained results. (ii) Some new topics were introduced and explored in collaboration with other WPs. This is the case, for example, of

understanding the mechanical behaviour of CLT plates with/without openings (stress concentration problems due to modelling issues) and the brittle failure of joints. In both cases, the work developed is among the first experiments and will therefore become a primary reference in the field. Based on the results obtained for CLT joints, the draft Eurocode 5, which is currently being developed, has been modified. The partners of WP6, cooperating in the Connections Working Group, presented the obtained results and it was agreed to modify the future design standard. This is a major achievement, as the design standard governing the design of timber structures has been improved by our work.

The final achievement of the project was planned to be the publication of a book that would serve as an engineers' handbook for special design topics in CLT structures that were researched under InnoCrossLam. The collective effort of all partners was therefore gathered in a dissemination book for engineers and is in the publication process. Additionally all partners were involved in the presentation of the project topics in one article, that will be presented in 2023 at the World Conference on Timber Engineering (WCTE) in Oslo.

2. Problems and their solutions (scientific and structural)

Deviations in content from the project proposal are negligible. The consequences of the epidemic for the deviation from the schedule for the implementation of the project tasks were addressed at the level of the entire ForestValue consortium with a six-month extension of the project. This allowed us to carry out the delayed activities, especially the experimental investigations in the laboratory, which had to be postponed due to measures to prevent the spread of Covid-19. For example, project tasks related to experimental testing in WP2 were delayed due to Covid-19 pandemic, as specimens ordered from associated partners arrived late and laboratories could not operate normally during periods of restrictions. Nevertheless, thanks to the joint efforts of the project partners and the associated partners and the extension of the project, the tests could eventually be carried out. Moreover, the pandemic disrupted the planned meetings with associated partners and professionals to enquire in detail about their professional practice and use of mass timber and hindered the original plan of organizing meetings with them to develop a practical guide. Alternatively, Master Theses were developed on the topics, based on the info gathered by the online survey and the reduced in-person meetings that were made by TUM and UNAV. Based on the gathered insight by means of the survey, alternative tasks were developed, in which additional (not initially planned) internal collaboration among partners, instead of external practitioners, was achieved. That gave rise to the collaboration on CLT joints, and on CLT plates with/without openings.

From an organisational point of view, one of the main problems arose in WP6, where the responsible partner was UNAV from Spain. The national funding in Spain required a separate national call to apply for the funds, with no guarantee to receive them, and which was opened only in May 2019, when the kick-off meeting had already taken place. P5 received the funds about 9 months later than planned. Things have roughly improved with the extension of the project.

From a scientific point of view, the main challenge in numerical modelling done in WP3 was to find a way to describe quasi-brittle failure mechanisms in wood in a stable and efficient way. The phase field approach was found to be a stable method, but efficiency still needs to be worked on. The phase field approach still requires a very fine discretization and thus a considerable amount of computational time. For this reason, it was also not possible to integrate this type of method into the other WPs dealing with structural simulation. It was also discovered that some numerical modelling approaches used in WP2, which are based on fracture mechanics to account for crack initiation and propagation, were more complicated than originally anticipated. Similarly, the efficiency of nonlinear modelling on a structural level, proposed in WP4 for seismic design was computationally too demanding for practice. In general, there is still a lack of a unified modelling/simulation approach for timber structures over multiple length scales, from material to building structure. Obviously, this cannot be achieved within a single project of the same timeframe and scope as in the previous ForestValue call. For this reason, we recommend further initiatives in this area.

In WP5, the main challenge was to meet the technical and regulatory requirements according to the "Construction Products Regulation (EU) No. 305/2011 of the European Parliament and of the Council" for a multifunctional CLT element. The high number of requirements and the in-depth research on 3 of the 7 requirements showed that additional work is needed to determine additional characteristic values of strength and stiffness properties and to deeply investigate also the aspects of hygiene as well as building physics. In addition to the results on CLT, the extensive research on DLT revealed further research needs and work in standardization, such as the extension of EAD 130005-00-0304 to cover mass timber elements with voids or diagonal layer arrangements.

3. Highlights of the collaboration (scientific and structural)

A major highlight of the project was the collaboration of the research partners and practitioners from various fields, e.g. mass timber industry, architecture, structural engineering, building physics and other. To achieve this, more than 5 meetings with partners from practice were organized. Beginning with the kick-off meeting in Ljubljana, where all partners from the project application were actively present, pinpointing the challenges from practice and steering the research to be performed in InnoCrossLam. And finally at the end of the project at the ForestValue-conference held in Skellefteå (June, 2022) where again all project partners and several associate partners were represented, following the highlights of the research results. Secondly, to achieve involvement of practice, a great effort was put into the development and dissemination of the survey, in which all the partners actively collaborated. The survey gave visibility to the research project among practice at an even greater engineering audience and not only to the official associated partners that agreed to collaborate at time of the project application. The survey was distributed from three official channels (LinkedIn, Twitter, project homepage) and additionally by personal invites through emails. This resulted in a considerably large circle of participants (ca. 150) and consequently, caught interest of the project to others. Some of them voluntarily contacted the project consortium and were later included as additional associated partners from the industry.

An unforeseeable highlight opened by the collaboration with the industry has been a faster progress on moisture transport simulations. This additional focus was set at the request of the industrial partners, which whom a close contact was maintained during the project phase. Because moisture damage in wood has increased rapidly in recent years, also the simulation of moisture processes has increased in importance. In WP3, a significant contribution in this field could be made, and the developed tools are right now in application to analyse moisture problems identified in practice.

Strengthening the collaboration between partners and establishing new collaboration between research and practice allowed for extensive exchange between partners, making use of the existing facilities and working on newly developed joint topics. Joint experimental campaigns were developed, and when possible, partners travelled to the facility to provide help and collaborate on them. Such examples worth highlighting are the collaboration of an experimental campaign of CLT plates with openings (collaboration of TUM and UNAV), CLT joints with brittle failure (ZAG, LU and UNAV), CLT beams (ZAG and LU) and other. Additional effort was made also to collaborate on topics related to other ForestValue projects from the JC2017. Here, it is worth to highlight the following collaboration: (i) in-situ vibration test with DynaTTB and comparison with numerical modelling, (ii) numerical modelling of joints, determination of overstrength factors and ductility with hardwood_joint, (iii) sharing of CT scanning data with READiStrength, (iv) testing procedures and reference testing result for the multifunctional CLT with FIREWOOD, (v) investigating the applicability of circular economy principles for multifunctional CLT and other tested products with InFutUReWood within a workshop in Ljubljana and other. One of the highlights of the established collaboration exchange between partners, was also in the frame of Master's theses, which were done by exchange students. For example, two Master theses were done within WP6 in collaboration between partners (exchange between LU, TUM and UNAV), which allowed to work in detail in some topics which had been originally foreseen only for discussion with practitioners. Two research exchanges were performed also for the purpose of collaboration with the ForestValue project hardwood_joint, from ZAG to KIT (2 month exchange) and from ZAG to TU Graz (3 month exchange).

Based on the well-established collaboration within the consortium and together with our associated partners, further research project applications and proposals are planned. The new research topics that will be of interest for the consortium in the future will include: (i) CLT and other mass timber products such as DLT or multifunctional CLT, (ii) innovative hardwood based products, (iii) numerical modelling of moisture, fire in combination with mechanical resistance, (iv) improving of existing mass timber products in terms of circular economy approaches, (v) mass timber construction on seismically prone areas, (vi) further improving the structural design methods for practice and other.

VI. Anhang

1. Anhang AP5

Anhang WP5-1: Ergänzende Feuchteprofile und Verformung der Prüferien infolge der Klimatischen Versuche

Serie M-3

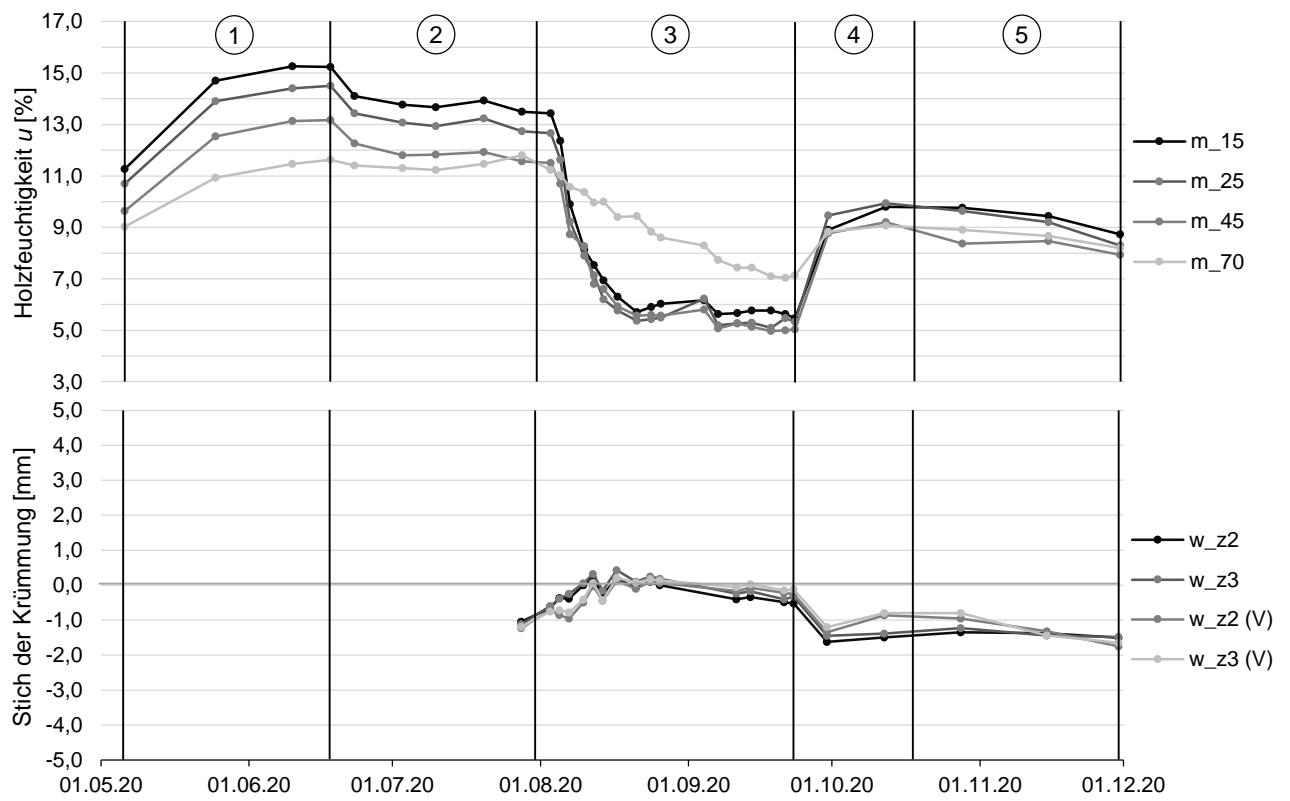


Abbildung A1: Gemessene Holzfeuchte und Stich der Krümmung der Serie M-3

Serie M-4

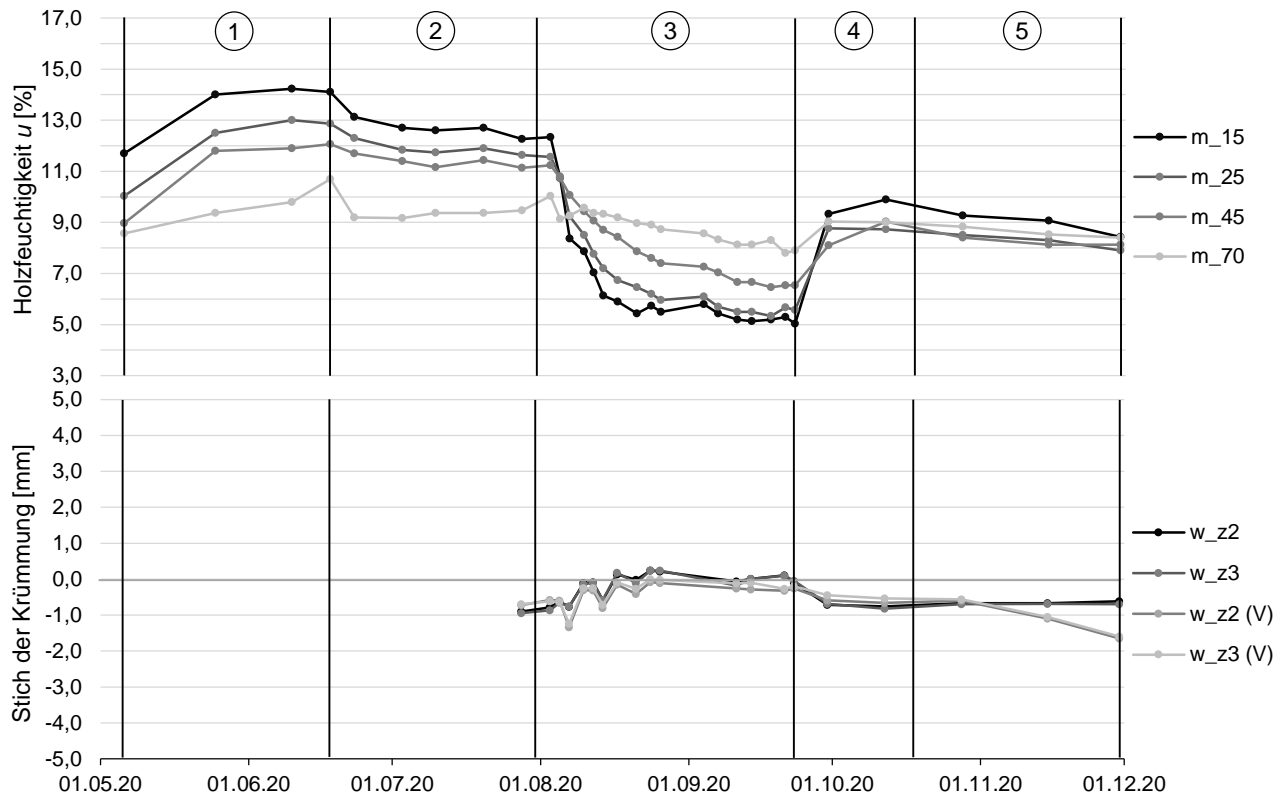


Abbildung A21: Gemessene Holzfeuchte und Stich der Krümmung der Serie M-4

Serie M-5

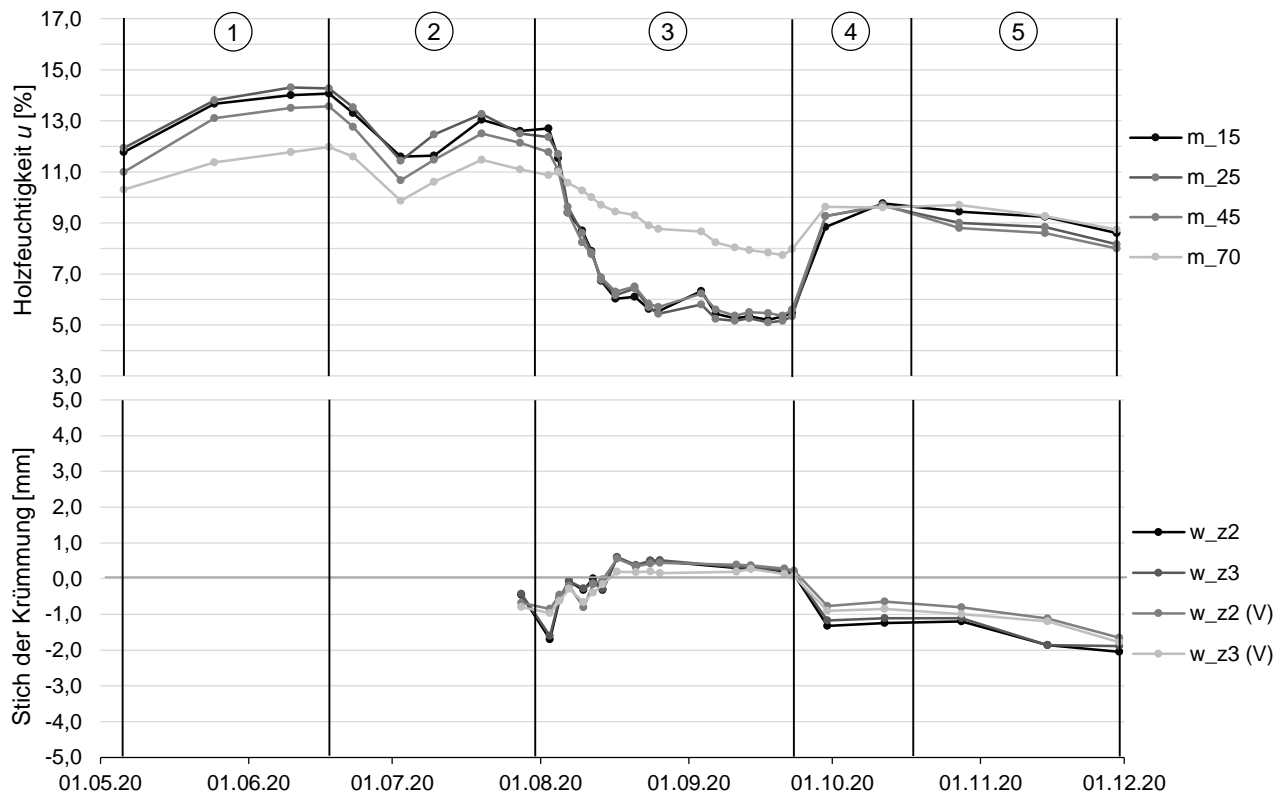


Abbildung A3: Gemessene Holzfeuchte und Stich der Krümmung der Serie M-5

Anhang WP5-2: Rissbilder der Frontlagen infolge der klimatischen Versuche (nach der Heizphase)

Abbildung A4: Rissbild Prüfkörper M-1-3 (V)



Abbildung A5: Rissbild Prüfkörper M-2-2



Abbildung A6: Rissbild Prüfkörper M-2-3 (V)

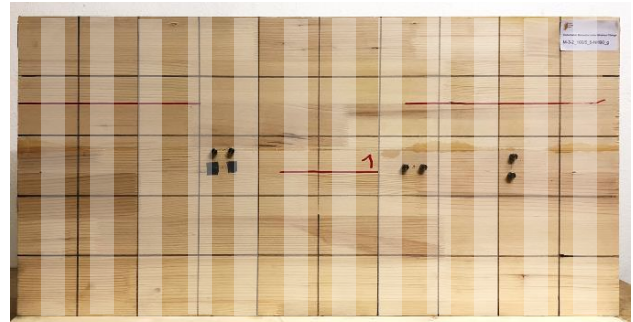


Abbildung A7: Rissbilder Prüfkörper M-3-1 (links) und M-3-2 (rechts)

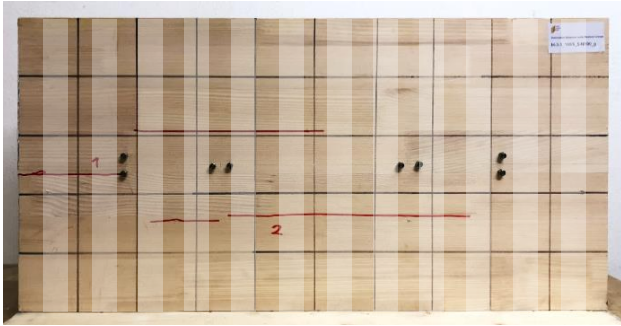


Abbildung A8: Rissbild Prüfkörper M-3-3 (V)

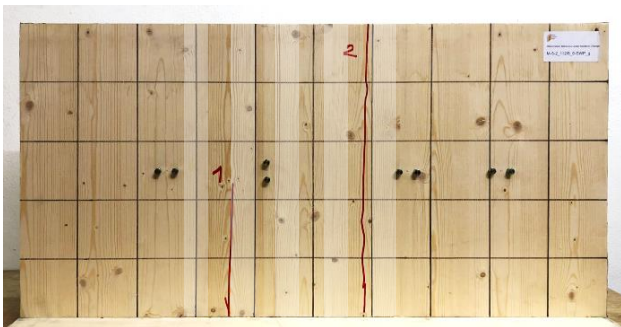


Abbildung A9: Rissbild Prüfkörper M-5-2

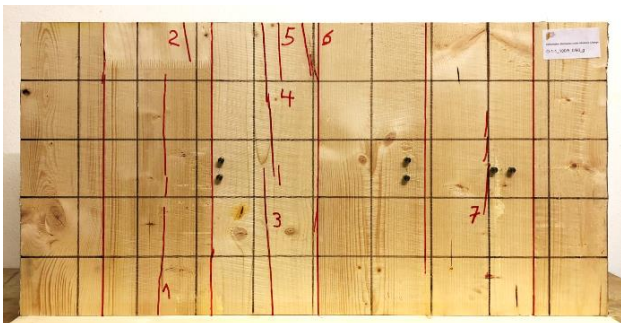


Abbildung A10: Rissbilder Prüfkörper O-1-1 (links) und O-1-2 (rechts)



Abbildung A11: Rissbild Prüfkörper O-1-3 (V)

Anhang WP5-3: Einbringorte und Einbringtiefe der Thermoelmente für die experimentellen Untersuchungen zum Brandverhalten von multifunktionalem CLT

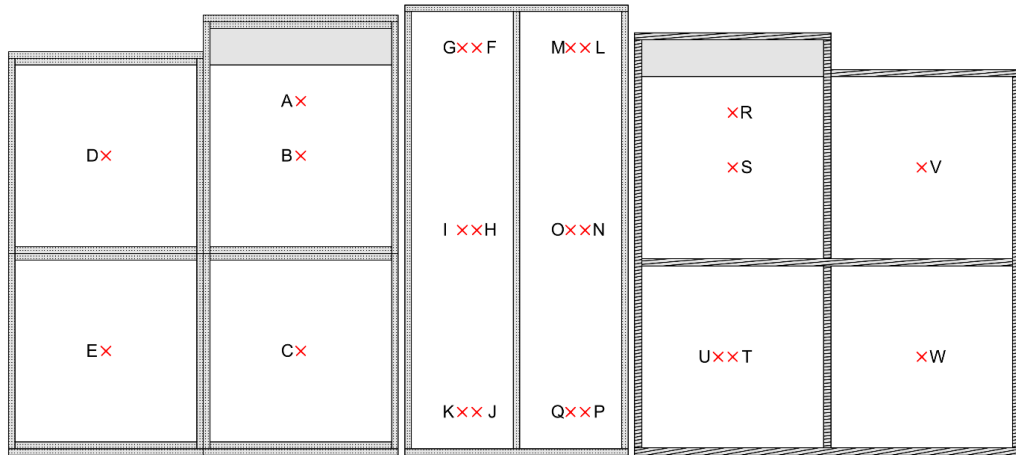


Abbildung A12: Einbringorte der Thermoelmente (Messstellen) [21]

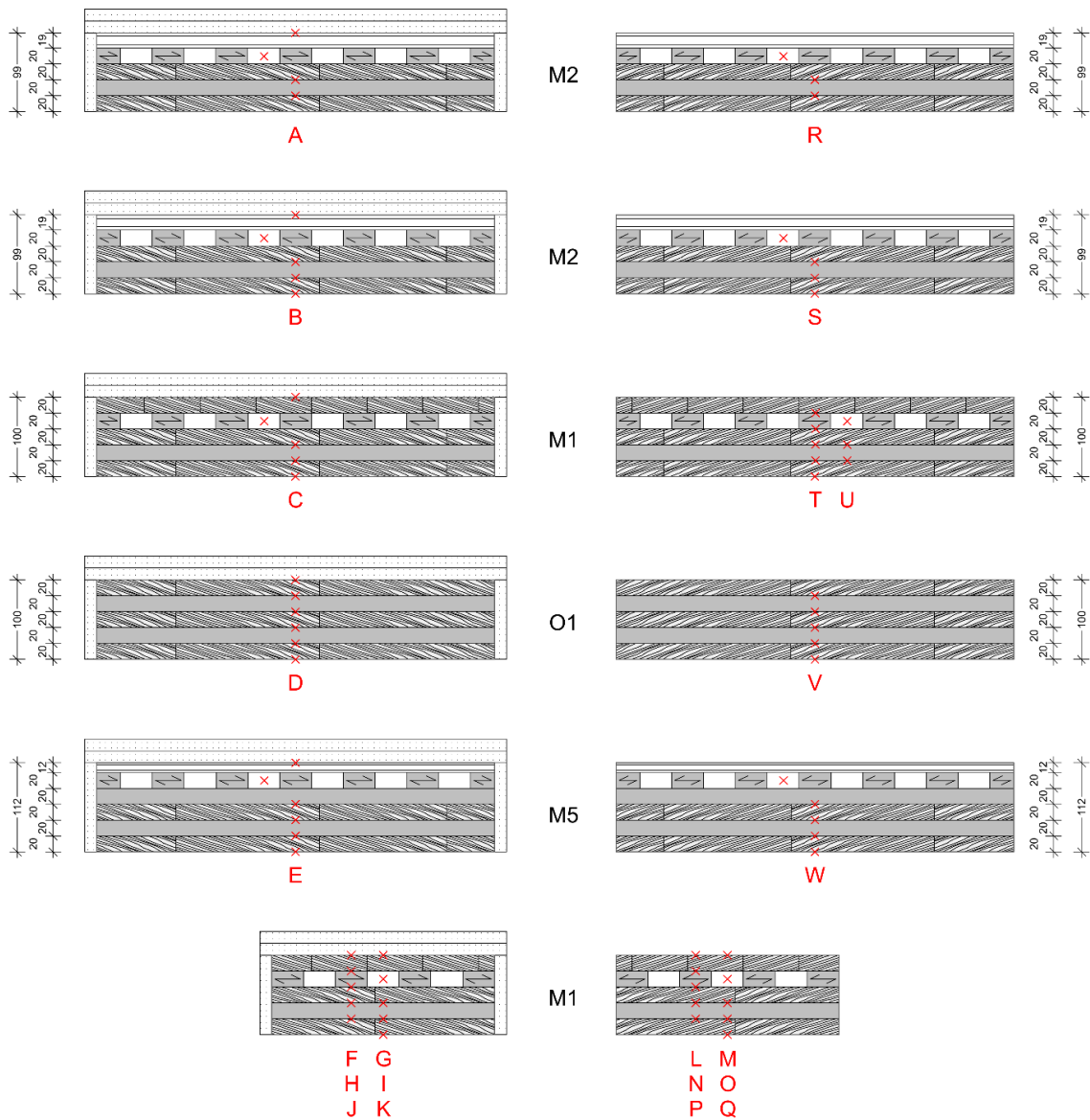


Abbildung A13: Anzahl und Einbringtiefe der Thermolemente je Messstelle und Serie [21]

2. Anhang AP6

Anhang WP6-1: Digitaler Fragebogen

InnoCrossLam - CLT modelling

Welcome to our survey that aims at gathering the current state of the art in cross-laminated timber (CLT) modelling.

We would like to know from you how you carry out the design of CLT, respectively the modelling and determination of internal stresses. Further on, it is very important where you would like to see improvements.

Your feedback will help us fundamentally to improve the existing tools and develop new features.

The survey should only take 15 minutes and the processing of your data is completely anonymous.

Questions marked with an asterisk (*) are required.

Answers marked with a small circle (○) are single-choice, answers with a small rectangle (☐) multiple-choice.

If you have any queries please do not hesitate to contact us: innocrosslam.survey.bgu@tum.de

InnoCrossLam is an European research project. It aims to increase the competitiveness of CLT by increasing its predictability in demanding design situations not covered by the guidelines of today. For further information on the project visit <http://innocrosslam.zag.si>.

You can also follow us on Twitter: [@innolam](https://twitter.com/innolam)

We look forward to your feedback!

I. Experience on CLT construction

1) Are you familiar with CLT construction?*

	▪ 1	▪ 2	▪ 3	▪ 4	▪ 5	
▪ I am not familiar	▪ ○	▪ ○	▪ ○	▪ ○	▪ ○	I am really familiar

2) Are you confident that current CLT design concepts are adequate?*

	▪ 1	▪ 2	▪ 3	▪ 4	▪ 5	
▪ Not at all	▪ ○	▪ ○	▪ ○	▪ ○	▪ ○	Yes

3) Type of CLT buildings you design/build:*

- Single/double family houses
- Apartment buildings (1-3 storeys)
- Multi-storey buildings (4+ storeys)
- Industry buildings (e.g. large span halls)
- Public buildings and buildings for assemblies (schools, etc.)
- Special constructions (shells, concrete formwork, etc.)
- Other: _____

4) Where do you see potential for improvement in the construction with CLT?

II. General design methodology with CLT

5) How do you usually perform the calculation of CLT elements?*

- By hand calculation
- CLT oriented software (i.e. CLTdesigner, ...)
- Software provided by a producer (i.e. KLH Designer, Calculatis, ...)
- Practice oriented FEM software (i.e. RFEM, SAP2000, ...)
- Advanced FEM software (i.e. Ansys, Abaqus, ...)
- Own solutions (i.e. Excel sheets, Matlab, ...)
- Other: _____

If you use a combination of above named solutions, please describe shortly the used combination.

6) Which software do you use for the calculation of CLT and what is your level of satisfaction?*

1 = I am not satisfied at all, 5 = I am pretty satisfied

	Haven't used / Don't know	1	2	3	4	5
CLT oriented software (i.e. CLTdesigner, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Software provided by a producer (i.e. KLH Designer, Calculatis, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Practice oriented FEM software (i.e. Dlubal , SAP 2000, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Advanced FEM software (i.e. Abaqus, Ansys)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Own solutions (i.e. Excel sheets, Matlab, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Other	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Please name your used software.

7) According to which theory do you usually solve the calculation of CLT plates in bending?*

- γ -Method
- Shear analogy (according to Kreuzinger)
- Girder grid (Timoshenko, Bernoulli, ...)
- Theory of plates (Kirchhoff, Reissner-Mindlin, ...)
- I do not know.
- Other: _____

8) Do you use specific literature that supports your CLT design? If yes, please name it/them:

III. FEM Software input data regarding CLT: material parameters

9) According to which theory of the material do you implement CLT into your calculation?*

- Isotropic
- Orthotropic
- Transversely isotropic
- I do not know.
- Other: _____

10) Where do you get the material parameters for your CLT model (Young's modulus, shear modulus, etc.)?*

- EN 338 - Structural timber
- EN 14080 - Glued laminated timber and glued solid timber
- EN 16531 - Cross laminated timber
- European Technical Assessment (ETA) (or similar document)
- Data sheet by the CLT producer
- It is implemented in the program that I use.
- I do not know.
- Other: _____

11) How do you implement the Poisson's ratio?*

- $\nu = 0.0$
- $\nu = 0.2$
- I do not know.
- Other: _____

12) How is the layering implemented in your software?*

- Homogeneous cross-section with effective properties
- Non-homogeneous cross-section with layer properties
- Higher-order plate theory
- I do not know.
- Other: _____

13) Do you consider torsional (twisting) stiffness?*

- Yes, torsional stiffness > 0.
- Yes, torsional stiffness = 0.
- No.
- I do not know.

14) How do you consider the torsional (twisting) stiffness?

- Voigt notation
- Tensor notation
- Depends on the software I use.
- I do not know.
- Other: _____

IV. FEM Software output data regarding CLT: verification

15) Do you verify the output of your software?*

- Yes
- No

How do you verify the output of your software?

V. Special issues: challenges

Sometimes, you are confronted with special design issues, as the ones mentioned below. In the following questions, we would like to know your opinion on the existing design models for them.

16) From your point of view, which of the following design issues is the most challenging to solve/design?*

- Openings in walls
- Openings in floors
- Deep CLT beams
- Holes in CLT beams
- Point supports or loads
- Cantilevers
- Asymmetrical CLT lay-up
- I have not encountered any of the above. (Go to question 18.)

Is there any other design issue, which you consider a challenge?

17) Why is it challenging?*

- Missing/incomplete design concept
- Missing/incomplete material/design parameters
- Missing/incomplete software implementation
- Missing/incomplete geometric parameters
- Other: _____

VI. Special issues: problems

18) Is there any design issue, which you have not been able to solve?*

- No, I was always able to solve every issue.
- Openings in walls
- Openings in floors
- Deep CLT beams
- Holes in CLT beams
- Point supports or loads
- Cantilevers
- Asymmetrical CLT lay-up
- Other: _____

19) Why have you not been able to solve it?*

- Missing/incomplete design concept
- Missing/incomplete software implementation
- Missing/incomplete geometric parameters
- Missing/incomplete material/design parameters
- Other: _____

VII. Special issues: improvement

20) In which of these issues do you see potential for improvement?*

- Openings in walls
- Openings in floors
- Deep CLT beams
- Holes in CLT beams
- Point supports or loads
- Cantilevers
- Asymmetrical CLT lay-up
- Other: _____

VIII. Connections in CLT structures

21) How do you model connections between CLT floors and CLT walls for your calculation?*

- I do not consider them.
- Hinge
- Spring
- Rigid

22) How do you consider connections between CLT panels and concrete elements (e.g. elevator shaft, concrete slab)?*

- I do not consider them.
- Hinge
- Spring
- Rigid

23) How do you consider connections between CLT elements within a wall or within a floor?*

- I do not consider them.
- Hinge
- Spring
- Rigid

24) Where do you get the required values for connections?*

- Documentation from CLT producer
- Documentation from connection producer
- Engineering judgement based on experience
- γ -Method
- Relevant literature (see below)
- Other: _____

Please name the literature from which you get required values.
(Please give only an answer if you chose 'relevant literature'.)

- BSP Handbuch by Markus Wallner-Novak + al.
- CLT Handbook by Erol Karacabeyli + Brad Douglas
- EN 1995-1-1
- Other: _____

25) If you use any additional software to design CLT connections, please tell us which.

26) Do you validate the results of your calculation?*

- Yes
- No

How do you validate the results of your calculation in detail (rough numbers, simple model, hand calculation, ...)?
(Please give only an answer if you validate your results.)

27) Do you deem the existing tools for the calculation of connections between CLT elements as sufficient?*

- Yes
- No

28) Where do you see potential for improvement of the design regarding the calculation with connections of CLT elements?

IX. Seismic design

29) Have you ever designed a CLT building structure on a seismically active area?*

- Yes
- No

(Go to question 34.)

30) What type of structural systems have you used in your design?*

- CLT wall structure

- Light timber frame + CLT wall/slab elements
- Moment-resisting frame (e.g. GLT) + CLT wall/slab elements
- Concrete core(s) + CLT wall/slab elements
- Other: _____

31) What type of analysis have you used for these structures?*

- Lateral force method of analysis (equivalent static method)
- Modal response spectrum analysis
- Linear time history (dynamic) analysis
- Non-linear static (pushover) analysis
- Non-linear time history (dynamic) analysis
- Incremental dynamic analysis (IDA)
- Other: _____

32) If using modal analysis, how do you define behaviour factors (q-factor)?

- No force reduction is used ($q=1.0$)
- Low-ductility is assumed ($q=1.5$)
- Values for timber structures in the current EC8 standard are used and adjusted accordingly for CLT structures.
- Values for other structural systems (e.g. concrete) in the current EC8 structures are used and adjusted accordingly for CLT structures.
- Other: _____

33) Would you consider using non-linear analysis procedure for complex CLT structures (e.g. more than 10-storey building, irregular structure by floor plan, irregular structure by height, ...)?

- Yes
- No

34) What is in your opinion the main reason why timber (CLT) or hybrid (CLT-concrete) structures are not commonly used for high-rise buildings on seismically active areas?*

	- Strongly disagree	2	3	4	5 - Strongly agree
Missing standard solutions	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
High costs	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Other structural systems are more effective	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Missing qualified building contractors	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Other issues, such as fire safety, durability etc.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

X. Final remarks

35) Did this survey miss any specific topic of the design/modelling of CLT?
Please describe:

XI. General information

36) Country*

37) Type of company/institution you are from:*

- Construction company
- Design company
- Researcher at company
- University or research Institute
- Other: _____

38) Size of your company/institution based on the number of employees:*

- < 5 employees
- 5 to 10 employees
- 11 to 30 employees
- > 30 employees

39) Your work experience in years:*

- < 3 years
- 3 to 10 years
- 11 to 20 years
- > 20 years

40) Percentage of CLT structures (or research projects) in the order volume of your company/institution:*

- < 10 %
- 10 - 40 %
- 41 - 70 %
- > 70 %

41) Percentage of timber structures (or research projects) in the order volume of your company/institution:*

- < 10 %
- 10 - 40 %
- 41 - 70 %
- > 70 %

XII. Final information

42) Could we contact you for further information on your work with CLT?*

- Yes
- No

(Thank you for your answers!)

XIII. Contacts

43) Name

44) E-mail*

Thank you!

Anhang WP6-2: Persönliche Interviews**InnoCrossLam - CLT modelling personal interview**

Welcome to our personal interview that aims at gathering the current state of the art in cross-laminated timber (CLT) modelling.

We would like to know from you how you carry out the design of CLT, respectively the modelling and determination of internal stresses. Further on, it is very important where you would like to see improvements. Your feedback will help us fundamentally to improve the existing tools and develop new features.

The processing of your data is completely anonymous.

If you have any queries please do not hesitate to contact me: martin.schenk@tum.de

InnoCrossLam is a European research project. It aims to increase the competitiveness of CLT by increasing its predictability in demanding design situations not covered by the guidelines of today. For further information on the project visit <http://innocrosslam.zag.si>.

You can also follow us on Twitter: [@ino_lam](https://twitter.com/ino_lam)

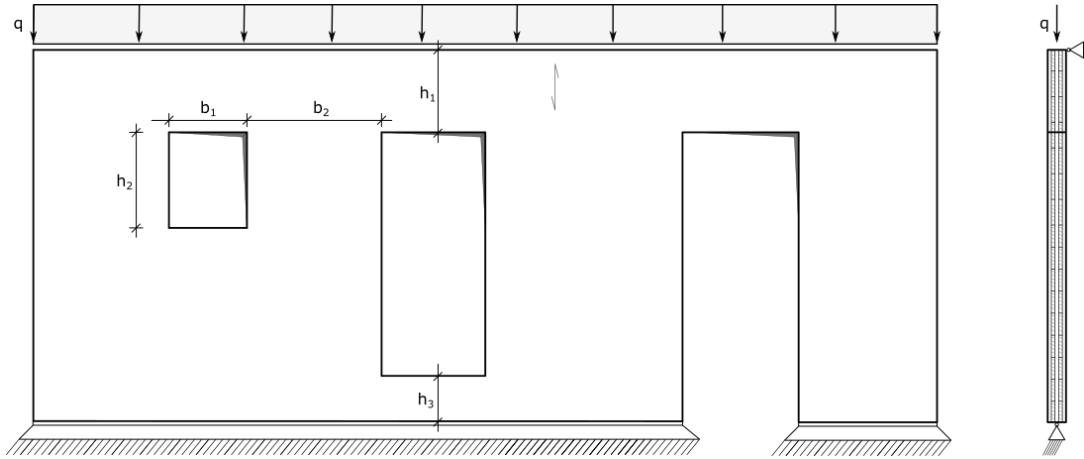
We look forward to your feedback!

I. Special issues: Preliminary design

Openings in walls:

1) How do you typically realize the preliminary design of openings in walls e.g. required dimensions shown below?

(Please describe the approach. You can use sketches in the figure below for additional information.)



Additional sketch:

Description:

2) How do you verify the results of your preliminary approach?*

3) Do you have an estimation of size of openings that can be neglected?*

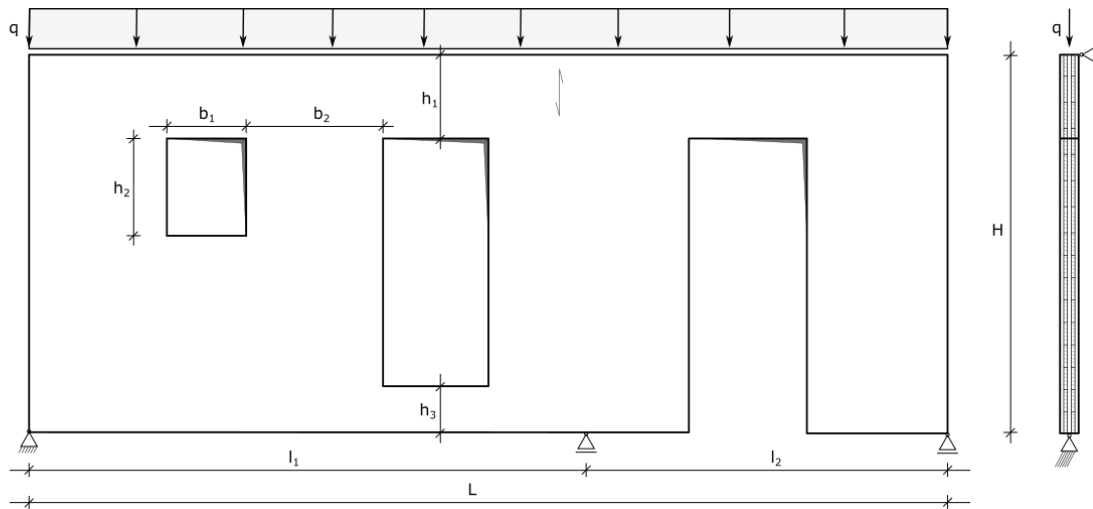
- Yes (Please describe. You can use sketches in the figure above for additional information.)
- No

Description:

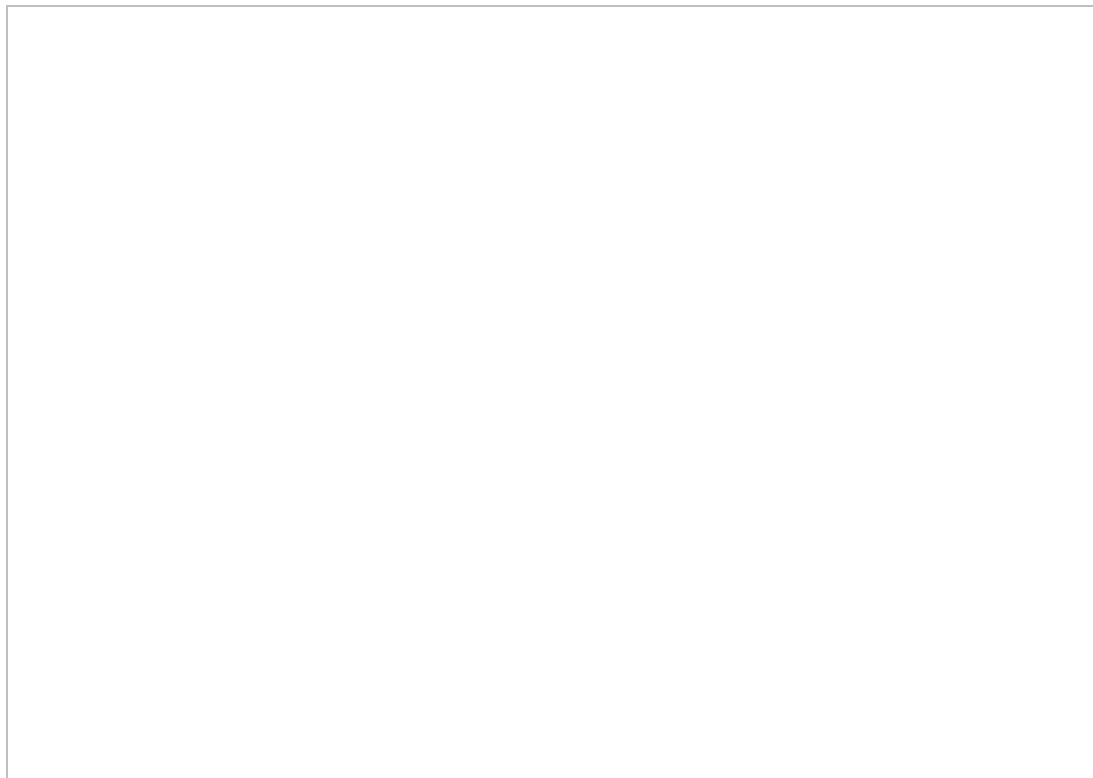
4) How do you substantiate these estimations?

Deep beams:

5) How do your assumptions in 1) – 4) differ in the case of a deep beam?



Additional sketch:



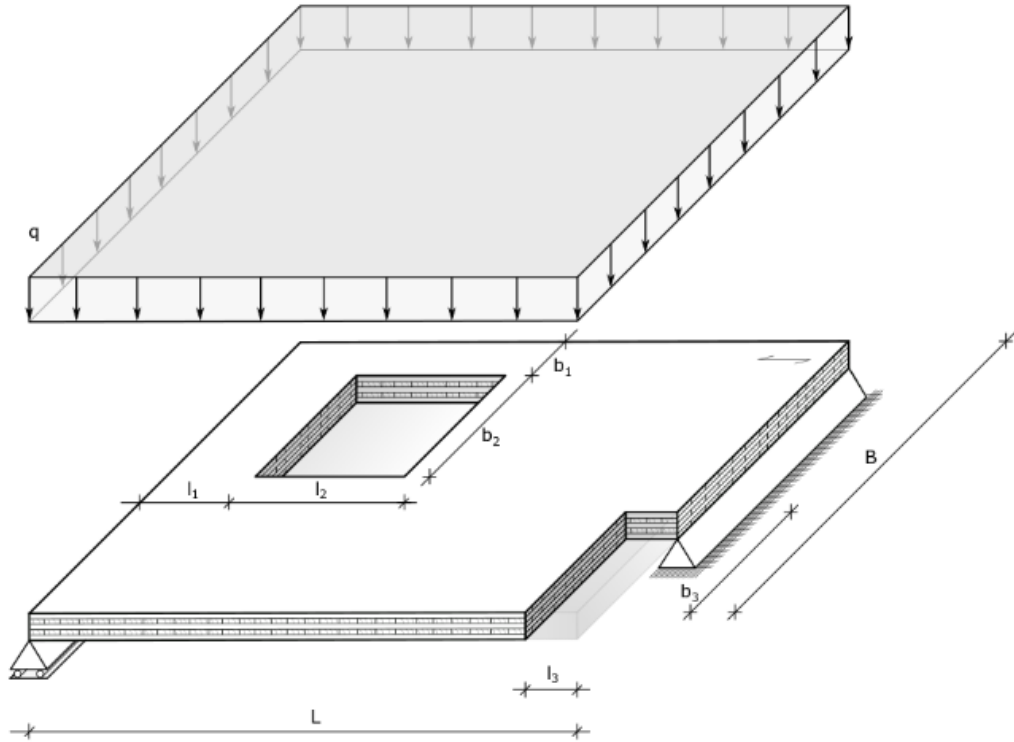
Description:

6) For which ratio l/h_i do you assume a linear bending stress distribution?

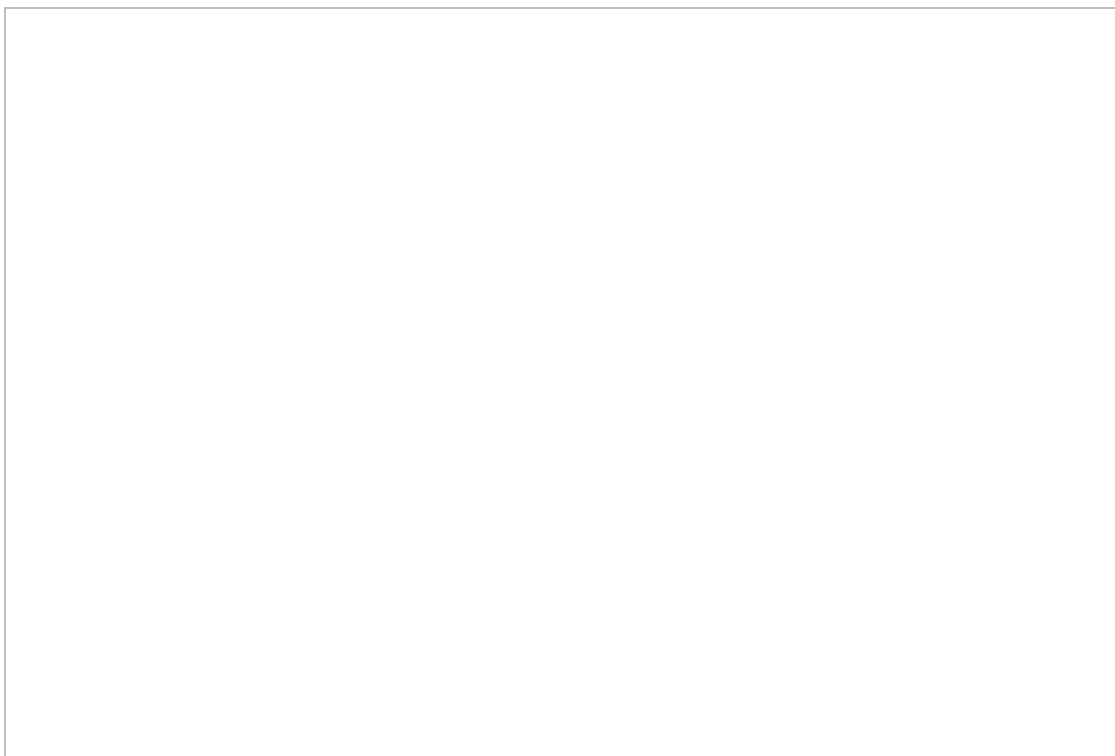
Openings in floors:

7) How do you typically realize the preliminary design of openings in floors e.g. required dimensions shown below?*

(Please describe the approach. You can use sketches in the figure below for additional information.)



Additional sketch:



Description:

8) How do you verify the results of your preliminary approach?*

9) Do you have an estimation of size of openings that can be neglected?*

- Yes (Please describe. You can use sketches in the figure above for additional information.)
- No

Description:

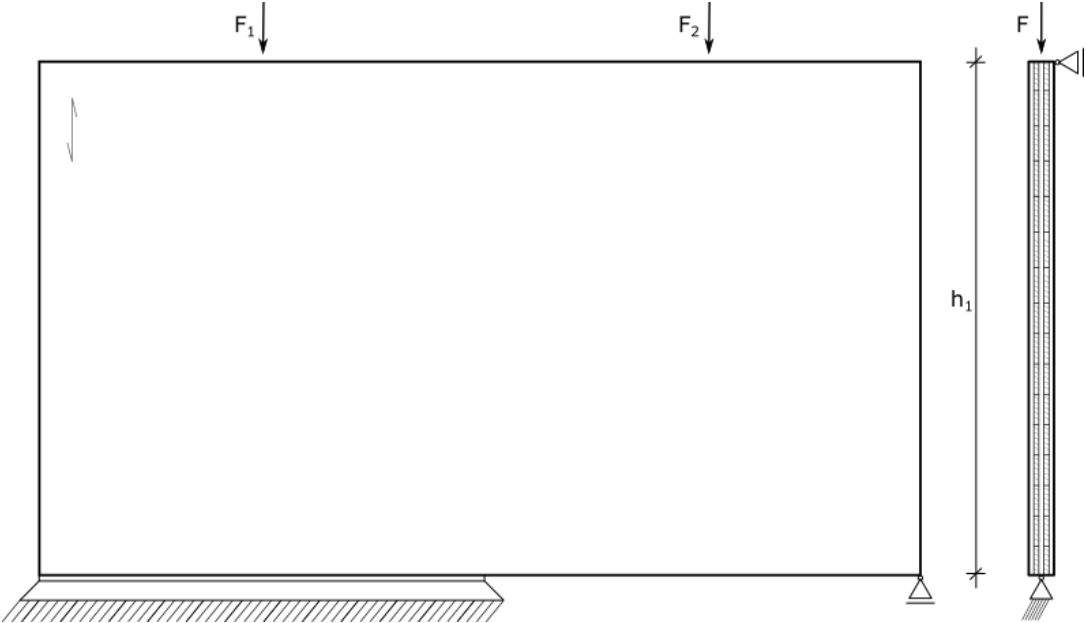
10) How do you substantiate these estimations?

Point supports and concentrated loads:

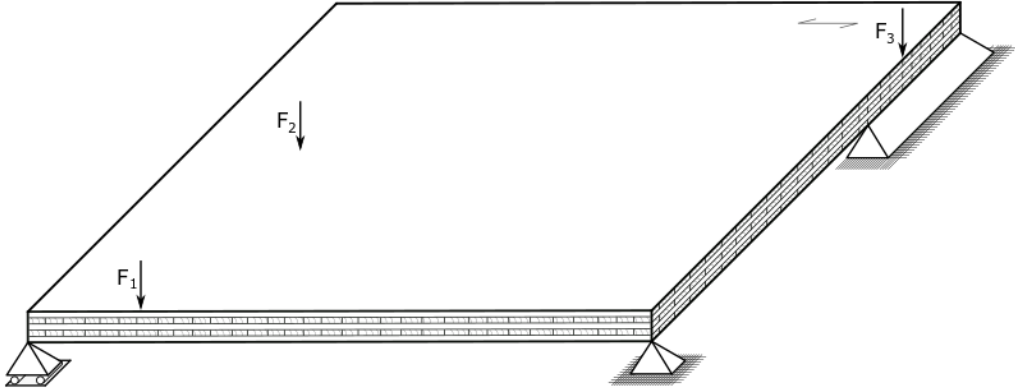
11) Which activated area (contact area + stress distribution) do you assume for point supports or concentrated loads?*

(Please describe the approach. You can use sketches in the figure below for additional information.)

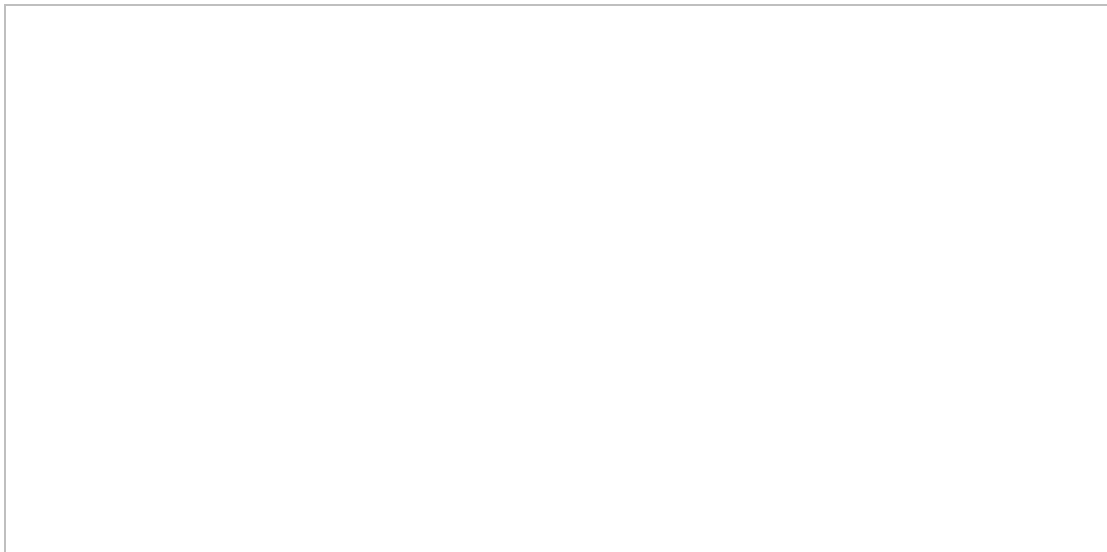
Wall:



Floor:



Additional sketch:



Description:

12) Do you assume an angle of stress distribution at the point support or concentrated load?*

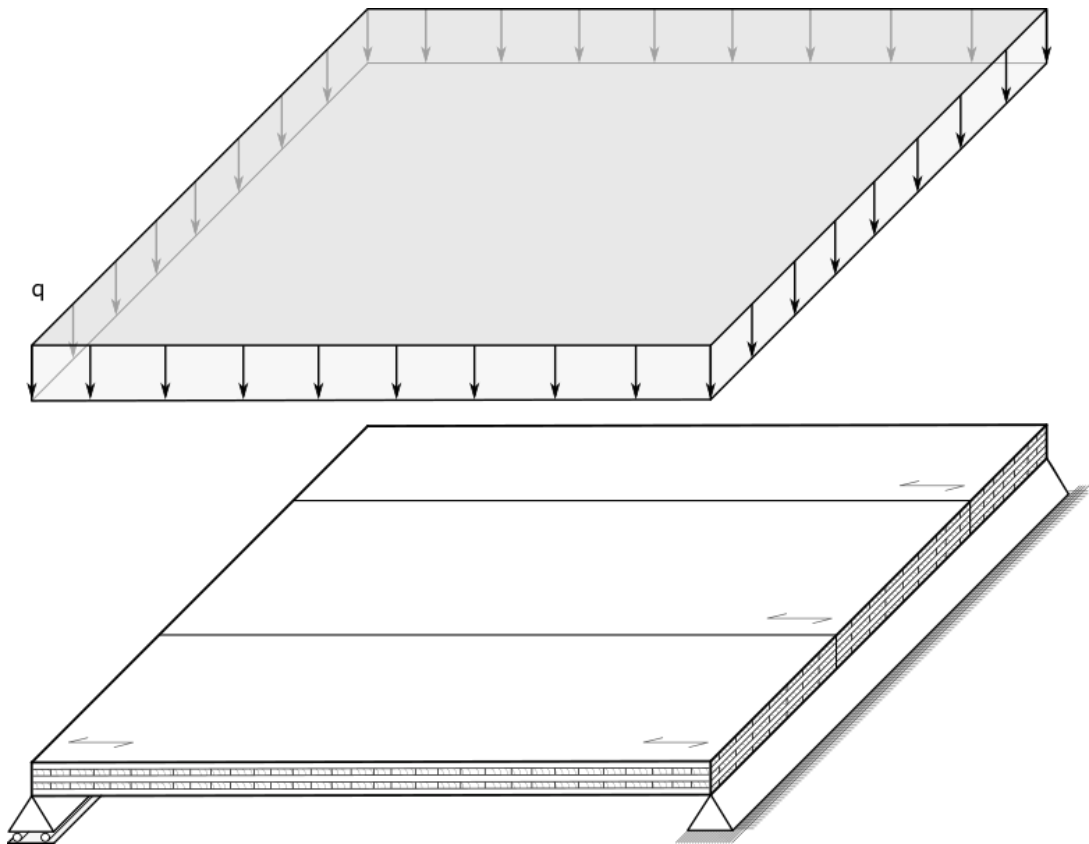
- Yes (Please describe the approach. You can use sketches in the field below for additional information.)
- No

Description:

II. Load bearing connections in CLT structures

13) Do you have a typical connection that you apply between the elements within CLT floors?

- Yes (Please describe the connection. You can use sketches in the figure below for additional information.)
- No

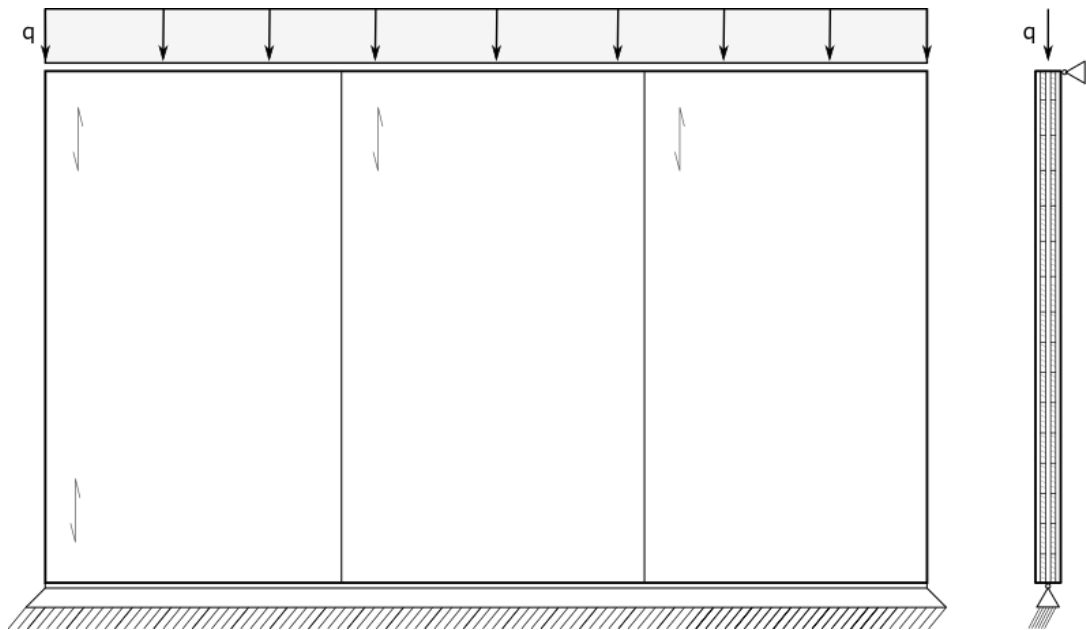


Additional sketch:

Description:

14) Do you use the same typical connection for elements within CLT walls?

- Yes
- No (Please describe the connection. You can use sketches in the figure below for additional information.)



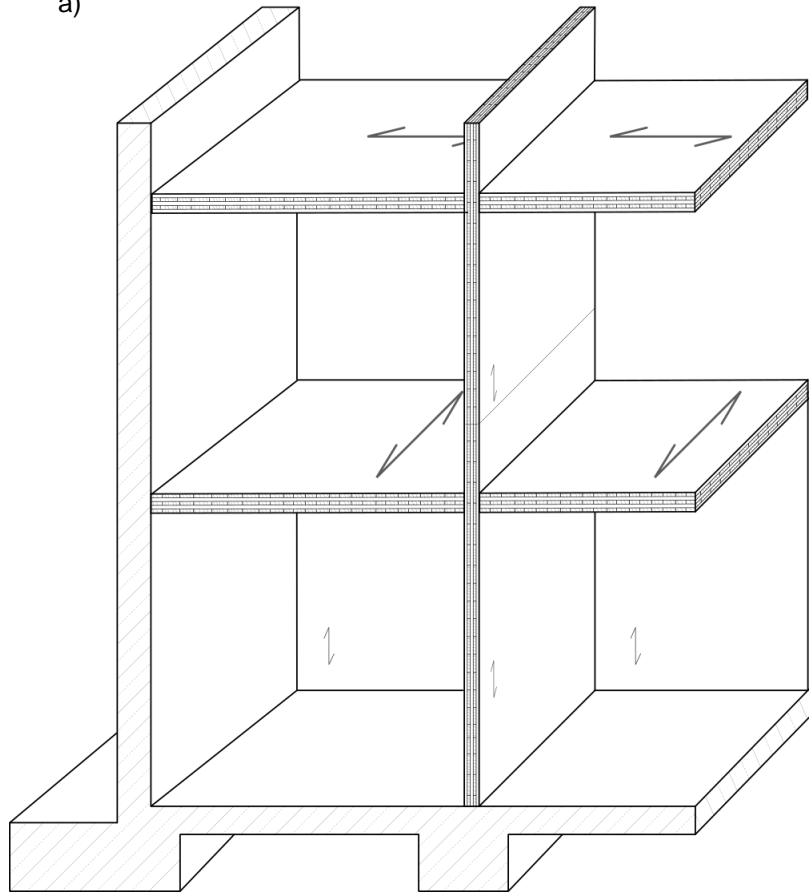
Additional sketch:

Description:

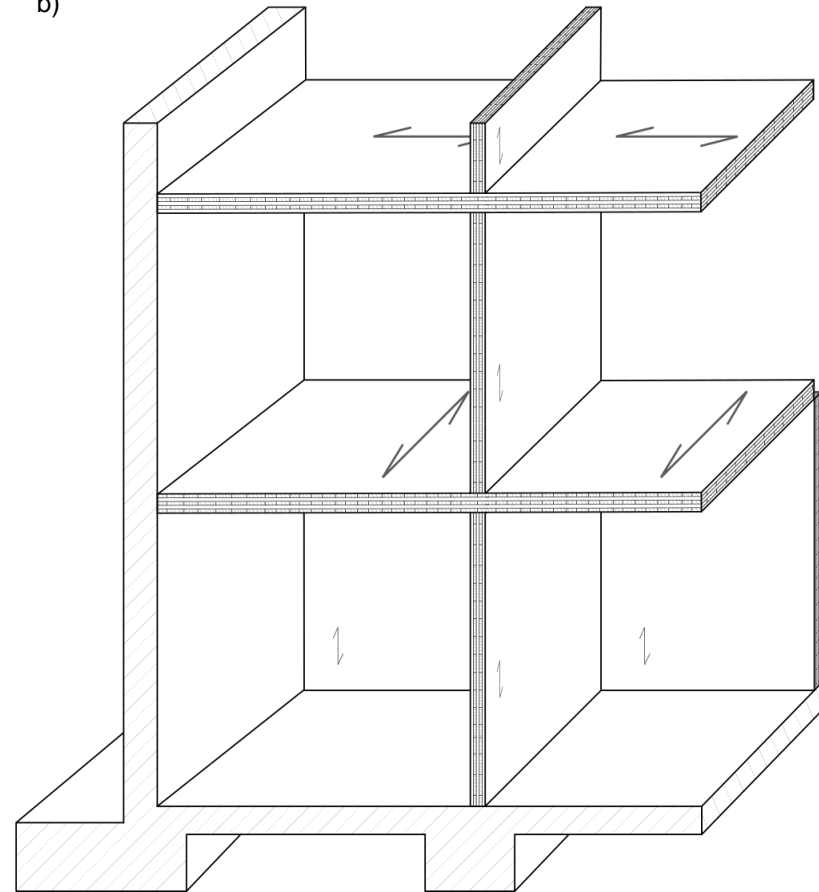
15) Please chose a preferred construction method for mid- and high-rise CLT buildings (+4 storeys).

- a) Balloon framing or semi-balloon framing
- b) Platform framing

a)



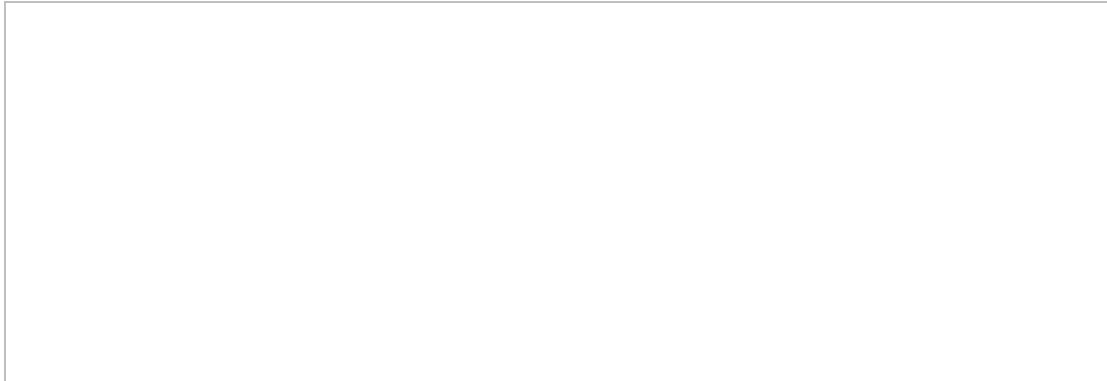
b)



16) Do you have a **typical connection** that you apply between **CLT wall and CLT floor elements** in **primary direction**?

- Yes (Please describe the connection. You can use sketches for additional information.)
- No

Additional sketch:

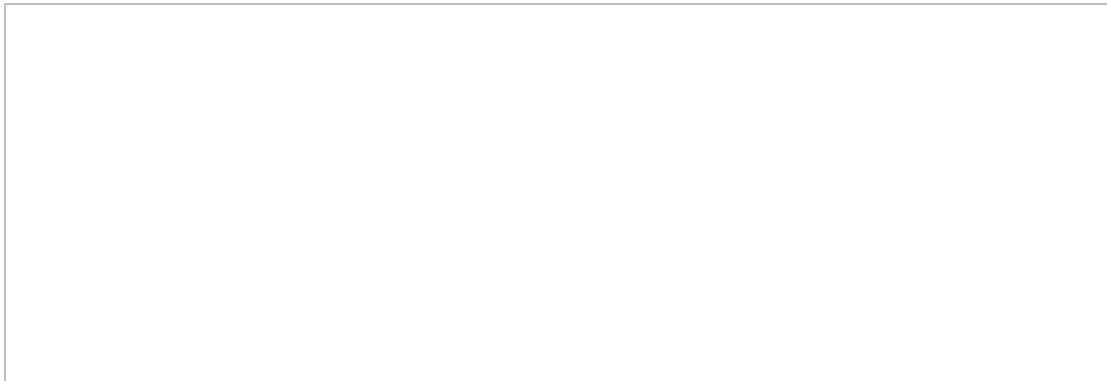


Description:

17) Do you have a **typical connection** that you apply between **concrete walls and CLT floor elements** in **primary direction**?

- Yes (Please describe the connection. You can use sketches for additional information.)
- No

Additional sketch:

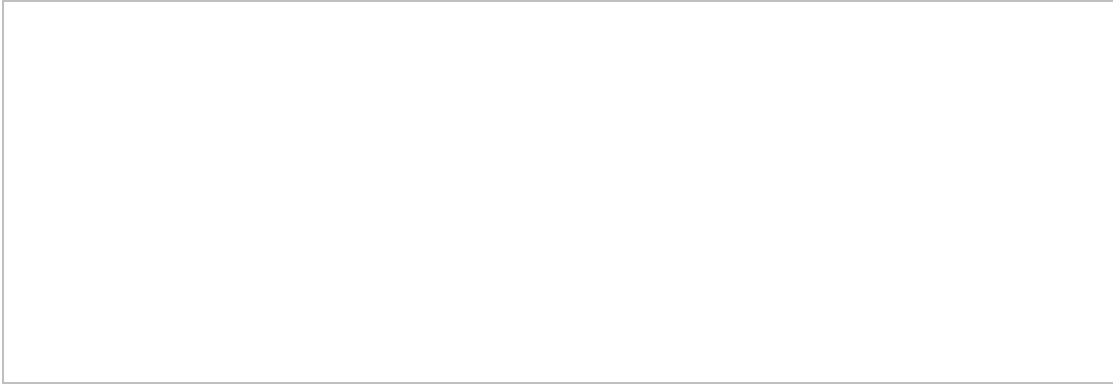


Description:

18) Do you have a **typical connection** that you apply between **CLT wall and CLT floor elements** in **secondary direction** that differs from the connection in primary direction?

- Yes (Please describe the connection. You can use sketches for additional information.)
- No

Additional sketch:

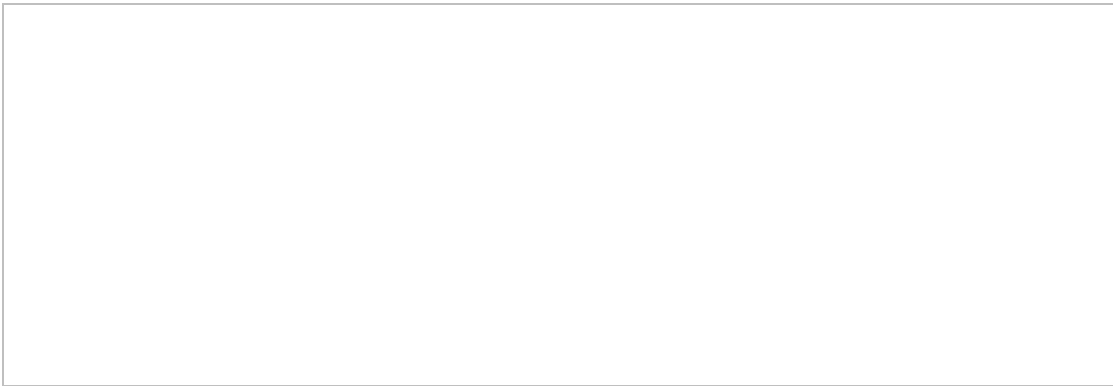


Description:

19) Do you have a **typical connection** that you apply between **concrete walls and CLT floor elements** in **secondary direction** that differs from the connection in primary direction?

- Yes (Please describe the connection. You can use sketches for additional information.)
- No

Additional sketch:



Description:

20) Do you have a **typical connection** that you apply between the **foundation and CLT wall elements**?

- Yes (Please describe the connection. You can use sketches for additional information.)
- No

Additional sketch:

Description:

21) Do you have a **typical connection** that you apply between **concrete walls and CLT wall elements**?

- Yes (Please describe the connection. You can use sketches for additional information.)
- No

Additional sketch:

Description:

22) Where do you get the stiffness (slip modulus) for your typical connections:*

#	Description	Source of the slip modulus
a)	CLT wall and CLT floor elements in primary direction	
b)	concrete walls and CLT floor elements in primary direction	
c)	CLT wall and CLT floor elements in secondary direction	
d)	concrete walls and CLT floor elements in secondary direction	
e)	foundation and CLT wall elements	
f)	concrete walls and CLT wall elements	

23) Do you mainly use fasteners/connectors of (one or two) specific companies/producers?*

- Yes
- No

Which ones' namely?

24) In connection design, do you have general assumptions (rules of thumb), as e.g. 'the CLT element bear compressive forces while the fasteners bear the shear'?
(Please describe the approach. You can use sketches in the field below for additional information.)

Additional sketch:



Description:

25) If you design in seismically active regions, do 14) – 25) differ?

- I do not design in seismically active regions.
- No, I do not use other types of connections and assumptions in seismically active regions than shown in 14) - 25).
- Yes, my typical connections and assumptions for seismically active regions differ.

Namely:

III. General

26) Do you mainly use the products of a certain CLT company/producer?*

- Yes
- No

Which one's namely?

Thank you!

Anhang WP6-3: Vergleich der 2D-Modellierung mit der Laminattheorie und dem Schubanalogieverfahren und dem γ -Verfahren am einfachen System

Eine 2D-FEM Modellierung wird üblicherweise nur bei komplexeren Systemen verwendet. In diesem Abschnitt wird ein einfaches Bemessungsbeispiel mit den drei genannten Verfahren durchgerechnet. Anschließend werden die Ergebnisse verglichen, und sollen damit zeigen, dass die Laminattheorie geeignet ist, um Brettsperrholz abzubilden. Die Berechnung bleibt auf charakteristischem Niveau. Eine Bemessung findet nicht statt.

Gegeben ist folgendes Beispiel:

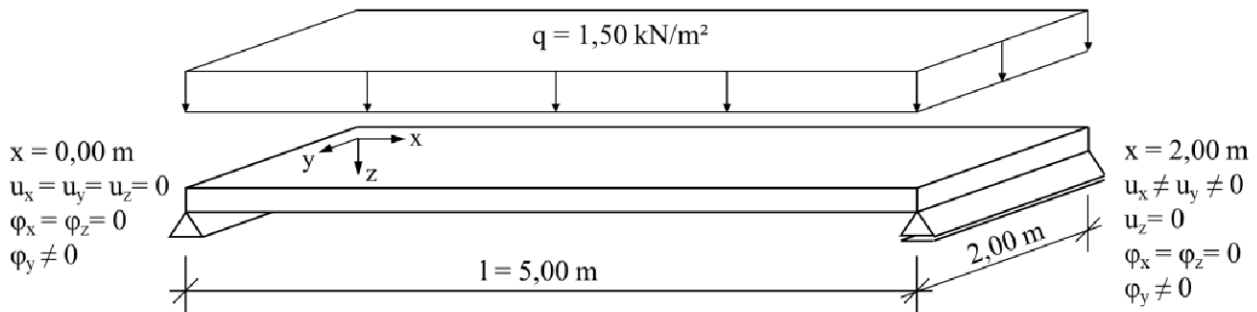


Abbildung 118: Beispielsystem [62]

mit folgendem Aufbau nach ETA 06/0138:2017:

Tabelle 57: Aufbau des Brettsperrholzes für die Beispielrechnung

Lamelle i	d_i [m]	$E_{xx,i}$ [MN/m ²]	$E_{yy,i}$ [MN/m ²]	$G_{xz,i}$ [MN/m ²]	$G_{yz,i}$ [MN/m ²]	$G_{xy,i} = G_{yx,i}$ [MN/m ²]
1	$40 \cdot 10^{-3}$	12000	0	690	50	690
2	$20 \cdot 10^{-3}$	0	12000	50	690	690
3	$40 \cdot 10^{-3}$	12000	0	690	50	690
4	$20 \cdot 10^{-3}$	0	12000	50	690	690
5	$40 \cdot 10^{-3}$	12000	0	690	50	690
d_{ges}	$160 \cdot 10^{-3}$					

γ -Methode:

Berechnung der γ -Werte in x-Richtung:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + (EA)_{x,1} \cdot \frac{\pi^2}{l^2} \cdot \frac{d_L}{b \cdot G_R}} = \frac{1}{1 + 12000 \frac{MN}{m^2} \cdot 1.0m \cdot \frac{\pi^2 \cdot 0.04m}{(5.0m \cdot 1.0)^2} \cdot \frac{0.02m}{1.0m \cdot 50 \frac{MN}{m^2}}} = 0.93 \quad (\text{AP6-67})$$

$$\gamma_2 = 1.0$$

$$\gamma_3 = 0.93$$

Berechnung der Hebelarme in x-Richtung:

$$a_{x,1} = 0.06 \text{ m}$$

$$a_{x,2} = 0.00 \text{ m} \quad (\text{AP6-68})$$

$$a_{x,3} = 0.06 \text{ m}$$

Berechnung der Biegesteifigkeit in x-Richtung:

$$B_{x,ef} = 3 \cdot 12000 \cdot \frac{(0.04)^3}{12} + 2 \cdot 0.93 \cdot 12000 \cdot 0.04 \cdot (0.06)^2 = 3.41 \text{ MNm}^2/\text{m} \quad (\text{AP6-69})$$

Berechnung der Anfangsverformung:

$$w = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot B_{x,ef}} = \frac{5 \cdot 1.5 \cdot 5.0^4}{384 \cdot 3.41} = 3.58 \text{ mm} \quad (\text{AP6-70})$$

Normalkraft in der untersten Lage:

$$n_5 = \frac{1.5 \cdot \frac{5.0^2}{8}}{3.41} \cdot 0.06 \cdot 12000 \cdot 0.04 \cdot 0.93 = 36.8 \text{ kN/m} \quad (\text{AP6-71})$$

Biegemoment in der untersten Lage:

$$m_5 = \frac{1.5 \cdot \frac{5.0^2}{8}}{3.41} \cdot 12000 \cdot \frac{0.04^3}{12} = 0.09 \text{ kNm/m} \quad (\text{AP6-72})$$

Zugspannung am unteren Rand der untersten Lage:

$$\sigma_{5,u} = \frac{36.8 \cdot 10^{-3}}{0.04} + \frac{0.09 \cdot 10^{-3}}{\frac{0.04^2}{6}} = 1.26 \text{ MN/m}^2 \quad (\text{AP6-73})$$

Schubanalogieverfahren:

Berechnung der Eingangsgrößen für Ebene A:

$$B_A = \sum E_i \cdot I_i = 3 \cdot 12000 \cdot \frac{0.04^3}{12} = 0.192 \text{ MNm}^2/\text{m} \quad (\text{AP6-74})$$

$$S_A \rightarrow \infty$$

Berechnung der Eingangsgrößen für Ebene B:

$$B_B = \sum E_i \cdot A_i \cdot z_{s,i}^2 = 2 \cdot 12000 \cdot 0.04 \cdot (0.06)^2 = 3.456 \text{ MNm}^2/\text{m} \quad (\text{AP6-75})$$

$$\frac{1}{S_B} = \frac{1}{\left(0.16 - \frac{2 \cdot 0.04}{2}\right)^2} \cdot \left\{ 2 \cdot \frac{0.04}{2 \cdot 690} + 2 \cdot \frac{0.02}{50} + \frac{0.04}{690} \right\} \rightarrow S_B = 15.72 \text{ MN/m}$$

Ergebnis der Anfangsverformung:

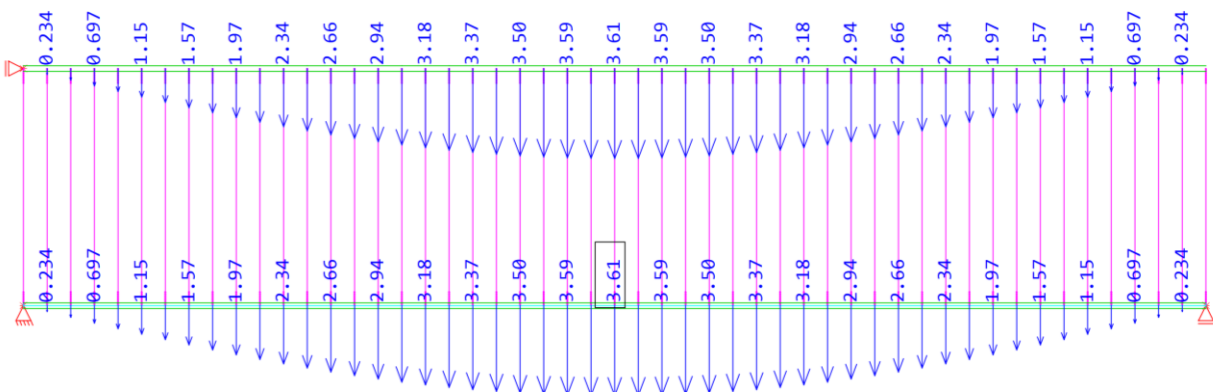


Abbildung 119: Anfangsverformung mit Schubanalogieverfahren in SOFiSTiK [mm]

Ergebnis der Schnittgrößenverläufe in Ebene A und Ebene B:

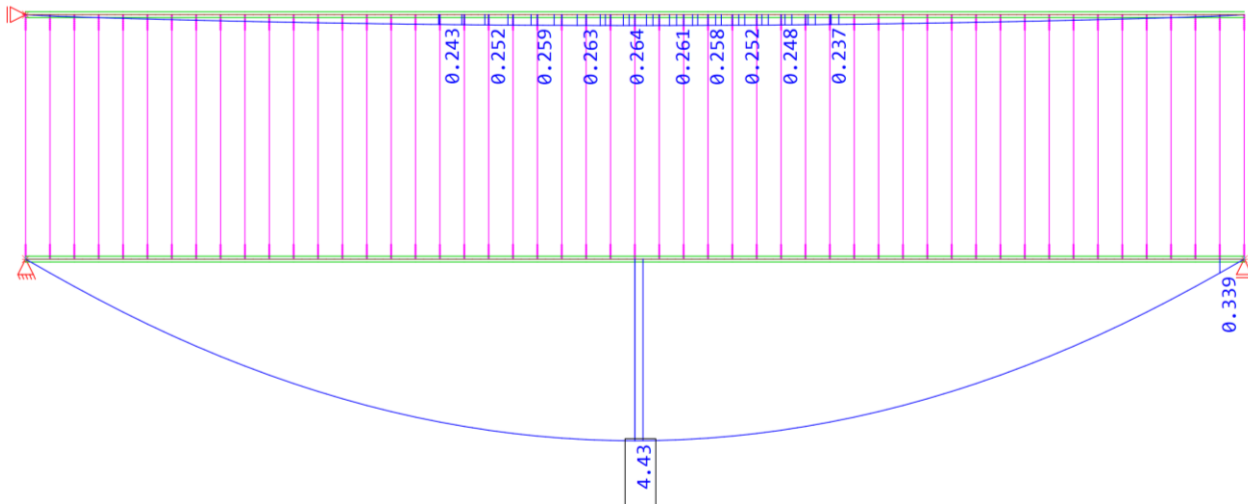


Abbildung 120: Schnittgrößenverlauf Ebene A und Ebene B [kNm]

Spannung am unteren Rand der untersten Schicht:

$$\sigma_{5,u} = \frac{0.264 \cdot 10^{-3}}{0.192} \cdot \frac{0.04}{2} \cdot 12000 + 12000 \cdot \frac{4.43 \cdot 10^{-3}}{3.456} \cdot 0.06 = 1.25 \text{ MN/m}^2 \quad (\text{AP6-76})$$

Laminattheorie:

Hier werden keine Vorberechnungen notwendig. Die Laminattheorie kann direkt in FEM ausgeführt werden.

Materialsteifigkeitsmatrix aus SOFiSTiK:

Tabelle 58: Auszug der Materialsteifigkeitsmatrix aus SOFiSTiK

Typ	mxx [kNm]	myy [kNm]	mxy [kNm]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nxx [kN/m]	nyy [kN/m]	nxy [kN/m]
mxx	3648.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00
myy		448.03	0.00			0.00	0.00	0.00
mxy			235.52			0.00	0.00	0.00
Vx				12160.01	0.00			
vy					4575.30			
nxx						1440004.1	0.00	0.00
nyy							480012.02	0.00
nxy								110400.01

Prüfung der Materialsteifigkeitsmatrix mit der Laminattheorie mit selbst entwickeltem Computerprogramm. Als Ergebnis zeigt sich:

Tabelle 59: Vergleichsrechnung der Laminattheorie mit Schubkorrektionsfaktoren nach Vlachoutsis [39]

Typ	mxx [kNm]	myy [kNm]	mxy [kNm]	vx [kN/m]	vy [kN/m]	nxx [kN/m]	nyy [kN/m]	nxy [kN/m]
mxx	3648	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00
myy		448	0.00			0.00	0.00	0.00
mxy			235			0.00	0.00	0.00
vx				17628	0.00			
vy					4706			
nxx						1440000	0.00	0.00
nyy							480010	0.00
nxy								110400

Es gilt zu beachten, dass die Schubsteifigkeit der Laminat (in Tabelle 58 und Tabelle 59 mit v_x und v_y bezeichnet) abhängig sind von den Schubkorrekturfaktoren, welche die Linearisierung der Schubspannungen in den einzelnen Schichten zu dem tatsächlichen Verlauf bei dem jeweiligen geschichteten Material korrigieren soll. Es gilt hier ingenieurmäßig abzuschätzen, ob die Steifigkeiten zu dem vorhandenen Produkt passen, oder ob sie ggf. modifiziert werden müssen.

Anhand der Anfangsverformung ist bereits zu erkennen, dass diese von den vorherigen Berechnungen geringfügig abweicht. Die in geringem Maße höhere Verformung bei dem geschichteten 2D- Element in SOFiSTiK lässt sich vermutlich auf die von SOFiSTiK berechneten transversalen Schubsteifigkeiten zurückführen.

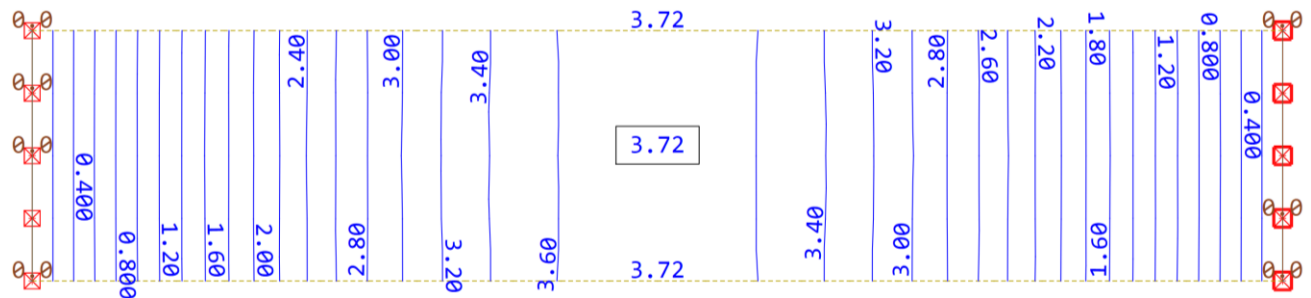


Abbildung 121: Anfangsverformung in mm aus SOFiSTiK

Es folgen die maximalen Zugspannungen am unteren Rand der untersten Schicht:

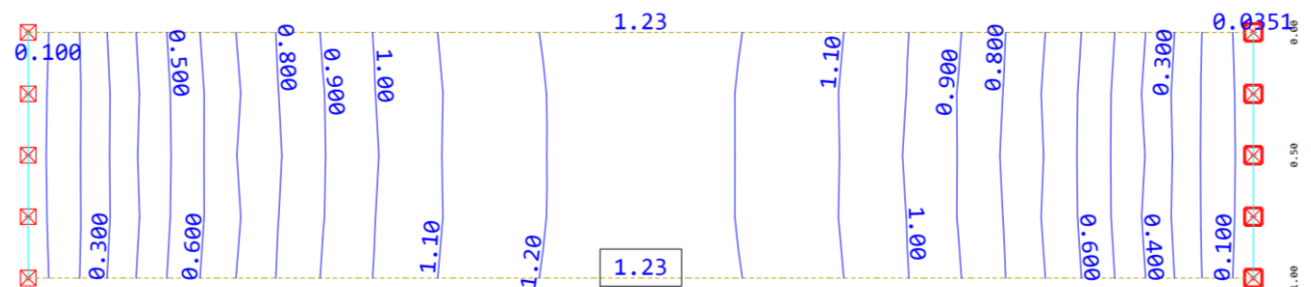


Abbildung 122: Zugspannungen in MN/m² am unteren Plattenrand aus SOFiSTiK

Als Vergleich zu SOFiSTiK, wird die Fläche mit den Steifigkeiten nach der Laminattheorie in Kombination mit den Schubkorrekturfaktoren nach Vlachoutsis [39] noch mit RFEM 5 von Dlubal berechnet. Hier kann die Materialsteifigkeitsmatrix manuell eingegeben werden.

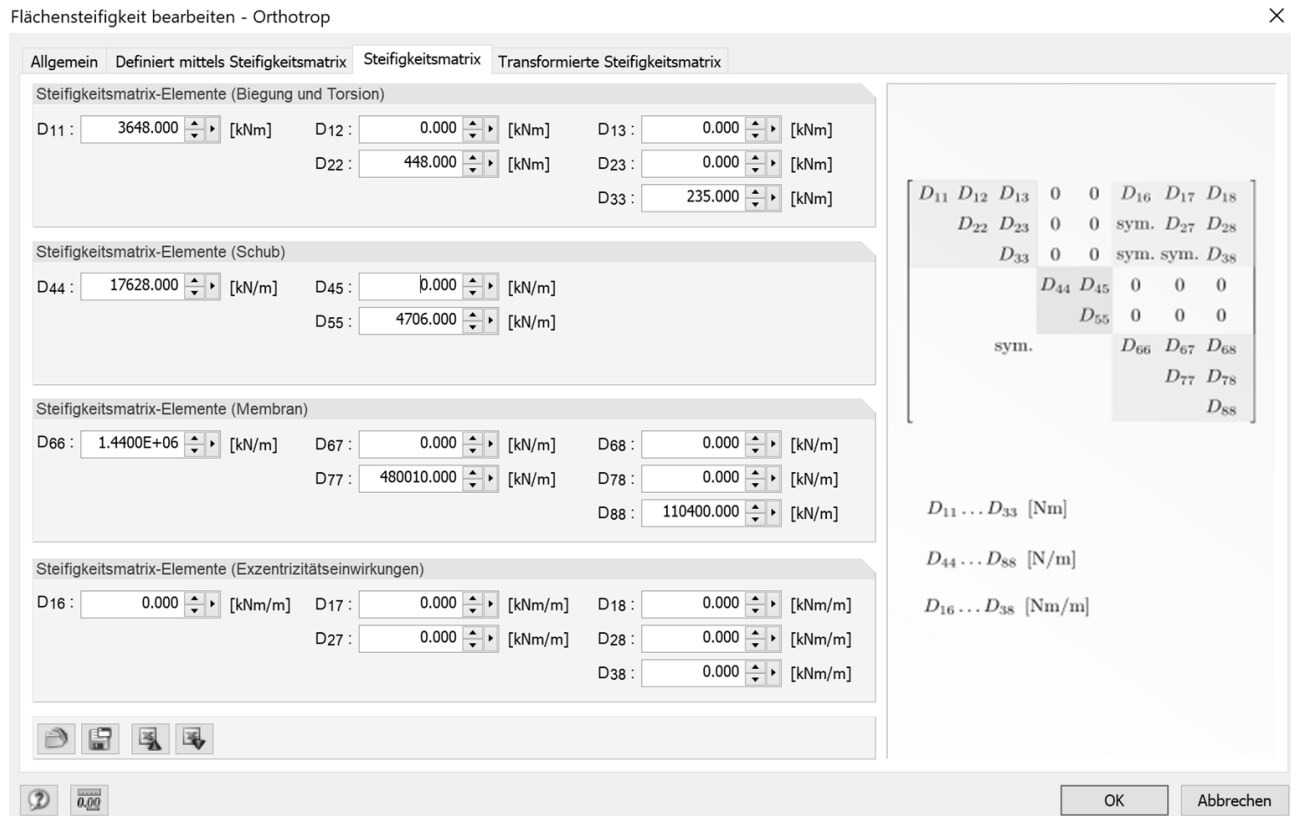


Abbildung 123: Eingabe der Materialsteifigkeitsmatrix in RFEM 5

Als Ergebnis zeigt sich in Abbildung 124 eine ähnliche Verformung wie bei der γ - Methode sowie beim Schubanalogieverfahren.



Abbildung 124: Verformungsergebnis in mm aus RFEM

Zusammenfassung:

Die drei betrachteten Methoden führen zu ähnlichen Ergebnissen, womit gezeigt wurde, dass die Laminattheorie für die Modellierung von Brettsperrholz geeignet ist. In der folgenden Abbildung werden die unterschiedlichen Verformungsergebnisse aufgelistet.

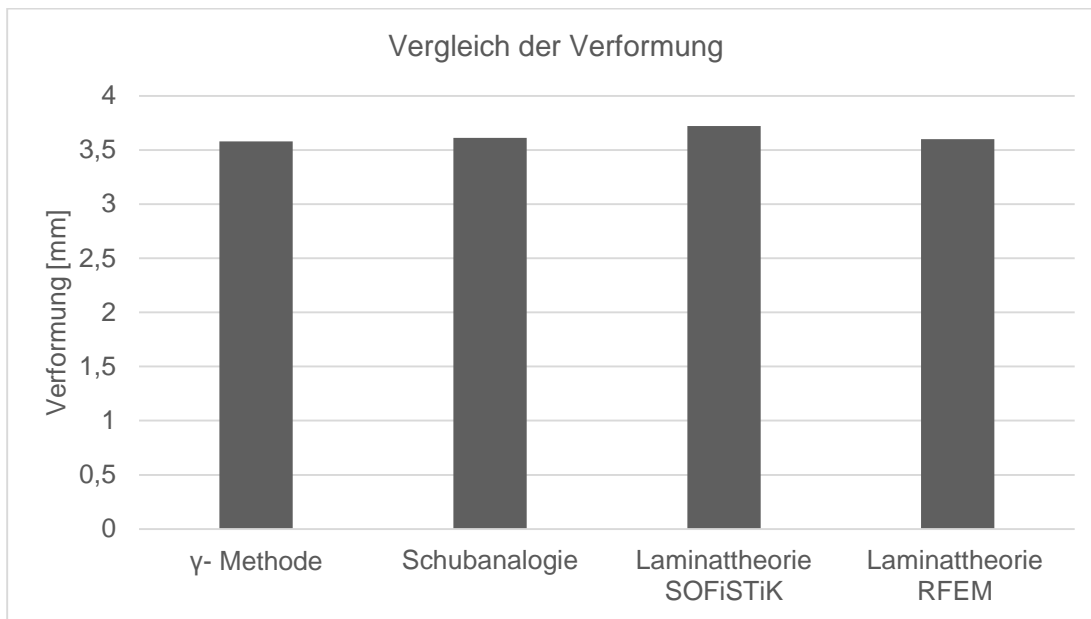


Abbildung 125: Vergleich der Verformungen in mm der jeweiligen Methode

In obiger Abbildung unterscheidet sich das Ergebnis von SOFiSTiK und RFEM leicht, was auf die voneinander abweichenden transversalen Schubsteifigkeiten durch vermutlich unterschiedliche Ansätze bei den Schubkorrekturfaktoren zurückzuführen ist.

Abbildung 126 zeigt die Normalspannungen aus Biegung am unteren Rand der untersten Schicht in Haupttragrichtung. Die Abweichung der unterschiedlichen Varianten voneinander beträgt im Maximum 0.03 MN/m² was im Bezug auf die geringste Spannung einer Abweichung von 2.5 % entspricht.

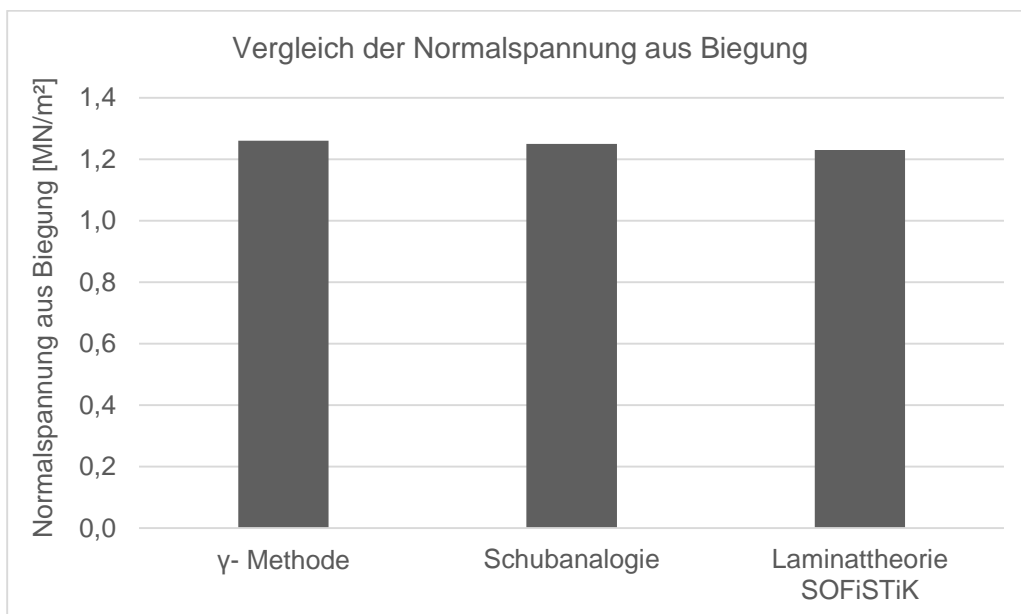


Abbildung 126: Vergleich der Normalspannung in MN/m² aus Biegung in der untersten Lage der jeweiligen Methode

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die γ -Methode, das Schubanalogieverfahren sowie die Laminattheorie unter den hier gegebenen Bedingungen zu ähnlichen bis hin zu gleichen Ergebnissen bei der Verformung und der Normalspannung führen. Auf einen Vergleich der Schubspannungen wurde in diesem Beispiel verzichtet. Das gewählte, doch sehr einfache, Beispiel soll keineswegs das Erfordernis einer erweiterten Bemessungsmethode suggerieren, vielmehr soll damit gezeigt werden, dass die Laminattheorie für die erweiterten Bemessungssituationen grundsätzlich herangezogen werden kann.