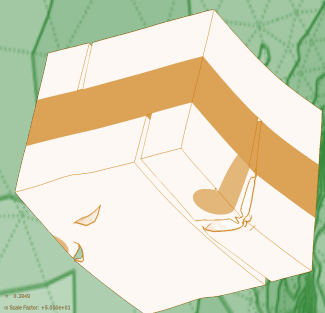
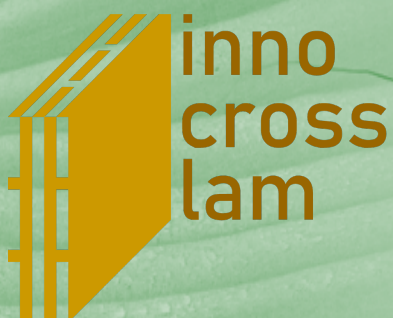


# Endbericht InnoCrossLam

„Innovative Solutions for Cross Laminated Timber Structures“

WP3 – Structural performance accessed by computational mechanics

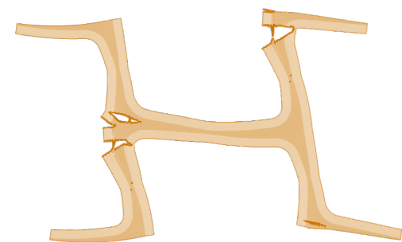
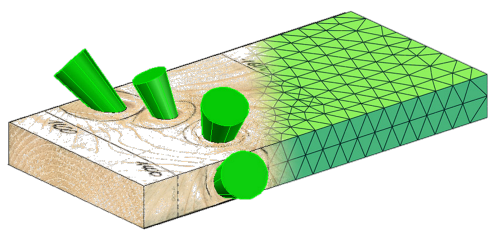




# Endbericht

„Innovative Solutions for Cross Laminated Timber Structures“

WP3 – Structural performance accessed by computational mechanics



## Impressum

Projektnehmer/in: Technische Universität Wien

Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen

Adresse: Karlsplatz 13/202, 1040 Wien

Projektleiter/in: Josef Füssl

Tel. : +43 664 60588 2022

E-Mail: josef.fuessl@tuwien.ac.at

Projektmitarbeiter/in: Markus Lukacevic, Sebastian Pech, Maximilian Autengruber

Tel.: 01 58801 20264

E-Mail: markus.lukacevic@tuwien.ac.at

Kooperationspartner/in: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute – ZAG;

Universität Lund, Schweden; TU München, Deutschland; Universität Navarra, Spanien.

Finanzierungsstellen: Horizon 2020, ERA-NET Cofund Action „ForestValue“

Projektlaufzeit: Mai 2019 – September 2022

1. Auflage

Alle Rechte vorbehalten.



Wien, 2022. Stand: 27. Oktober 2022





## Inhalt

<b>Projekt-Organisation .....</b>	<b>6</b>
Kurzinformation zum Projekt .....	6
Kick-Off-Meeting .....	7
2. Projektmeeting .....	7
3. Projektmeeting .....	7
4. Projektmeeting .....	7
5. Projektmeeting .....	8
6. Projektmeeting .....	8
7. Projektmeeting .....	8
Abschlussmeeting .....	8
<b>Einleitung &amp; Motivation .....</b>	<b>10</b>
<b>Arbeitspakete .....</b>	<b>12</b>
Adaptierung eines 3D-Mehrflächen-Versagenskriteriums für astfreies Holz .....	12
Implementierung von Kriechverhalten .....	14
Erzeugung präziser digitaler 3D-Modelle von BSP-Elementen einschließlich Ästen .....	15
3D-Simulation häufiger Details von BSP-Strukturen .....	18
Holz-Beton-Verbundkonstruktionen aus Fertigteilen .....	18
Simulation von formschlüssigen Bauteilstößen für BSP-Bauteile .....	23
Feuchtigkeits-Simulationen von Holz-Beton-Verbunddecken nach Aufbringen von Frischbeton .....	27
Trägfähigkeitsvorhersage von Brettschichtholz-Trägern mittels effektiver Materialeigenschaften .....	30
Numerische Simulation einer innovativen Lösung für punktgestützte BSP-Elemente .....	33
Feuchtigkeits- und Spannungs-Simulationen von thermisch aktivierten BSP-Elementen ...	33
Simulation von Schraub-Press-Verklebungen von BSP- und BSH-Elementen .....	34
Simulation der Feuchtigkeitsaufnahme und des Austrocknens von BSP-Prüfkörpern unter verschiedenen Klimabedingungen .....	35
<b>Schlussbemerkung .....</b>	<b>37</b>

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>38</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>40</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>42</b>

# Projekt-Organisation

## Kurzinformation zum Projekt

Im Rahmen des ERA-NET-Programms „ForestValue – Innovative Forest-based Bioeconomy“ soll mit dem Projekt “InnoCrossLam – Innovative Solutions for Cross Laminated Timber Structures” die Anwendbarkeit und Flexibilität von Vollholzwerkstoffen wie Brettsperrholz (BSP) auf mehrstöckige und großflächige Strukturen erweitert werden. In sechs stark miteinander verknüpften Arbeitspaketen werden die dafür notwendigen Teilbereiche von den Projektpartnern (Slovenian National Building and Civil Engineering Institute – ZAG; Universität Lund, Schweden; TU Wien; TU München, Deutschland; Universität Navarra, Spanien) bearbeitet.

Das von der TU Wien geleitete Arbeitspaket 3 beschäftigt sich dabei hauptsächlich mit der realistischen Vorhersage des mechanischen Verhaltens von BSP- und BSP-basierten Strukturen und deren Details. Die so gewonnenen Ergebnisse werden mit der 3D-Strukturmodellierung auf der Gebäudeebene verknüpft. Dadurch soll eine Basis für effizientere Designkonzepte bzw. für Praktiker anwendbare Software-Lösungen geschaffen werden, welche den mehrstöckigen und großflächigen Bau von Holzstrukturen wirtschaftlicher und effizienter machen werden.

Im Laufe des Projekts fanden halbjährlich Meetings mit allen Projektpartnern statt und zusätzlich wurden zu Kick-Off-, Halbzeit- und Abschlussmeeting die assoziierten Partner eingeladen. Eine Auflistung aller offiziellen Projektmeetings und eine Kurzbeschreibung des Kick-Off-Meetings und des Abschlussmeetings ist im Folgenden gegeben.

## **Kick-Off-Meeting**

6.-7.5.2019            Ort: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG),  
Ljubljana, Slowenien

Teilnehmer: Projektpartner, assoziierte Partner

Am ersten Tag präsentierten die Projektpartner die Inhalte ihrer Arbeitspakete bzw. einen Überblick über den aktuellen Stand des Designprozesses von BSP-Strukturen. Die assoziierten Partner präsentierten ihre Motivation für die Zusammenarbeit bzw. Erwartungen an das Projekt. Basierend darauf und der anschließenden Diskussion wurden am zweiten Tag unter den Projektpartnern die wichtigsten Problempunkte bei BSP-Strukturen definiert und den Arbeitspaketen zugewiesen.

## **2. Projektmeeting**

15.9.2019            Ort: TU München, Deutschland; Teilnehmer: Projektpartner

## **3. Projektmeeting**

15.5.2020            Online-Meeting organisiert von den Projektpartnern an der Universität  
Navarra, Spanien; Teilnehmer: Projektpartner, Vladimir Čamba (BMLRT)

## **4. Projektmeeting**

27.11.2020            Ort: Online-Meeting organisiert von TU Wien, Österreich; Teilnehmer:  
Projektpartner, assoziierte Partner

## 5. Projektmeeting

11.05.2021            Ort: Online-Meeting organisiert von ZAG, Ljubljana, Slowenien;  
Teilnehmer: Projektpartner

## 6. Projektmeeting

21.11.2021            Ort: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG),  
Ljubljana, Slowenien; Teilnehmer: Projektpartner

## 7. Projektmeeting

25.02.2022            Ort: Online-Meeting organisiert von TU Wien, Österreich; Teilnehmer:  
Projektpartner

## Abschlussmeeting

21. Juni 2022            Ort: ForestValue Conference 21-22 June 2022 in Skellefteå  
  
Teilnehmer: Projektpartner, assoziierte Partner

Das Abschlussmeeting fand im Rahmen der ForestValue Konferenz im Wood Hotel (siehe Abbildung 1) in Skellefteå, Schweden statt. In einer 90-minütigen Show wurden die Ergebnisse von unserem Projekt in interaktive Weise mit dem Publikum präsentiert. Auch inspiriert durch das beeindruckende Holzhotel fanden anregende Gespräche über drei Tage verteilt statt. Diese haben zu einem umfangreichen Wissensaustausch mit potentiellen Kooperationspartner in ganz Europa geführt.

Abbildung 1: Abschlusskonferenz in Schweden: (Oben) Präsentation unseres Projekts, (Mitte) InnoCrossLam Team und Assoziierte Partner, (Unten) Wood Hotel



# Einleitung & Motivation

Der Ingenieurholzbau hat in den letzten Jahren einen großen Aufschwung erlebt. Dies ist unter anderem auf folgende Faktoren zurückzuführen: (i) Ökologie und Nachhaltigkeit gewinnen zunehmend an Bedeutung, auch im Gebäudesektor, (ii) die Qualität und Verfügbarkeit von innovativen Holzprodukten hat sich deutlich verbessert und (iii) diese Holzprodukte können mit ausreichender Zuverlässigkeit in komplexe Ingenieurtragwerke bzw. mehrgeschossige Konstruktionen (siehe Holzhochhaus in Abbildung 1) eingebaut werden. Die große Variabilität an Bauelementen (mit oder ohne Verstärkungsmaßnahmen), der Verbindungsmittel und sonstiger Spezialanschluss oder -einbauteile führt jedoch zu Herausforderungen bei der Einschätzung und Modellierung der mechanischen Performance von Konstruktionen aus Holz. Mechanische Eigenschaften werden nahezu ausschließlich experimentell bestimmt. Der dafür notwendige Aufwand ist sehr hoch und mechanische Information kann oft nur für ausgewählte Elemente, für bestimmte Belastungssituationen und nur in sehr begrenztem Umfang generiert werden. Dies ist keine zufriedenstellende Grundlage, weder für die Modellierung von komplexen Ingenieurbauten noch für die Weiterentwicklung von technischen Richtlinien und Normen.

Ein Lösungsansatz für diese Problematik ist die Ergänzung von experimentellen Versuchsprogrammen mit numerischen Simulationen. Diese bringen folgende Vorteile mit sich: (1) Sie sind in der Lage sehr viel mechanische Information über ein untersuchtes Bauteil zu liefern. Zum Beispiel können Deformations-, Verzerrungs- und Spannungszustände in jedem beliebigen Punkt eines untersuchten Tragelements ausgegeben werden, und sind nicht abhängig von bzw. eingeschränkt durch die Art des Messverfahrens wie es bei Experimenten der Fall ist.

(2) Bei Vorliegen eines vertrauenswürdigen numerischen Modells, können eine große Anzahl an Varianten untersucht und umfangreiche Parameterstudien durchgeführt werden. Dadurch kann für eine bestimmte Problemstellung eine zufriedenstellende Datenbasis generiert werden um sinnvolle Weiterentwicklungen von Richtlinien und Normen anzustoßen.

(3) Speziell bei großen Bauteilen, wie z.B. sehr hohen Brettschichtholzträgern oder Brettsperrholzelementen, sind die Kosten für numerische Simulationen weit geringer als die der Durchführung von äquivalenten experimentellen Tests.



Um diese Vorteile zu generieren bedarf es jedoch numerischer Modelle, welche das mechanische Verhalten von komplexen Holzbauteilen realitätsnahe abbilden. Folgende Herausforderungen gilt es dabei zu beachten: (1) Vertrauenswürdige Materialparameter müssen als Eingangsgrößen für numerische Simulationen vorhanden sein, (2) die Variabilität des natürlich gewachsenen Materials Holz, z.B. eingebracht durch Äste und Astgruppen, sowie das stark orthotrope Materialverhalten muss gegebenenfalls modelliert werden, (3) Materialnichtlinearitäten, wie z.B. quasi-spröde Versagensmechanismen, müssen für bestimmte Problemstellungen berücksichtigt werden. Dies erfordert geeignete numerische Methoden sowie adäquate Materialparameter als Eingangsgrößen. (4) Nicht zuletzt ist die Validierung eines Simulationstools anhand von ausgewählten Experimenten erforderlich um die Qualität der Vorhersage abschätzen und die Vertrauenswürdigkeit in die Simulationsergebnisse erhöhen zu können.

Noch existiert kein generelles Simulationstool, welches in der Lage wäre für beliebige Problemstellungen im Ingenieurholzbau alle zuvor genannten Punkte zu adressieren. Jedoch nimmt die wissenschaftliche Aktivität in diesem Bereich zu und immer mehr Arbeitsgruppen weltweit präsentieren sehr aussichtsreiche Entwicklungen und Ergebnisse.

Durch dieses Projekt wollen wir einen signifikanten Beitrag leisten um die Berechenbarkeit von Holzwerkstoffen, im speziellen Brettsperrholz, zu erhöhen und dadurch dessen Einsatz zu erleichtern und eine kontinuierliche Weiterentwicklung zu forcieren.

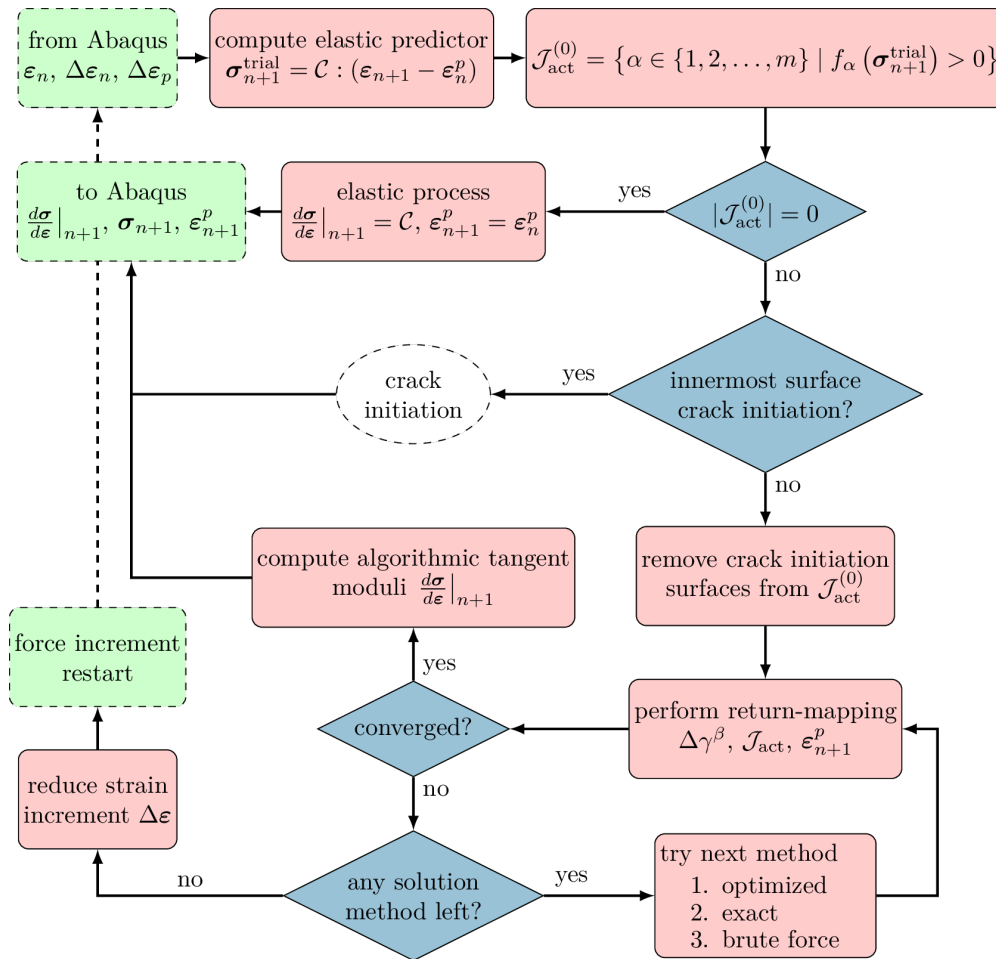
# Arbeitspakete

Das an der TU Wien geleitete Arbeitspaket 3 betrifft die Untersuchung der Leistungsfähigkeit von BSP-Strukturen mittels Methoden der numerischen Mechanik („WP3 – Structural performance accessed by computational mechanics“) und ist in drei Unter-Arbeitspakete aufgeteilt, bei denen nachfolgend die wesentlichsten Ergebnisse dargestellt werden.

## **Adaptierung eines 3D-Mehrflächen-Versagenskriteriums für astfreies Holz**

Das Verhalten von Holz unter Beanspruchung ist äußerst komplex. Bei ausreichend großer Last treten bleibende Deformation auf, für welche es ein Versagenskriterium benötigt um diese zuverlässig zu prognostizieren. Solch ein Modell wurde in Lukacevic et al. (2017) bereits angeschrieben und in diesem Projekt zu einem anwendbaren Tool weiterentwickelt. Dazu war die robuste und effiziente Implementierung dieses Modells in Simulationssoftware erforderlich. Damit können dann auch Bauteile mit lokal hohen Belastungen bzw. auftretenden Spannungsspitzen numerisch untersucht und optimiert werden. Das stark unterschiedliche Verhalten von Holz unter Quer- bzw. Längsdruck kann mit standardmäßig implementierten Lösungen von Finite-Elemente-Software nicht abgebildet werden. Deshalb wurde in einem ersten Schritt eine numerisch robuste sogenannte Benutzer-Subroutine für die Finite-Elemente-Software Abaqus programmiert, mit der die unterschiedlichen Versagensmodi von Holz berücksichtigt werden können. Dabei handelt es sich um ein Modell, welches ideal plastisches Materialverhalten abbilden soll, d.h. vereinfacht gesagt, dass ab einem bestimmten Grenzwert für die Druckbelastung die Kraft nicht zusätzlich gesteigert werden kann, die Verzerrungen im Material jedoch zunehmen können. Dieses für Metalle typische Verhalten kann näherungsweise auch für Holz unter Druck angewandt werden. Werden diese Grenzwerte der Druckbelastung, welche durch sogenannte Versagensflächen abgebildet werden, im Laufe einer Simulation verletzt, erfolgt ein „Return-Mapping“ auf die entsprechenden Versagensflächen, welche in unserem Fall die Form eines von Tsai-Wu entwickelten, allgemeinen Versagenskriteriums haben. Es wurden hier drei Lösungsmethoden zur Behandlung allgemeiner Mehrflächen-Return-Mapping-Probleme entwickelt. Abbildung 2 zeigt das Konzept dieser Implementierung.

Abbildung 2: Konzeptionelles Ablaufdiagramm der implementierten Methoden



Quelle: Pech et al., 2020

Die neue Implementierung wurde ausführlich an akademischen Beispielen getestet und auch schon in den Simulationen der später erwähnten Bauteilsimulationen angewandt. Sie erlaubt die Berücksichtigung des „Plastizierens“ von Holz unter Druck-/Schubbeanspruchungen und ist in einer wissenschaftlichen Publikation (Pech, Lukacevic, und Füssl 2021) veröffentlicht, wobei auch die entwickelte Subroutine frei zur Verfügung gestellt (<https://gitlab.imws.tuwien.ac.at/e202-02/multisurface-plasticity>) und auch schon im ForestValue-Projekt „READiStrength“ angewandt wurde.

## Implementierung von Kriechverhalten

Neben dem Versagen von Holz ist das Kriechverhalten von Holz in Abhängigkeit der Zeitdauer und der Klimabeanspruchung einer der relevantesten Kriterien im Bemessungsprozess von Holzkonstruktionen. Aus diesem Grund haben wir das oben beschriebene Versagenskriterium um diese zeit- und feuchteabhängigen Prozesse erweitert. Folgende Prozesse müssen dafür algorithmisch beschrieben werden:

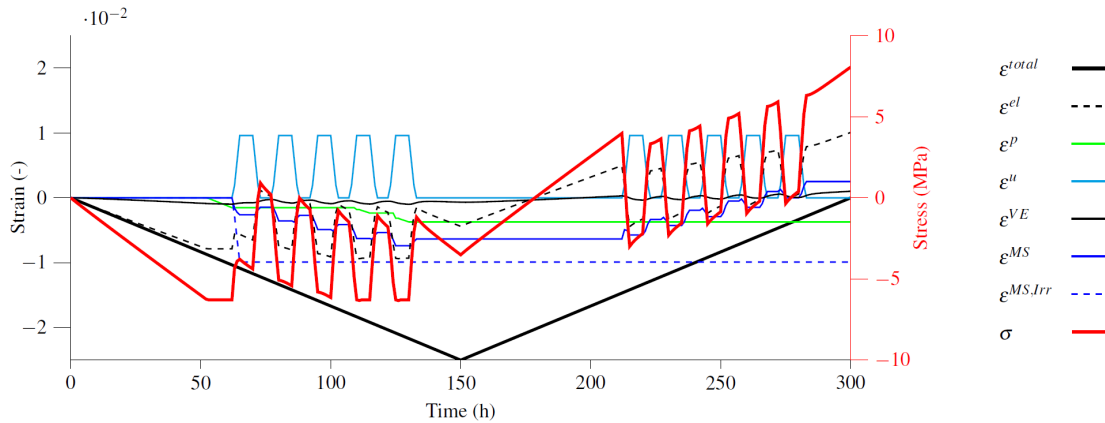
- **Lineares viskoelastisches Kriechen:** Dieses beschreibt zeitabhängige Deformation unter Beanspruchung, welche bei Entlastung vollständig zurückgeht.
- **Mechanosorptives Kriechen:** Zusätzliche Kriechdeformation die durch Feuchteunterschiede hervorgerufen wird und ebenfalls reversibel ist. Dieses Kriechen kann bei Holz dominierend sein und Bedarf daher einer sorgfältigen Modellierung.
- **Nicht reversible mechanosorptive Effekte:** Deformation welche durch den maximalen Feuchtegehalt bestimmt ist.

Die Kriechphänomene wurden rheologisch durch mehrere Kelvin-Voigt Elemente beschrieben und das nicht reversible mechanische Verhalten durch ein Reibungselement.

Gemeinsam mit dem vorgestellten Plastizitätsmodell ist es damit möglich das sehr komplexe mechanische Verhalten von Holz mittels Simulationen realitätsnahe zu beschreiben bzw. für gewissen Problemstellungen vorherzusagen.

Dies ist beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt. Hier wurde ein Würfel mit 20 mm Seitenlänge über 150 h belastet und danach über den gleichen Zeitraum entlastet. In beiden Phasen wurden je fünf Befeuchtungszyklen simuliert. Die dabei auftretenden unterschiedlichen Verzerrungskomponenten (*el* ... elastisch, *p* ... plastisch, *u* ... feuchte, *ve* ... viskoelastisch, *MS* ... mechanosorptiv, *MS,Irr* ... nicht reversibel mechanosorptiv) sind dabei über die gesamte Belastungsgeschichte dargestellt.

Abbildung 3: Numerisch bestimmte unterschiedliche Verzerrungskomponenten eines Würfels mit 20 mm Seitenlänge der über 300 h belastet und mit zwei Mal fünf Befeuchtungszyklen beansprucht wird.



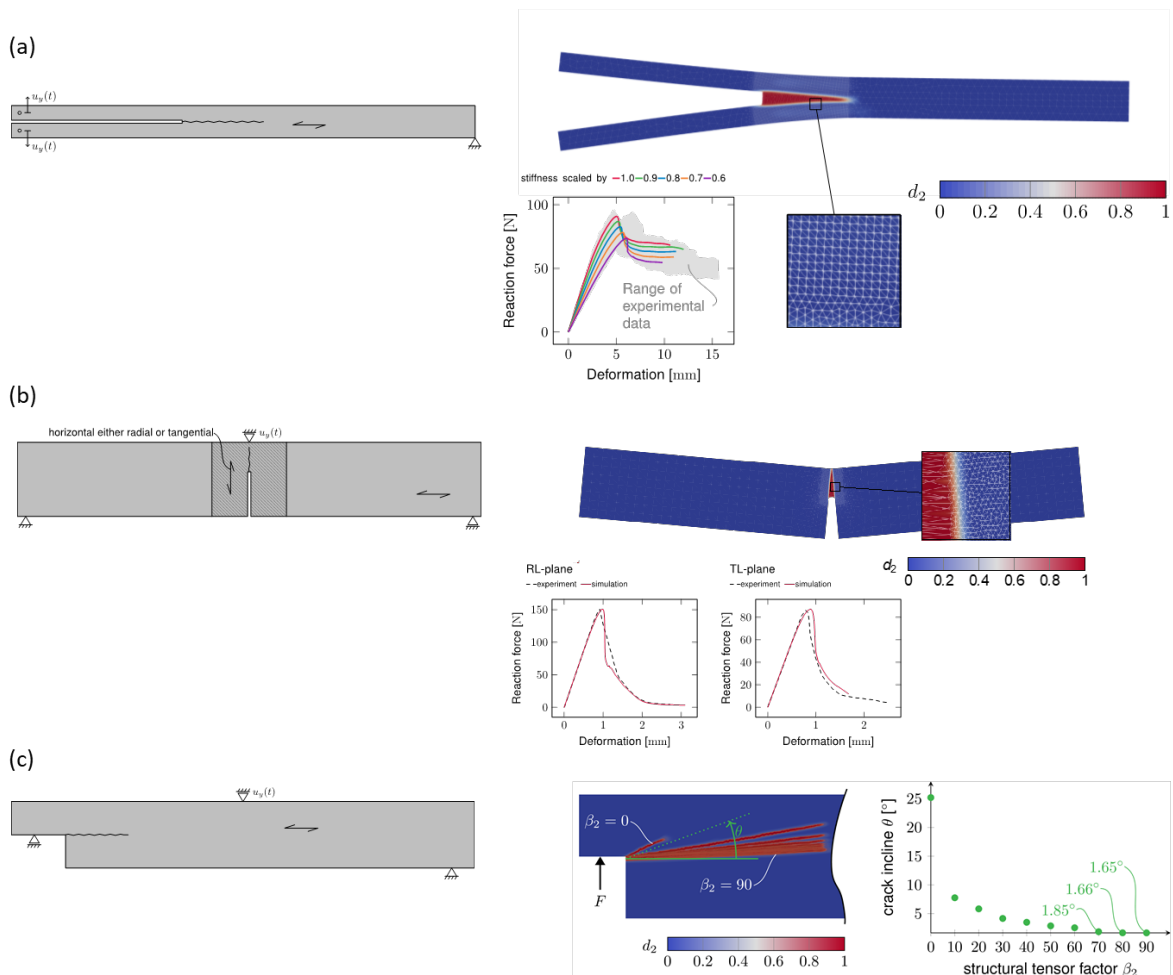
## Erzeugung präziser digitaler 3D-Modelle von BSP-Elementen einschließlich Ästen

Um Holz mittels Simulationen realitätsnahe beschreiben zu können muss auch die komplexe Morphologie, hauptsächlich verursacht durch Äste und die dadurch entstehenden komplexen Holzfaserverläufe, in Simulationen berücksichtigt werden. Da Holz ein quasi-spröder und stark orthotroper Werkstoff ist und sich im Bereich von Ästen die Materialrichtungen aufgrund der Faserabweichungen in jedem Punkt unterscheiden, sind herkömmliche numerische Lösungsmethoden in kommerzieller Finite-Elemente-Software nicht ausreichend, um die Festigkeit bzw. die Versagensmechanismen von solchen Brettern mit Ästen sinnvoll vorherzusagen. Deshalb wurde innerhalb dieses Subprojekts die sogenannte „Phase-Field“-Methode (Miehe, Welschinger, und Hofacker 2010) implementiert, wobei darauf geachtet wurde, dass im Gegensatz zu üblichen Implementierungen auch das quasi-spröde Verhalten von Holz damit abbildbar ist. Bei dieser Methode, welche auf der klassischen Bruchmechanik nach Griffith basiert, erfolgt die Berücksichtigung von Rissen nicht in einer diskreten sondern in einer regularisierten Form, was die numerische Behandlung vereinfacht und zu stabileren Simulationen führt. Diese Methode erlaubt die Simulation von Versagensmechanismen ohne vorheriger Definition der Riss-Positionen. In unserer Implementierung wurden sämtliche aktuelle Weiterentwicklungen dieser recht jungen Methode berücksichtigt und auf die Anwendbarkeit bezüglich Holz in einem selbst geschriebenen Finite-Elemente-Code spezialisiert. Darunter fallen z.B. die Implementierung eines optimierten Solvers, die Möglichkeit mehrere sogenannter Phasen-Felder (zur Abbildung unterschiedlicher Versagensmechanismen in radialer, tangentialer bzw. longitudinaler Materialrichtung) oder

die Berücksichtigung von kohäsivem Materialverhalten zur Abbildung des quasi-spröden Holzversagens.

Der neu entstandene Finite-Elemente-Code ist in einer wissenschaftlichen Publikation (Pech, Lukacevic, und Füssl 2022a) detailliert beschrieben und wurde in einer weiteren Publikation (Pech, Lukacevic, und Füssl 2022b) anhand von Literaturbeispielen aus dem Holzbau validiert. Damit konnte gezeigt werden, dass sämtliche typische Versagensmechanismen mit diesem Ansatz numerisch abgebildet werden können.

Abbildung 4: Beispiele zur Validierung der neu implementierten Phase-Field-Methode anhand von typischen Versuchen aus der Literatur: (a) Double Cantilever Beam (DCB), (b) Single-Edge Notched Beam (SENB) und (c) End Notched Beam (ENB) (Pech u. a. 2022b)



Weiters konnte auch bereits gezeigt werden, dass diese Methode mit bisherigen Entwicklungen des Forschungsbereichs zur Modellierung von Faserverläufen in Astabschnitten und der virtuellen Rekonstruktion von Holzbrettern mit Ästen (Lukacevic u. a. 2019; Lukacevic

und Füssl 2014) kombiniert werden kann. Abbildung 5 zeigt wie so ein virtuell rekonstruiertes Modell eines Holzbretts aussieht. Damit können die lokalen Faserabweichungen in jedem Integrationspunkt eines Finite-Elemente-Netzes berechnet werden. Kombiniert man dies dann mit der „Phase-Field“-Methode, können komplexe Versagensmechanismen rund um Äste simuliert werden, wie in der Vorschau rechts unten in der Abbildung, für die eine frühere Version der Implementierung verwendet wurde, dargestellt ist.

Abbildung 5: Kombination der Phase-Field-Methode mit bereits vorhandenen Rekonstruktionsalgorithmen für Holzbretter mit Ästen, mit deren Hilfe Faserverläufe rund um Äste numerisch beschrieben werden können

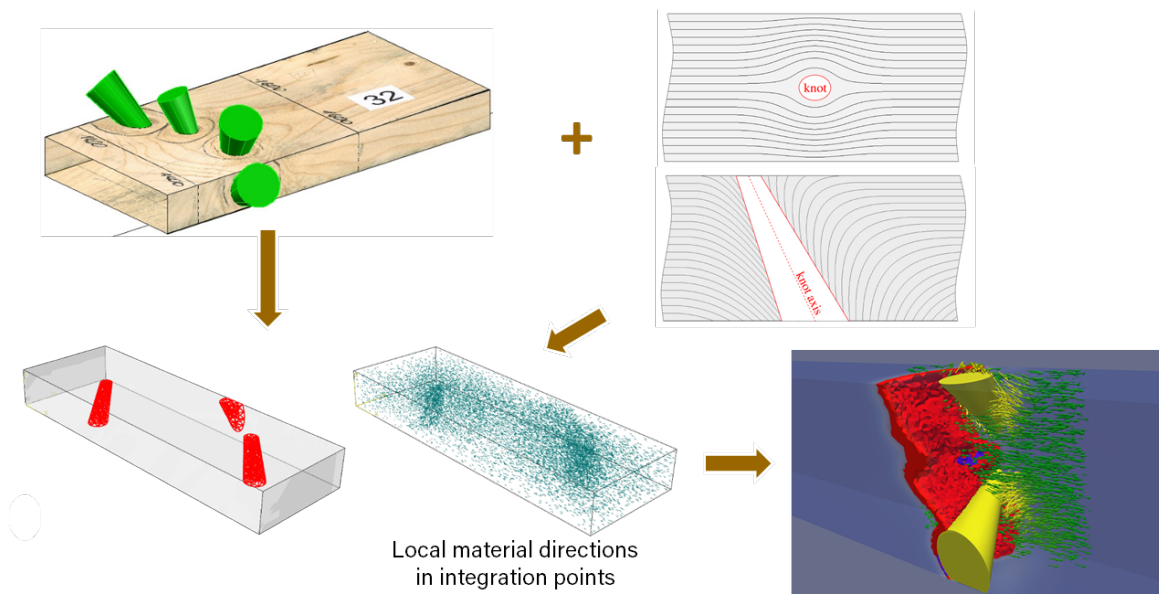
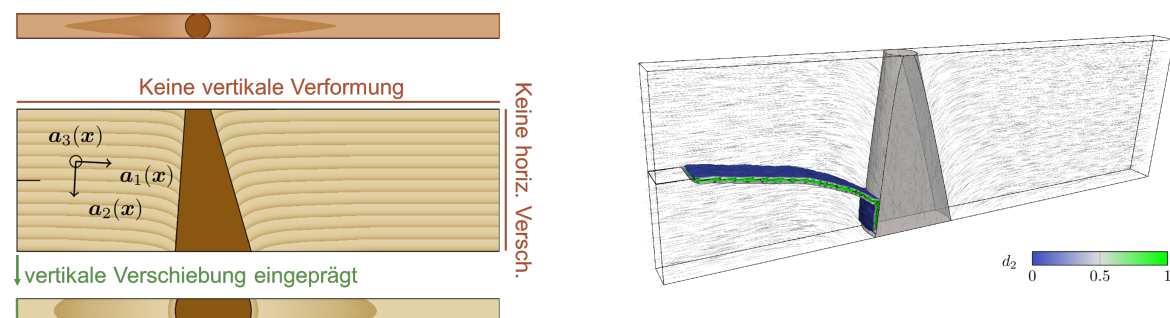


Abbildung 6: Anwendungsbeispiel der Phase-Field-Methode auf ein Holzbrett mit einem Ast unter Berücksichtigung des Faserverlaufs



Das Beispiel in Abbildung 6 zeigt die Simulation des Rissverhaltens eines Holzbretts mit einer Einzelast. Die implementierte Methode ist in der Lage, das in der Praxis beobachtbare Verhalten richtig abzubilden. Der Riss unter Querkzugbelastung beginnt am linken Brettende, folgt dann dem Faserverlauf bis zum Ast und wird dann dort plötzlich nach unten abgelenkt.

Äste und die dadurch induzierten Faserabweichungen beeinflussen maßgebend das mechanische Verhalten von Holzbrettern und Holzprodukten. Aus diesem Grund ist die Vorhersage von effektiven Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Holzbrettmorphologie so wichtig. Mit den vorgestellten Methoden und deren Verknüpfung ist dies erstmalig möglich.

### 3D-Simulation häufiger Details von BSP-Strukturen

In diesem Subprojekt wurden die entwickelten numerischen Simulationstool, in Abstimmung mit den Projektpartnern, auf ausgewählte Details von BSP-Strukturen angewandt. Dies soll einen umfangreichen Einblick in die mechanischen Prozesse in diesem Werkstoff erlauben, welcher nur mit experimentellen Methoden so nicht möglich wäre.

#### **Holz-Beton-Verbundkonstruktionen aus Fertigteilen**

Am Institut für Hochbau und Technologie der TU Wien wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (Kampitsch, 2017) das Tragverhalten eines Holz-Beton-Verbunddeckensystems (HBV-Decke) experimentell untersucht. Bei diesem innovativen HBV-System handelt es sich um ein im Werk vorgefertigtes Brettsperrholzelement der Fa. Stora Enso Wood Products GmbH (Standard-BSP-Element), welches mit einem Betonfertigteile, hergestellt von der Fa. Franz Oberndorfer GmbH&Co KG, verklebt wird. Zusätzlich erfolgt die Verbundwirkung durch die Ausbildung von Kernen, welche die gegenseitige Relativverschiebung behindern (siehe Abbildung 7). Um die Tragfähigkeit dieses HBV-Systems zu untersuchen, wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts 6,90 m lange Großversuche bis zum Bruchversagen belastet. Nachdem es keine Erfahrungswerte bezüglich dieser innovativen Verbundfugenausbildung gibt, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes zuerst Kleinversuche durchgeführt. Im Rahmen dieser Kleinversuche wurde zunächst die Anordnung der Kleberauppen an der Holzknagge optimiert. Des Weiteren sollten aus den Kleinversuchen Erkenntnisse über die Schubübertragung und die Steifigkeit der Fugenausbildung gewonnen werden. Basierend auf den Ergebnissen dieser Kleinversuche wurden die Bruchlast und die Versagensform vor der Durchführung der



Großversuche mit verschiedenen Bemessungsmethoden berechnet und anschließend die Versuche im Prüfstand der Magistratsabteilung 39 durchgeführt.

Abbildung 7: Herstellung einer verklebten Holz-Beton-Verbundkonstruktion aus BSP-Platte mit Kernen und Betonfertigteil



Quelle: Kampitsch, Diplomarbeit, TU Wien

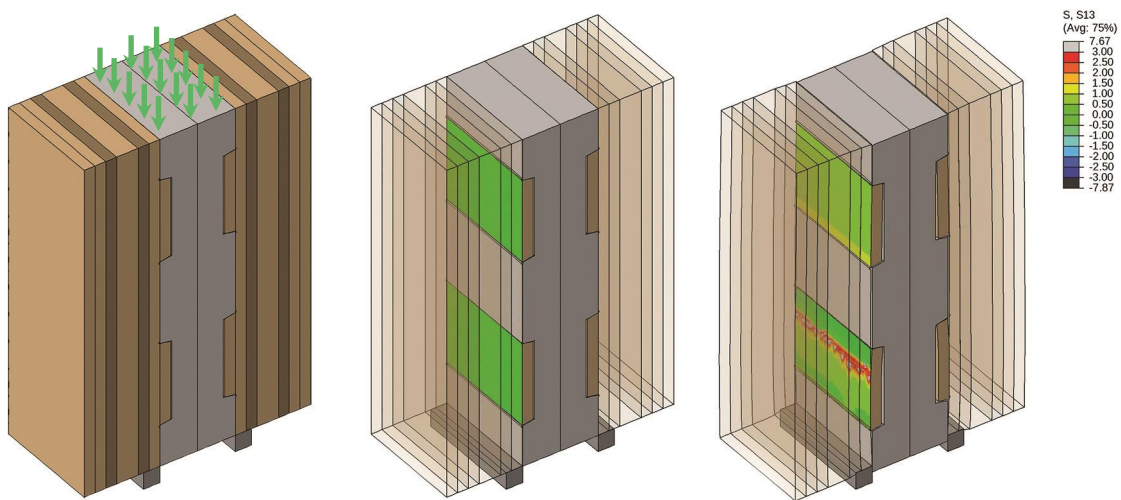
Ziel dieses Projekts war es nun, sowohl die Klein- als auch die Großversuche numerisch zu simulieren und dabei das mechanische Verhalten bzw. die Versagensmechanismen realistisch abzubilden. Dadurch soll ermöglicht werden die beobachteten Unterschiede in den Versagensarten der beiden Versuchstypen zu erklären bzw. bessere Methoden für eine zukünftige Tragfähigkeitsabschätzung von solchen Konstruktionstypen zu entwickeln.

### **Kleinversuche**

Abbildung 8 zeigt das Finite-Element-Modell für den Kleinversuch, bei dem fünf-schichtige BSP-Platten mit jeweils zwei aus der obersten Längslage herausgefrästen Kernen dargestellt sind. In den Versuchen wurde ein Versagen der unteren beiden Holzknaggen aufgrund zu hoher Schubbelastungen beobachtet. Die Darstellung der Schubspannungsverteilung nach Versagensbeginn in Abbildung 8 (rechts) zeigt, dass in der Simulation ebenfalls diese Knagge zuerst versagt. Bei der Modellbildung war es insbesondere wichtig das Kontaktverhalten zwischen Beton- und BSP-Körpern realistisch abzubilden. Dafür wurde unter anderem für den Kleber im Bereich der Knaggenstirnfläche, also dem hauptsächlich für die Lasteinleitung verantwortlichen Holzbereich, ein exponentielles „pressure-overclosure“-Kontaktverhalten verwendet, welches das nicht-linear elastische Verhalten des Klebers gut abbildet. Die

Auswertungen der Simulationen zeigen, dass das in den Experimenten beobachtete Verhalten grundsätzlich sehr gut simuliert werden kann. Mit der Implementierung des zuvor beschriebenen Mehrflächen-Versagensmodells erwarten wir eine noch bessere Vorhersagemöglichkeit vor allem in Bereichen mit sehr hohen Längs- und Querdruckbelastungen. Dazu sollen nicht nur die Versagensmechanismen qualitativ verglichen werden, sondern auch das Last-Verschiebungs-Verhalten von Experiment und Simulation.

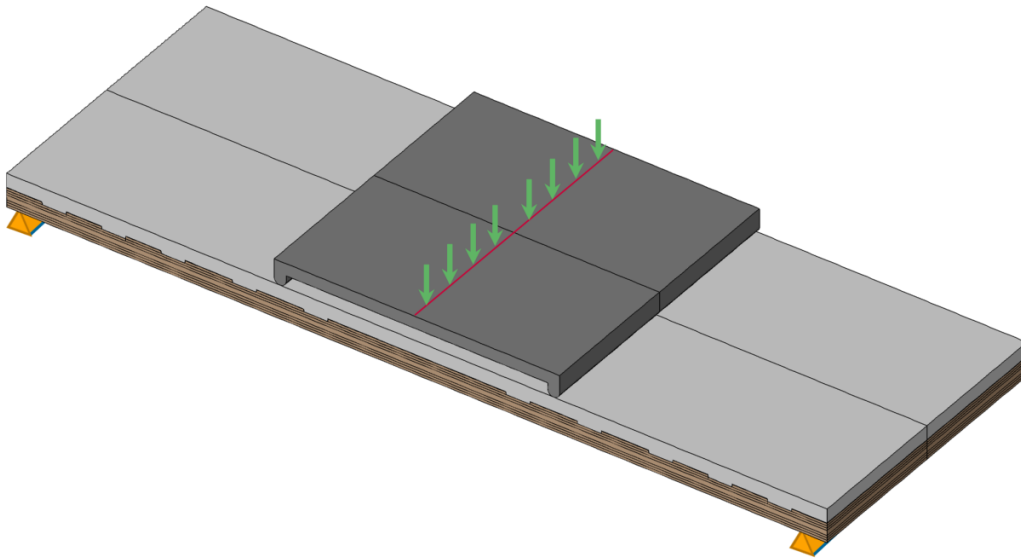
Abbildung 8: HBV-Kleinversuch mit Versuchsanordnung und Darstellung der Schubspannungsverteilung im kritischen Bereich unter der Holzknagge



### Großversuche

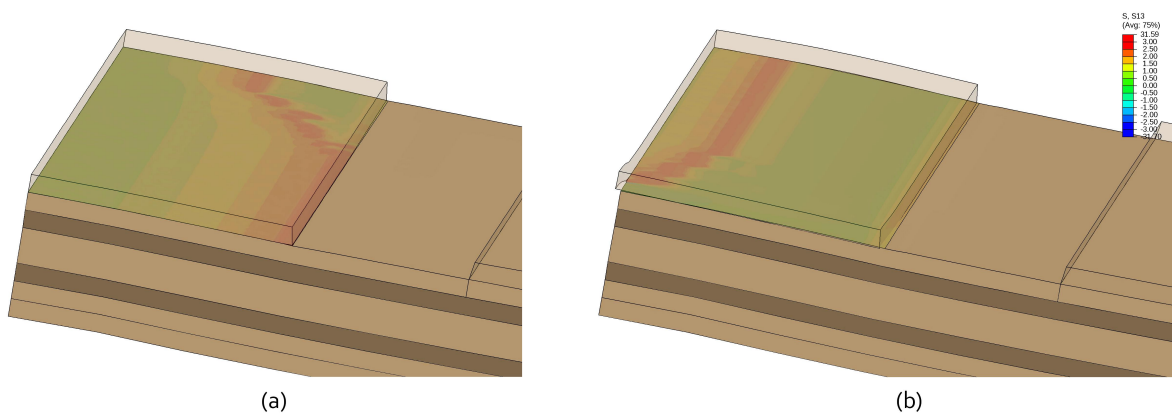
Mit denselben Modellparametern wie in den Kleinversuch-Simulationen wurde auch der experimentell durchgeführte Großversuch numerisch simuliert. Abbildung 9 zeigt das Finite-Elemente-Modell für diese Simulationen mit der modellierten Lasteinleitungsstruktur des Vier-Punkt-Biegeversuchs und den entsprechenden Lagerungsbedingungen.

Abbildung 9: Finite-Elemente-Modell mit Lasteinleitung und Auflagerbedingungen



Wie aus statischen Überlagerungen zu erwarten bzw. auch in den Experimenten beobachtet werden konnte, ist die maximale Querkraftbelastung des HBV-Trägers im Bereich der äußersten Knaggen. Die Schwachstelle der Konstruktion ist hierbei die in Abbildung 10 dargestellte Schubfuge unter der ersten Knagge in Verlängerung der aus dem BSP-Element ausgefrästen Kerbe. Die maximalen Schubspannungen in diesem Bereich sorgen für Versagensbeginn und schlussendlich vollständigem Versagen dieser Knagge, was auch zum Gesamtversagen des HBV-Trägers führt.

Abbildung 10: Detail der Schubspannungsverteilung im Bereich der ersten Knagge (a) kurz nach Versagensbeginn und (b) kurz vor vollständigem Versagen



Die Last-Verschiebungs-Verläufe konnten realistisch reproduziert werden und die Bruchlast des Modells lag nur in etwa 5 % über den Bruchlasten der Versuche. In der

Versuchsdurchführung war ursprünglich das Ziel, die Lastkapazitäten der Großversuche mittels Kleinversuchen vorherzusagen. Der Vergleich in der Lastabtragung zwischen dem Großversuch in Abbildung 11 und dem Kleinversuch in Abbildung 12 zeigt jedoch, dass diese unterschiedliche Mechanismen aufweisen und dadurch nicht so einfach zur Vorhersage herangezogen werden können. Beim Großversuch resultiert die größte Druckbeanspruchung in jenem Bereich, in dem der Betonkörper aufgrund der Relativverschiebung auf die Holzknagge drückt. Weiters entstehen in diesem Bereich auch Querkzugspannungen und die Lastableitung erfolgt aufgrund der Lage des Auflagers an der Unterseite der Platte durch alle Schichten der BSP-Platte hindurch. Im Vergleich dazu entstanden im Kleinversuch die höchsten Druckspannungen am anderen Ende der Knagge und die Last wird fast ausschließlich über die oberste Längslage des BSP-Elements abgetragen.

Abbildung 11: Hauptspannungstrajektorien des Großversuchs, welche die Lastableitung im HBV-Element von der Lasteinleitungsstruktur hin zum linken Auflager zeigen

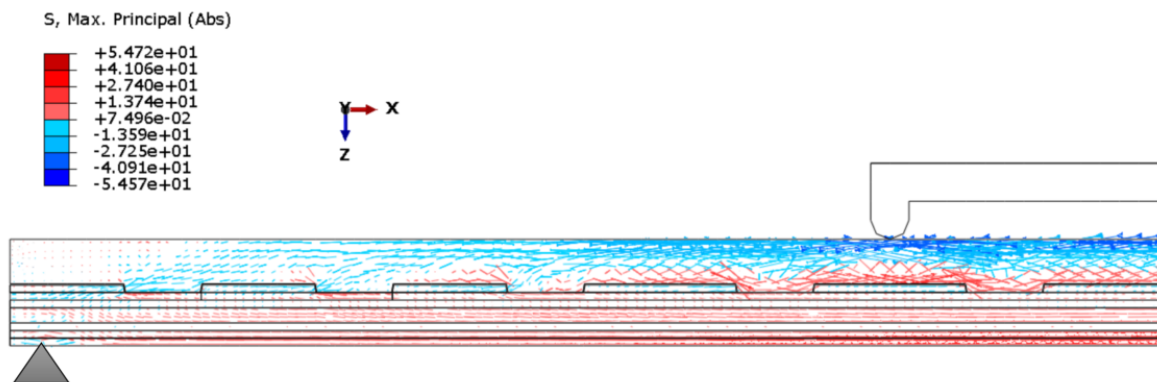
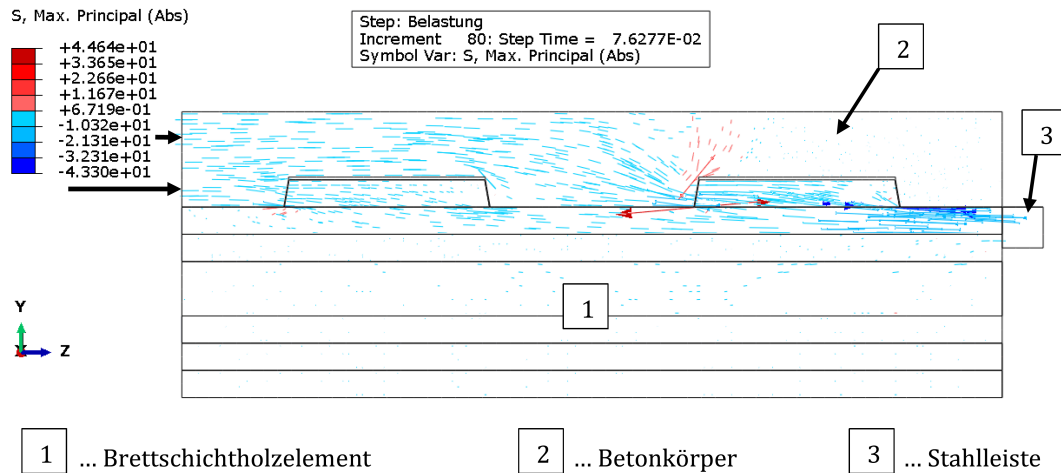


Abbildung 12: Hauptspannungstrajektorien des Kleinversuchs, welche die Lastableitung im HBV-Element von der Lasteinleitung (links) hin zum Auflager (rechts) zeigen



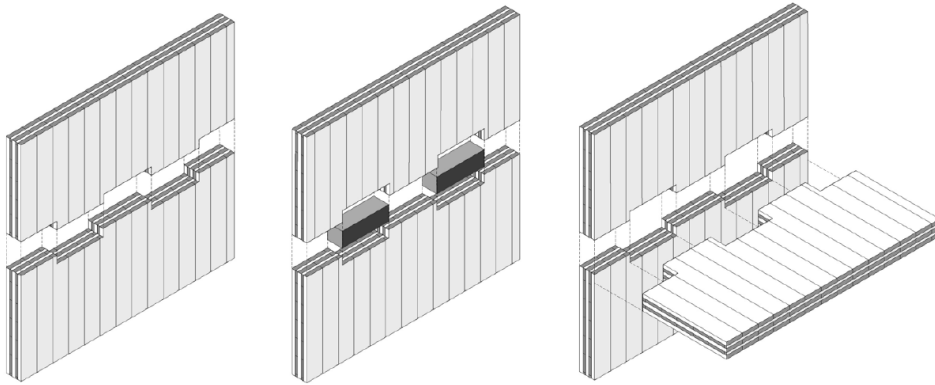
Dadurch lässt sich schlussfolgern, dass zumindest dieser Aufbau der Kleinversuche nicht dazu geeignet ist die Tragfähigkeit der HBV-Platte vorherzusagen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Finite-Elemente-Modelle in der Lage waren, die experimentellen Versagensmechanismen und Maximallasten sehr gut vorherzusagen, was erst eine genauere Analyse der Problematik ermöglichte.

Holz-Beton-Verbunddecken weisen ein großes Potential auf und wurden in jüngster Zeit immer häufiger eingesetzt. Die Bemessung befindet sich jedoch erst in der Entwicklung und wird durch die Vielfalt und Komplexität von solchen Systemen erschwert. Ein universell einsetzbares 3D Berechnungskonzept hätte daher einen sehr großen Wert. Die Grundlagen zu solch einem Tool und wesentliche Erkenntnisse wurden in diesem Projekt generiert.

### Simulation von formschlüssigen Bauteilstößen für BSP-Bauteile

Im Rahmen einer Diplomarbeit (Hipper, 2017) wurde beim Projektpartner TU München ein neuartiger Typ von formschlüssigen Bauteilstößen für vorgespannte Bauteile aus BSP entwickelt und teilweise experimentell untersucht (siehe Abbildung 13). Durch das ständige Überdrücken mit Hilfe von Vorspannungen und die Ausbildung von Zackenverbindungen müssen die horizontalen Elementfugen nur noch Schubkräfte übertragen. So eine formschlüssige Scheibentragwirkung ist von besonderer baupraktischer Relevanz.

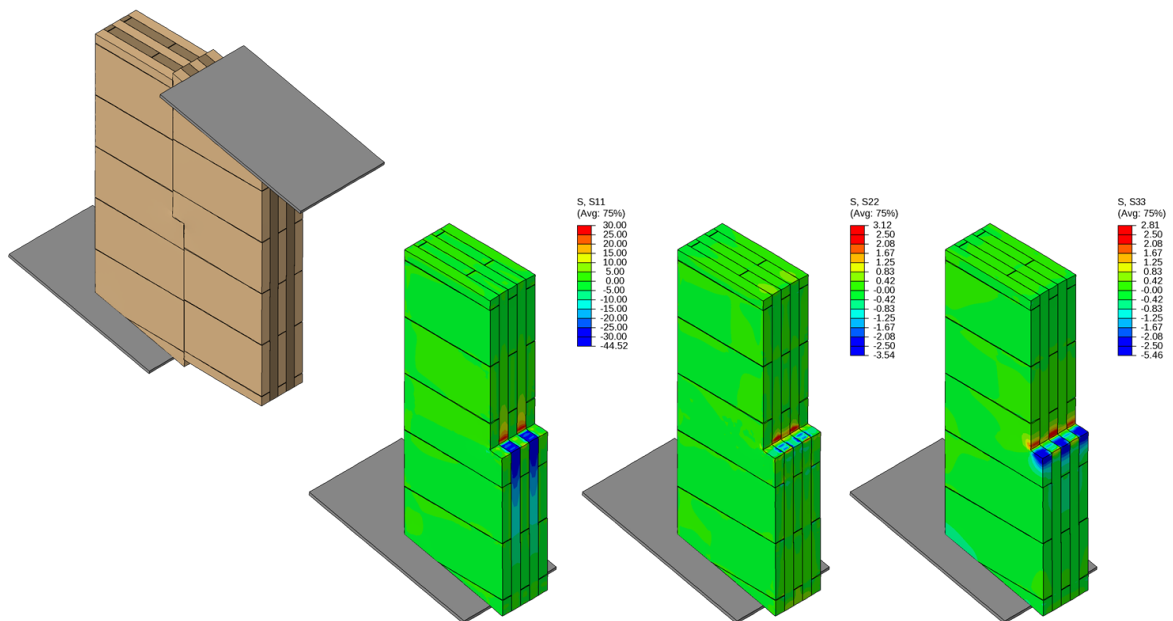
Abbildung 13: Konzepte für formschlüssige Bauteilstöße mit BSP-Bauteilen



Quelle: Hipper, Diplomarbeit, TU München

Im Zuge dieser Untersuchungen wurden an der TU München kleinere Grundmodelle entwickelt, an denen das Schubverhalten solcher Zackenverbindungen genauer evaluiert werden kann. Die entsprechenden experimentellen Daten wurden uns von unserem Projektpartner zur Verfügung gestellt und konnten zur Kalibrierung eines zugehörigen Finite-Elemente-Modells herangezogen werden. Da die Durchführung von Großversuchen, d.h. ganzen Wand-Decken-Anschluss-Details, sehr zeit- und vor allem kostenaufwändig wären, ist eine anschließende numerische Betrachtung ein logischer weiterer Entwicklungsschritt.

Abbildung 14: Simulation der Verbindungsversuche – Modell und ausgewählte Ergebnisse

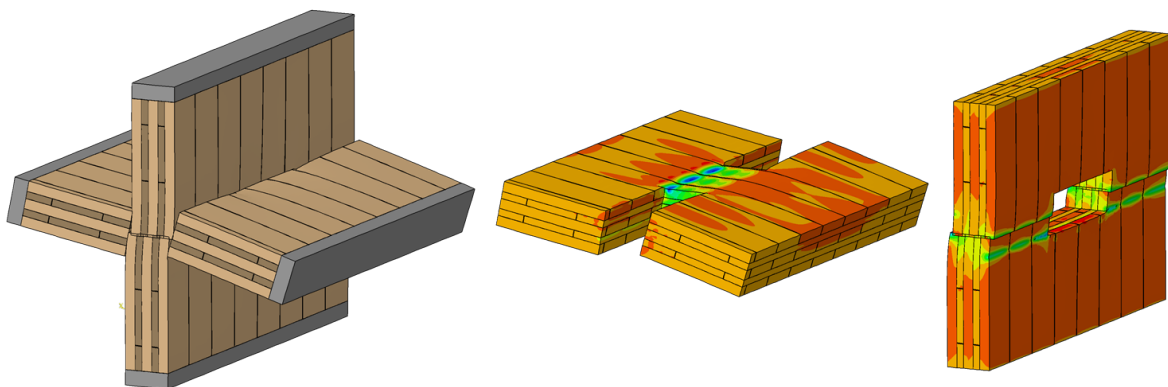


### Simulation der Verbindungsversuche

Wie in Abbildung 14 für das Finite-Elemente-Modell dargestellt, wurde in den Experimenten das Detail einer Wand-Wand-Verbindung unter einer Schubbelastung untersucht. Dabei wurden in insgesamt 22 Versuchen unterschiedliche Zackenlängen bzw. -höhen betrachtet. Abbildung 14 zeigt Ergebnisse der Simulationen, wobei auch hier wieder besonderes Augenmerk auf die korrekte Formulierung der Kontaktbedingungen bzw. des Materialverhaltens gelegt wurde. Der Vergleich mit den experimentellen Last-Verschiebungskurven zeigt, dass nicht nur die Steifigkeit der Verbindung sehr gut vorhergesagt werden kann, sondern auch die anfängliche Konsolidierungsphase (nichtlinearer Anfangsbereich) aufgrund von Verzahnungseffekten der aufeinandertreffenden Längslagen bzw. der „plastischen“ Verformungen in den Kontaktbereichen. Das experimentell zu beobachtende beinahe idealplastische Gesamttragverhalten kann ebenfalls mit Hilfe der implementierten und bereits beschriebenen Benutzer-Subroutine sehr gut abgebildet werden.

In weiterer Folge wurde die Wand-Decken-Verbindung modelliert, die in Abbildung 15 gemeinsam mit ausgewählten Spannungsplots dargestellt ist. Hintergrund für diese Untersuchungen ist der aktuelle Mangel an Wissen der korrekten Modellierung solcher Verbindungstypen in der Praxis, weshalb meistens zu konservative Annahmen getroffen und ein wirtschaftlicher Einsatz von reinen BSP-Konstruktionen stark erschwert wird.

Abbildung 15: Simulation eines Bauteilstoßes – Modell und ausgewählte Ergebnisse

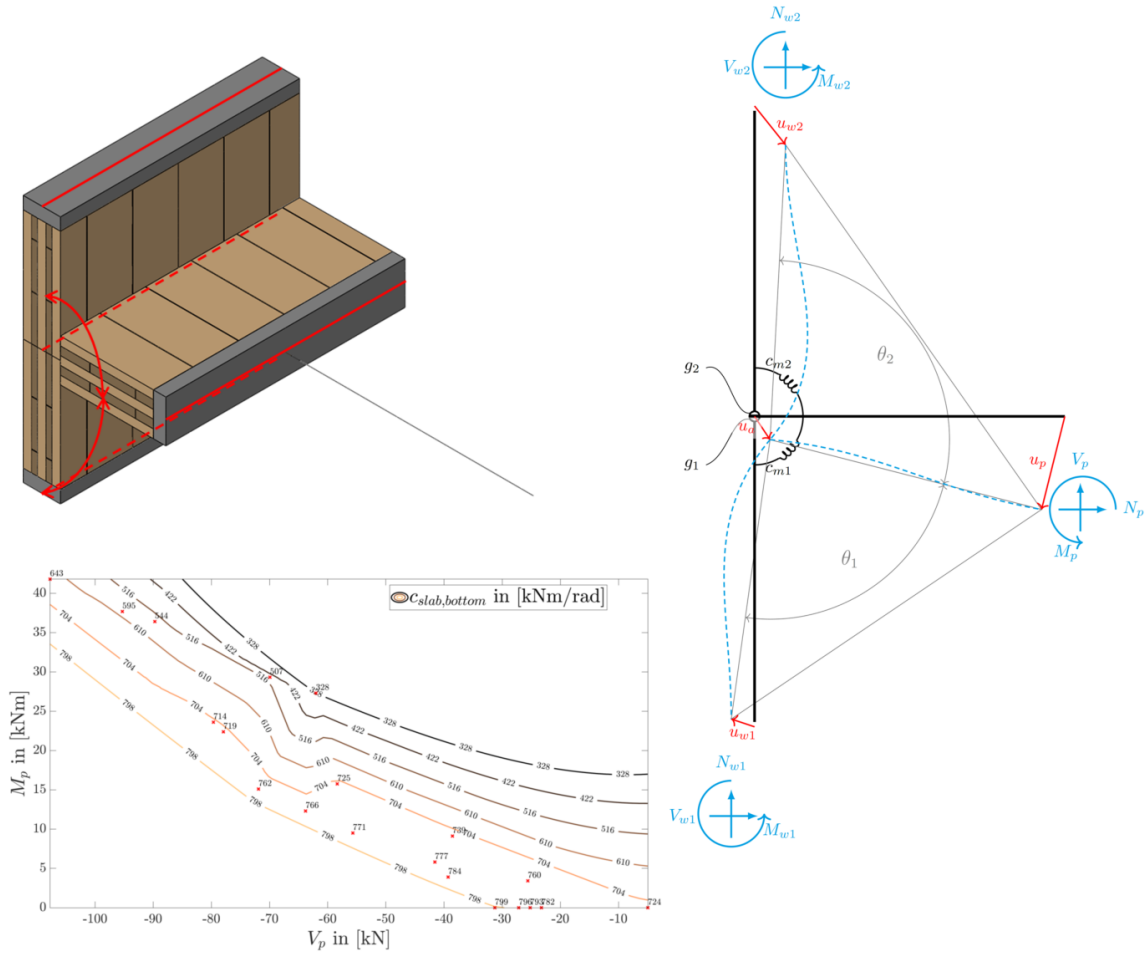


Im letzten Schritt dieses Subprojekts konnte nun mittels detaillierter Simulationen die Verbindungssteifigkeit in Abhängigkeit von Belastung und Vorspannung untersucht werden. Dafür wurde das in Abbildung 16 dargestellte Finite-Elemente-Modell der Wand-Decken-



Verbindung mittels unterschiedlicher Kombinationen von Vorspannung in Wandrichtung und aufgebrachtener Querkraft bzw. Biegemoment an der Decke belastet.

Abbildung 16: Finite-Elemente-Modell der Wand-Decken-Verbindung (links oben), idealisiertes statisches Modell mit Federn (rechts) mit effektiven Steifigkeiten (links unten) aus dem FE-Modell



Als Ergebnis aus den Simulationen ergeben sich effektive Federsteifigkeiten, welche in vereinfachten Modellierungsansätzen verwendet werden könnten. Abbildung 16 links unten zeigt z.B. die Steifigkeit der oberen Drehfeder in Abhängigkeit von Biegemoment und Querkraft am Deckenelement. In einer weiteren Studie könnte mithilfe der entwickelten Methode für sämtliche mögliche Belastungskombinationen eine Datenbank mit daraus resultierenden effektiven Steifigkeiten gefüllt werden.

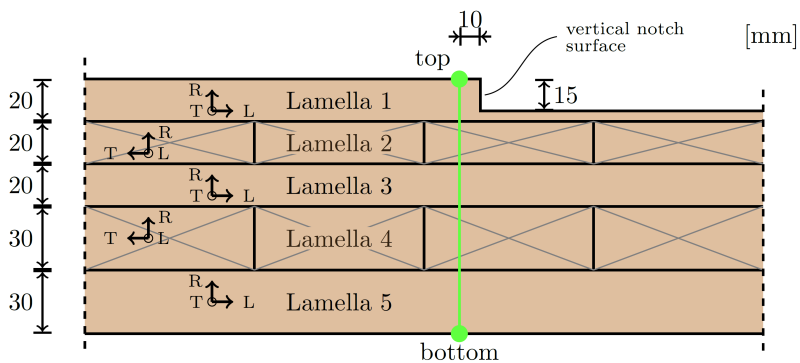


Verbindungen von flächigen Holzbauteilen werden oft sehr vereinfachend in Systemstatiken berücksichtigt. Dies führt zu großen Unsicherheiten bei der Schnittgrößenermittlung. Simulationen bieten sich an um realitätsnahe Nachgiebigkeiten von solchen Verbindungen zu ermitteln.

### Feuchtigkeits-Simulationen von Holz-Beton-Verbunddecken nach Aufbringen von Frischbeton

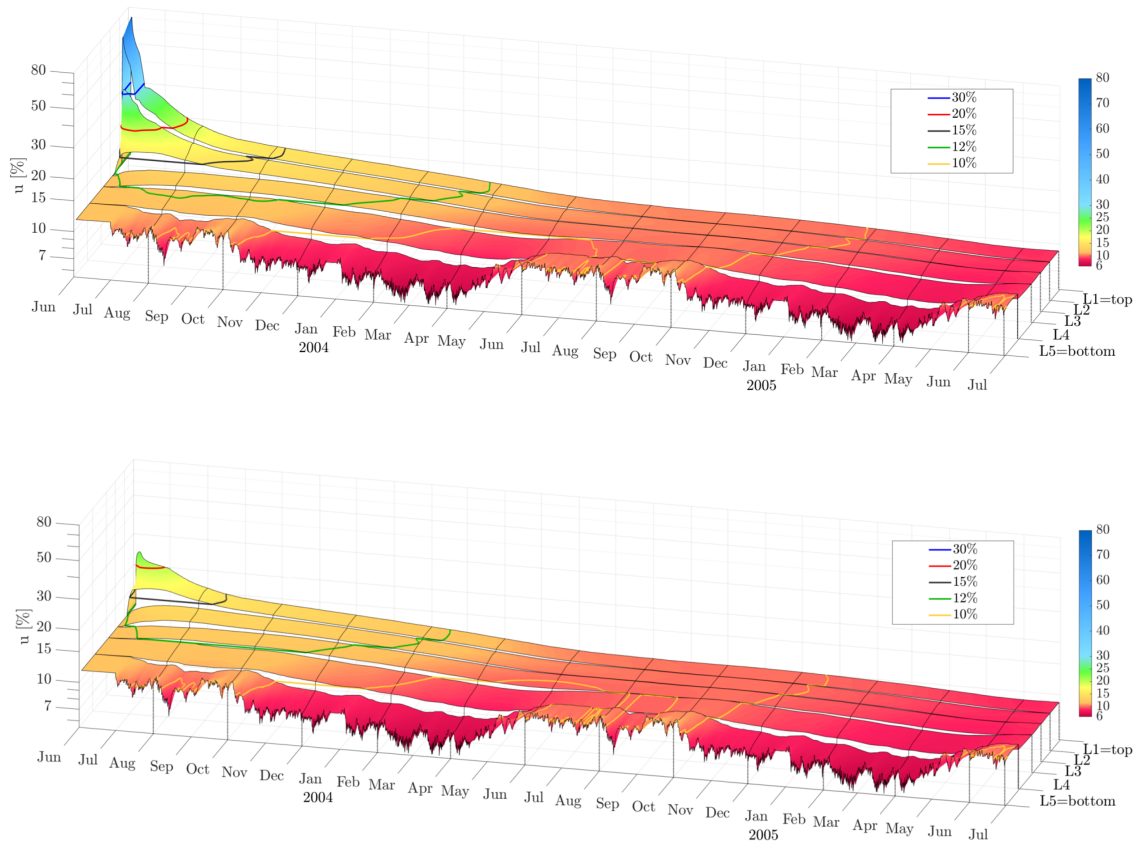
Die zuvor untersuchte HBV-Platte wurde nun nach dem fiktiven Aufbringen von Frischbeton mit realistischen Innenraumklimaverläufen an der Plattenunterseite beaufschlagt. Abbildung 17 zeigt den Aufbau der BSP-Platte und den Pfad, entlang dessen die Holzfeuchtigkeit über den Simulationszeitraum ausgewertet wird.

Abbildung 17: Skizze mit Aufbau der BSP-Platte mit lokalen Koordinatensystemen und Pfad (grün) für die Auswertung der Holzfeuchteverläufe über die Simulationszeit



Quelle: (Lukacevic u. a. 2021)

Abbildung 18: Verlauf der Holzfeuchtigkeit entlang der BSP-Plattenstärke (von L1=oberste Lamelle bis L5=unterste Lamelle), geplottet über einen Zeitraum von zwei Jahren für das unversiegelte Modell (oben) und das Modell mit versiegelten Stirnflächen im Bereich der Kerfen (unten)



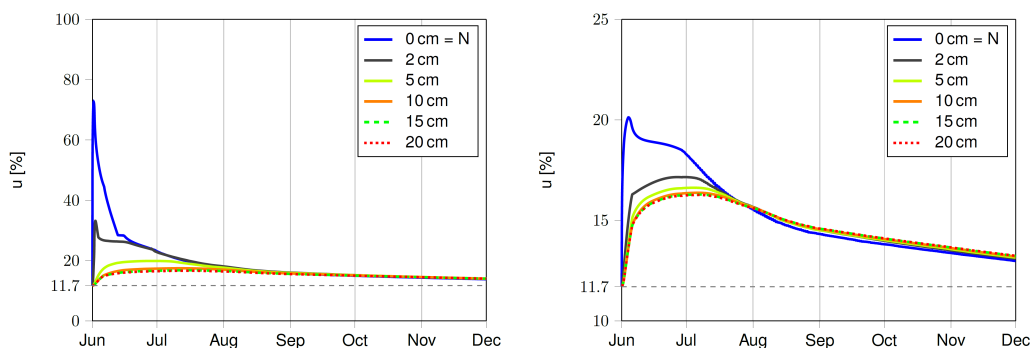
Quelle: (Lukacevic u. a. 2021)

Die resultierenden Holzfeuchtigkeiten entlang des Pfads über den gesamten simulierten Zeitraum sind in Abbildung 18 (oben) zuerst für das Originalmodell ohne Versiegelung dargestellt. Dabei entstehen Feuchtespitzen von über 70 % in der obersten Lamelle, was einem Wert über dem Fasersättigungspunkt und damit dem Vorhandensein von freiem Wasser in den Holzzellen entspricht. Ungefähr die obere Hälfte der Platte wird durch das Aufbringen des Frischbetons in der Holzfeuchtigkeit beeinflusst. Abhängig vom Innenraumklima wird dann die eingebrachte zusätzliche Feuchtigkeit über einen Zeitraum von neun bis zehn Monaten abgebaut, bevor die gesamte Platte austrocknet und eine Ausgleichsfeuchte zwischen 8 % und 9 % erreicht wird. Anschließend werden nur noch die untersten beiden Lamellen durch das Innenraumklima beeinflusst.

Das Vorhandensein einer lokalen Versiegelung im Bereich der Stirnflächen der Kerven bewirkt eine effektive Reduktion der auftretenden Feuchtespitze (siehe Abbildung 18 unten).

Abbildung 19 zeigt den Vergleich der Holzfeuchte-Verläufe in der Schubfuge für die beiden betrachteten Modellvarianten. Hier kann man erkennen, dass die erhöhten Feuchtwerte genau in dem Bereich auftreten, in dem auch die höchsten Schubspannungen zu erwarten sind. Durch die resultierende feuchtereduzierte Schubfestigkeit kann dies also zu kritischen Zuständen führen, vor allem wenn das HBV-Element kurz nach Aufbringen des Frischbetons bereits belastet wird und nicht die volle Aushärtezeit von 28 Tagen eingehalten wird. Für das lokal versiegelte Modell sieht man auch hier, dass die lokal vorhandene Feuchtespitze einen Wert von 20 % nicht überschreitet. Das heißt, dass so eine Versiegelungsvariante bisher übliche Trennfolien, welche einen hohen Arbeitsaufwand verursachen bzw. die Lastübertragung vermindern können, eventuell ersetzen könnte. Das hier beschriebene Modell bzw. die damit erhaltenen Ergebnisse sind in einer wissenschaftlichen Publikation detailliert dargestellt (Lukacevic u. a. 2021).

Abbildung 19: Verlauf der Holzfeuchtigkeit in der Schubfuge (horizontale Verlängerung der Kervenecke), dargestellt über einen Zeitraum von einem halben Jahr für das unversiegelte Modell (links) und das Modell mit versiegelten Stirnflächen im Bereich der Kerven (rechts)



Quelle: (Lukacevic u. a. 2021)

Mittels Feuchtesimulationen kann die Höhe und die Dauer von potentiell schädlichen Feuchtekonzentrationen in Holzbauteilen abgeschätzt werden.

### Tragfähigkeitsvorhersage von Brettschichtholz-Trägern mittels effektiver Materialeigenschaften

Dieses Subprojekt behandelt zwar Brettschichtholz-Träger und keine BSP-Elemente, allerdings soll an diesem einfacheren Holzbauprodukt zuerst die Vorgangsweise zur Ermittlung von Tragfähigkeiten ermittelt werden, da die Grundidee bzw. die Vorgangsweise für beide Produkte dieselbe ist. Die Holzlamellen werden dabei in Abschnitte unterteilt, wobei in astfreie und in Astabschnitte unterschieden wird, denen dann effektive Materialeigenschaften zugewiesen werden (siehe Abbildung 20). In diesem Subprojekt wurden 40 experimentell getestete BSH-Träger virtuell rekonstruiert und dann mithilfe von FE-Simulationen nachgerechnet. Dabei wurden für jeden Astabschnitt alle Äste mithilfe der vorhandenen Laser-Scan-Daten und unter Verwendung eines im Forschungsbereich entwickelten Algorithmus virtuell rekonstruiert (Kandler, Lukacevic, und Füssl 2016) und Finite-Elemente-Modelle der Astabschnitte erstellt. Dies resultierte in effektiven Eigenschaften, die schließlich den Trägerabschnitten zugewiesen werden konnten. Weiters wurden die Astparameter dazu benutzt ebenfalls effektive Festigkeiten zu ermitteln (Lukacevic, Füssl, und Eberhardsteiner 2015) und den Abschnitten zuzuweisen. Die Modelle wurden anschließend bis zum Versagen belastet und einerseits die erreichte Traglast und andererseits der erhaltene Versagensmechanismus mit den Experimenten verglichen.

Abbildung 20: Darstellung des Simulationskonzepts zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern; Zuweisung von Abschnitten mit effektiven Materialeigenschaften

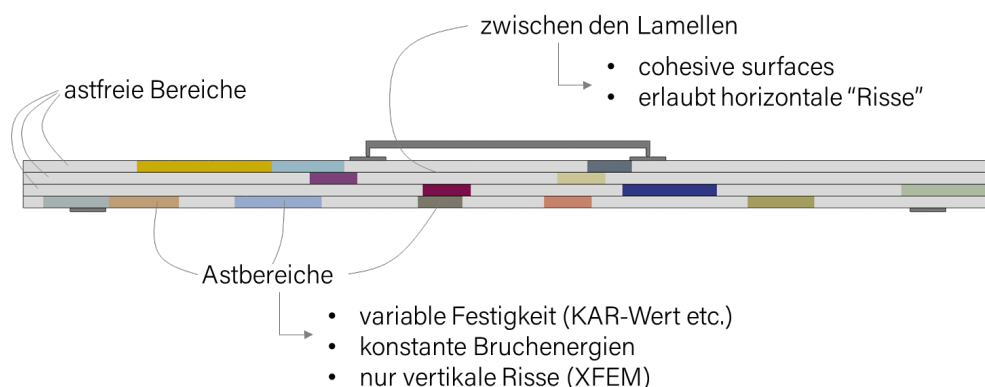
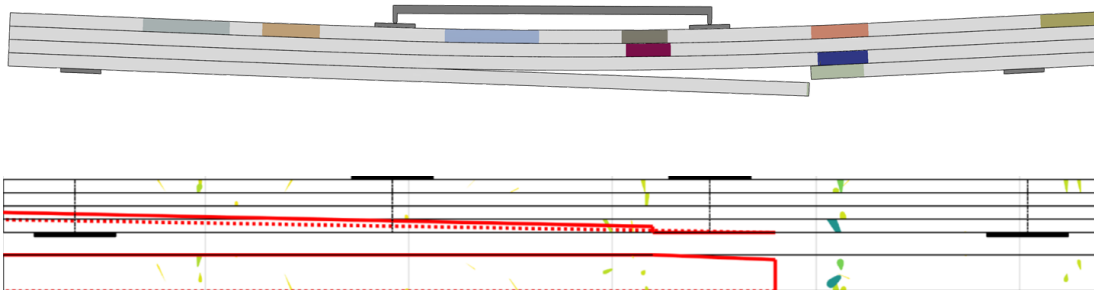


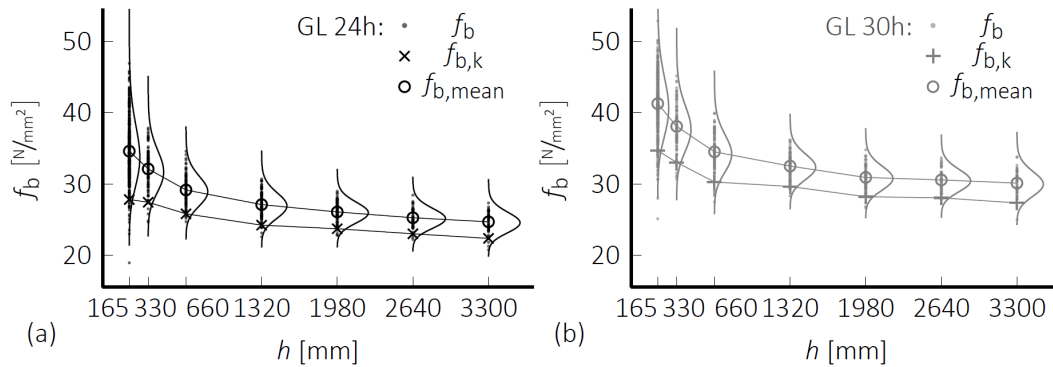
Abbildung 21 zeigt beispielhaft den aus der Simulation und dem Experiment erhaltenen Versagensmechanismus für einen BSH-Träger mit vier Lamellen. Insgesamt wurden 40 Träger nachgerechnet, wobei jeweils die Hälfte der Festigkeitsklasse GL 24h und GL 30h zuzuweisen sind und jede der beiden Gruppen zur Hälfte aus Trägern mit vier bzw. zehn Lamellen bestand. Ein Vergleich der so erhaltenen Traglasten konnte zeigen, dass diese gut numerisch abgeschätzt werden können und dass die erhaltenen globalen Versagensmechanismen realistisch abgebildet werden können (Vida, Lukacevic, Eberhardsteiner, u. a. 2022).

Abbildung 21: Numerisch ermittelter (oben) und experimenteller (unten) Versagensmechanismus eines BSH-Trägers mit vier Lamellen



Das so validierte Modell wurde zur Untersuchung des aktuell sehr praxisrelevanten Höheneffekts bei BSH-Trägern verwendet (Vida, Lukacevic, Hochreiner, u. a. 2022). Dafür wurden 3500 Simulationen von BSH-Trägern mit Trägerhöhen von 165 mm bis 3300 mm durchgeführt. Die so erhaltenen Biegefestigkeiten sämtlicher Träger sind in Abbildung 22 dargestellt. Zusätzlich sieht man dort für jede Trägerhöhe die jeweils erhaltenen charakteristischen Biegefestigkeiten  $f_{b,k}$  bzw. die zugehörigen Mittelwerte  $f_{b,mean}$ .

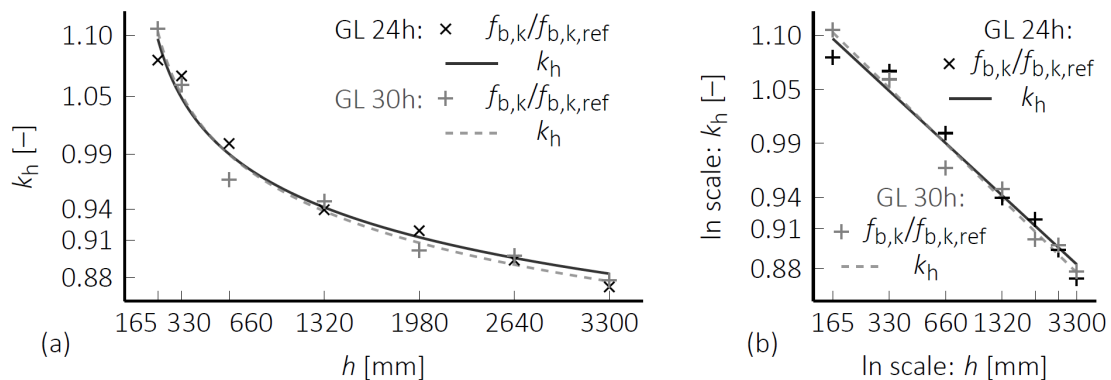
Abbildung 22: Biegefestigkeiten  $f_b$  und deren Verteilungen für simulierte BSH-Träger in Abhängigkeit der Höhe  $h$  und für die zwei Festigkeitsklassen (a) GL 24h und (b) GL 30h



Hier kann man erkennen, dass die charakteristischen Biegefestigkeiten mit zunehmender Trägerhöhe abnehmen, wobei die Abnahme in Bezug auf die Bezugshöhe von 600 mm bis zu 12 % beträgt. Gleichzeitig nimmt aber auch die Varianz der Biegefestigkeiten mit der Trägerhöhe ab. Der erwähnte Bezug zur Trägerhöhe von 600 mm ist noch klarer in Abbildung 23 zu sehen, wo der sogenannte Höhenfaktor  $k_h$  in Abhängigkeit der BSH-Trägerhöhe dargestellt ist. Dieser Faktor ist aktuell in der DIN EN 1995-1-1 nur für Trägerhöhen bis zu dieser Referenzhöhe definiert.

Durch unser umfangreiches Simulationsprogramm konnten wir einen wichtigen Beitrag zur aktuellen Diskussion über die Vorhersage von Biegefestigkeiten hoher BSH-Träger liefern.

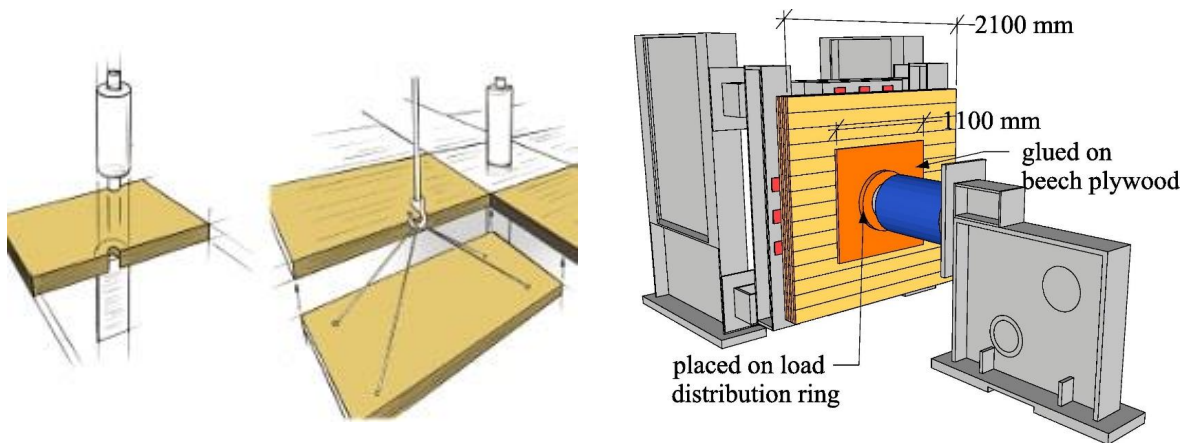
Abbildung 23: Änderung des Höhenfaktors  $k_h$  in Abhängigkeit der BSH-Trägerhöhe, in (a) linearer und (b) logarithmischer Darstellung, wobei  $h = 600$  mm die Bezugshöhe ist



## Numerische Simulation einer innovativen Lösung für punktgestützte BSP-Elemente

In diesem Subprojekt sollen die in (Muster und Frangi 2020) vorgestellten und experimentell getesteten punktgestützten BSP-Elemente simuliert werden. Abbildung 24 zeigt den besonderen Aufbau dieser Stützen-Decken-Verbindung.

Abbildung 24: Skizze des punktgestützten BSP-Elements (links) und experimenteller Aufbau (rechts)



Quelle: (Muster und Frangi 2020)

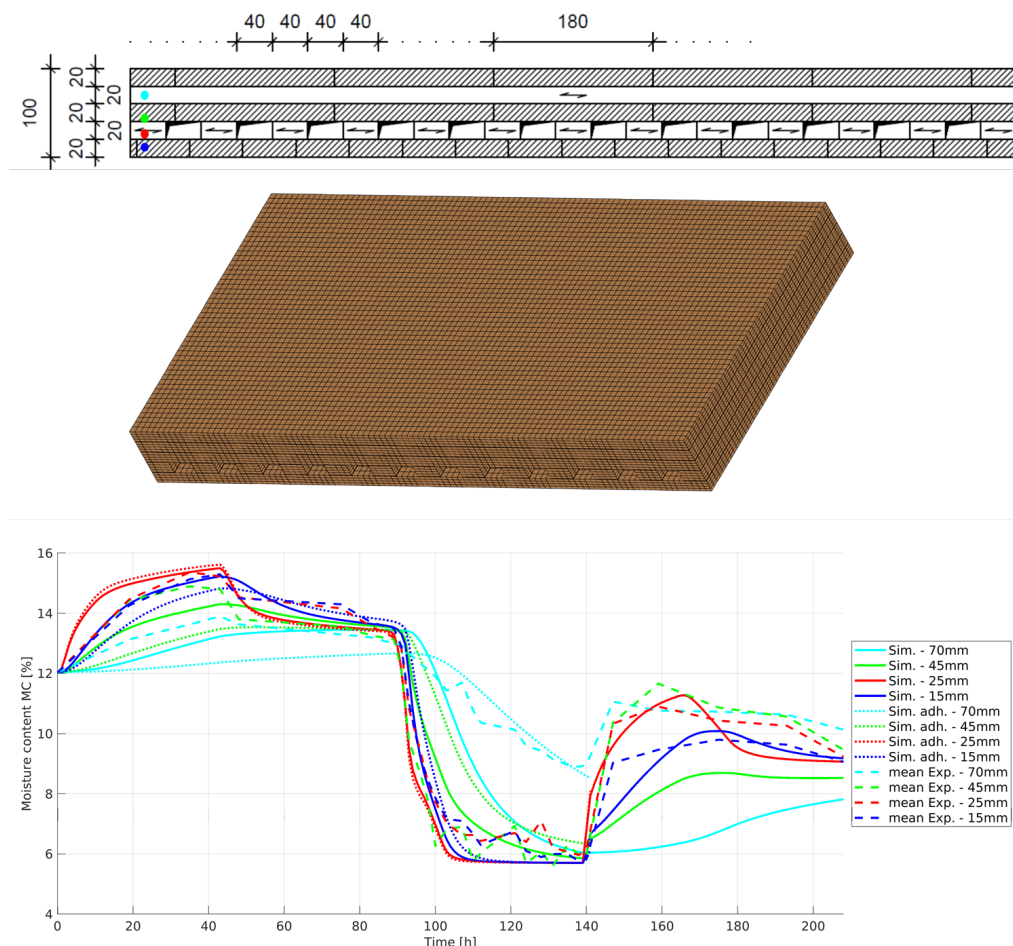
Weiters wurden in den Experimenten lokale Verstärkungen des Lasteinleitungsbereichs mittels Buchensperrholzplatten untersucht. In einem ersten Schritt wurden nun sämtliche Modelle im elastischen Bereich nachgerechnet, um die Steifigkeiten des Systems validieren zu können. In weiterer Folge soll nun mithilfe der im ersten Unter-Arbeitspaket entwickelten User-Subroutine das plastische Verhalten im Lasteinleitungsbereich simuliert werden und die zusätzlichen, in der referenzierten Publikation dargestellten, Versagensmechanismen mittels kohäsiver Flächen abgebildet werden. Ein voll validiertes Modell könnte dann in zusätzlichen Simulationsschritten hinsichtlich einer Änderung der Plattenabmessungen bzw. veränderter Lagerungsbedingungen untersucht werden.

## Feuchtigkeits- und Spannungs-Simulationen von thermisch aktivierten BSP-Elementen

In Arbeitspaket 5 wurde an der TU München das in Abbildung 25 dargestellte BSP-Element mit Luftkanälen in der zweiten Laminierungsebene entwickelt, welches eine thermische Nutzung der BSP ermöglichen soll. Da Holz ein stark hygroskopisches Verhalten aufweist, wurde diese Neuentwicklung unter anderem verschiedenen klimatischen Bedingungen ausgesetzt, indem

die Luftkanäle mit beheizter bzw. gekühlter Luft mit unterschiedlichen relativen Luftfeuchten durchströmt und die Formänderungen gemessen wurden. Mittels Feuchtesimulationen konnte das Feuchteverhalten der BSP-Elemente nachsimuliert werden (sh. Abbildung 25 unten). Diese Simulationen erlauben eine genauere Analyse dieses Verhaltens im Vergleich zu experimentellen Messungen, die nur punktuell stattfinden können. Weiters konnte so auch einfach der Einfluss unterschiedlich dichter Klebeschichten untersucht werden.

Abbildung 25: Von oben nach unten: Querschnitt des thermisch aktivierten BSP-Elements, Finite-Elemente-Modell für die Feuchtigkeitssimulationen und resultierende Feuchteverläufe für ausgewählte Punkte, für die auch experimentelle Ergebnisse vorhanden waren.



### Simulation von Schraub-Press-Verklebungen von BSP- und BSH-Elementen

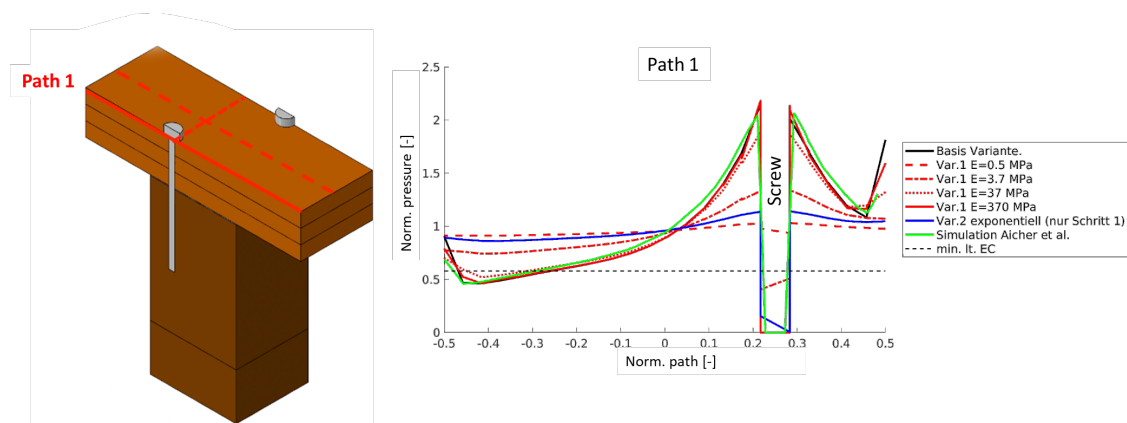
Holzrippenelemente aus BSP und BSH werden unter anderem mittels sogenannten Schraub-Press-Verklebungen hergestellt, wo die Schrauben den erforderlichen Pressdruck in der Klebschicht erzeugen. Dabei treten überlagerte Einflüsse von Schraubenabstand und Platten-Biegesteifigkeit auf die Pressdruckverteilung auf. Erste Finite-Elemente-Simulationen für



dieses Problem wurden in (Aicher, Zisi, und Simon 2021) durchgeführt. Darauf aufbauend konnten jetzt Simulationen unter Berücksichtigung der Steifigkeit der Leimschicht durchgeführt werden. Dadurch konnten die Spannungsgradienten deutlich reduziert werden, was näher an den tatsächlichen Bedingungen in Experimenten liegt und für größere Schraubenabstände spricht.

Mit diesem Ergebnis konnten wir zur laufenden Diskussion beitragen, wie die erforderlichen Schraubenabstände für solche Verbindungsarten in Holzbaunormen definiert werden sollen.

Abbildung 26: Finite-Elemente-Modell einer Schraub-Press-Verklebung von Holzrippenelementen aus BSP und BSH und resultierende Spannungsverteilung in der Leimschicht unter Berücksichtigung verschiedener Leimschicht-Steifigkeiten

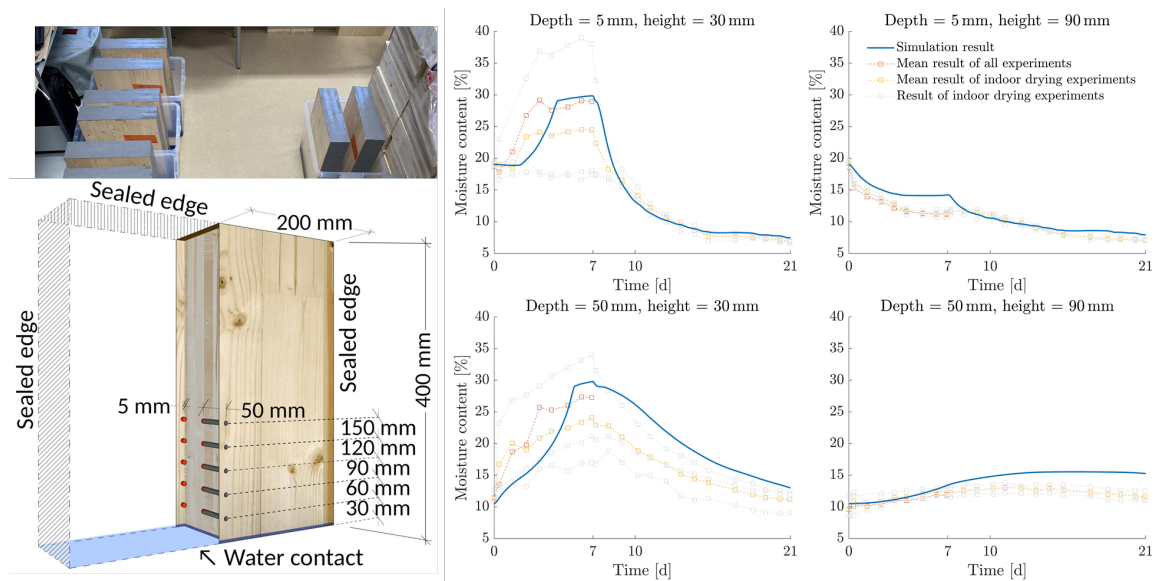


### Simulation der Feuchtigkeitsaufnahme und des Austrocknens von BSP-Prüfkörpern unter verschiedenen Klimabedingungen

Ein weiteres häufig auftretendes Problem bei BSP-Elementen ist die Feuchteaufnahme über die Stirnflächen. Dazu wurden an der TalTech (Technische Universität Tallinn, Estland) Versuche durchgeführt (sh. links in Abbildung 27), welche dazu verwendet wurden ein entsprechendes numerisches Modell und damit durchgeführte Feuchtesimulationen zu validieren. Mit diesen Simulationen konnte gezeigt werden, dass das Feuchteaufnahmeverhalten sowie die nachfolgende Trocknung für so ein BSP-Detail realistisch simuliert werden können. Im Vergleich zum Versuch konnte zusätzlich untersucht werden, welche Modellparameter was für einen Einfluss auf den Feuchteverlauf haben und somit kritische Punkte identifiziert werden. Mit diesem Modell können in weiterer Folge einfacher ähnliche

Szenarios untersucht und mögliche Verbesserungen entwickelt werden, wie zum Beispiel teilweise Versiegelungen von Seitenflächen, welche bei unzureichender Ausführung auch zu Stauproblemen führen könnten.

Abbildung 27: Versuchsaufbau für Feuchteaufnahme-Untersuchungen über die Stirnflächen von BSP-Elementen und Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse für mehrere Messpunkte



Feuchteschäden sind im Holzbau einer der größten Gefahren. Die experimentelle Identifikation von kritischen Situationen sowie die Bestimmung von Holzfeuchteverläufen über lange Zeiträume ist jedoch sehr aufwändig. Aus diesem Grund ist die Weiterentwicklung von Simulationstools in diesem Bereich besonders wichtig. Ein wesentlicher Beitrag dazu wurde in diesem Projekt geleistet.

# Schlussbemerkung

Die entwickelten Methoden und Simulationskonzepte zeigen bereits das große zukünftige Potential hinsichtlich der mechanischen Bewertung der Performance von modernen Holzwerkstoffen auf.

Die in diesem Projekt entwickelten Simulationskonzepte zur Beschreibung des quasi-spröden Materialverhaltens von Holz sowie zur Bestimmung von Feuchteverläufen in Holzprodukten wurden in fünf internationalen Journalpublikationen vorgestellt. Dabei handelt es sich um hochrangige Journale mit „Impact“-Faktoren von 2,6 (Finite Elements in Analysis and Design) bis 7,1 (Journal of Building Engineering). Praxisnähere Aufgabenstellungen wurden unter anderem mit Diplomarbeiten abgehandelt.

Da die Anzahl an virtuellen Versuchen gegenüber deren physischen Pendanten nahezu unbegrenzt ist, können unterschiedliche Varianten untersucht bzw. Größeneffekte, Laminierungseinflüsse und letztendlich charakteristische Werte der Materialeigenschaften zuverlässig auf Basis von hunderten Simulationen bestimmt werden.

Die in der Einleitung angesprochene zunehmende Vielfalt an Holzprodukten, Verbindungsmittelsystemen und die steigende Komplexität der Konstruktionen im Ingenieurholzbau wird in Zukunft nur durch eine intelligente Verknüpfung von physischen Experimenten und virtuellen Simulationskonzepten beherrschbar sein. Beherrschbar in dem Sinne, dass die mechanische Performance von allen gewählten Konstruktionsdetails so gut vorhergesagt werden kann, damit eine effiziente, wirtschaftliche und vertrauenswürdige Ausführung gewährleistet ist.

Durch moderne computergestützte Modellierung kann die Wettbewerbsfähigkeit von Holz gegenüber anderen Baumaterialien gesteigert und eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Ingenieurholzbaus sichergestellt werden.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abschlusskonferenz in Schweden: (Links) Präsentation unseres Projekts, (Mitte) InnoCrossLam Team und Assoziierte Partner, (Rechts) Wood Hotel	9
Abbildung 2: Konzeptionelles Ablaufdiagramm der implementierten Methoden	13
Abbildung 3: Numerisch bestimmte unterschiedliche Verzerrungskomponenten eines Würfels mit 20 mm Seitenlänge der über 300 h belastet und mit zwei Mal fünf Befeuchtungszyklen beansprucht wird.	15
Abbildung 4: Beispiele zur Validierung der neu implementierten Phase-Field-Methode anhand von typischen Versuchen aus der Literatur: (a) Double Cantilever Beam (DCB), (b) Single-Edge Notched Beam (SENB) und (c) End Notched Beam (ENB) (Pech u. a. 2022b)	16
Abbildung 5: Kombination der Phase-Field-Methode mit bereits vorhandenen Rekonstruktionsalgorithmen für Holzbretter mit Ästen, mit deren Hilfe Faserverläufe rund um Äste numerisch beschrieben werden können	17
Abbildung 6: Anwendungsbeispiel der Phase-Field-Methode auf ein Holzbrett mit einem Ast unter Berücksichtigung des Faserverlaufs	17
Abbildung 7: Herstellung einer verklebten Holz-Beton-Verbundkonstruktion aus BSP-Platte mit Kernen und Betonfertigteil	19
Abbildung 8: HBV-Kleinversuch mit Versuchsanordnung und Darstellung der Schubspannungsverteilung im kritischen Bereich unter der Holzknagge	20
Abbildung 9: Finite-Elemente-Modell mit Lasteinleitung und Auflagerbedingungen	21
Abbildung 10: Detail der Schubspannungsverteilung im Bereich der ersten Knagge (a) kurz nach Versagensbeginn und (b) kurz vor vollständigem Versagen	21
Abbildung 11: Hauptspannungstrajektorien des Großversuchs, welche die Lastableitung im HBV-Element von der Lasteinleitungsstruktur hin zum linken Auflager zeigen	22
Abbildung 12: Hauptspannungstrajektorien des Kleinversuchs, welche die Lastableitung im HBV-Element von der Lasteinleitung (links) hin zum Auflager (rechts) zeigen	23
Abbildung 13: Konzepte für formschlüssige Bauteilstöße mit BSP-Bauteilen	24
Abbildung 14: Simulation der Verbindungsversuche – Modell und ausgewählte Ergebnisse	24
Abbildung 15: Simulation eines Bauteilstoßes – Modell und ausgewählte Ergebnisse	25
Abbildung 16: Finite-Elemente-Modell der Wand-Decken-Verbindung (links oben), idealisiertes statisches Modell mit Federn (rechts) mit effektiven Steifigkeiten (links unten) aus dem FE-Modell	26
Abbildung 17: Skizze mit Aufbau der BSP-Platte mit lokalen Koordinatensystemen und Pfad (grün) für die Auswertung der Holzfeuchteverläufe über die Simulationszeit	27
Abbildung 18: Verlauf der Holzfeuchtigkeit entlang der BSP-Plattenstärke (von L1=oberste Lamelle bis L5=unterste Lamelle), geplottet über einen Zeitraum von zwei Jahren für das unversiegelte Modell (oben) und das Modell mit versiegelten Stirnflächen im Bereich der Kernen (unten)	28

Abbildung 19: Verlauf der Holzfeuchtigkeit in der Schubfuge (horizontale Verlängerung der Kervenecke), dargestellt über einen Zeitraum von einem halben Jahr für das unversiegelte Modell (links) und das Modell mit versiegelten Stirnflächen im Bereich der Kerven (rechts)	29
Abbildung 20: Darstellung des Simulationskonzepts zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern; Zuweisung von Abschnitten mit effektiven Materialeigenschaften	30
Abbildung 21: Numerisch ermittelter (oben) und experimenteller (unten) Versagensmechanismus eines BSH-Trägers mit vier Lamellen	31
Abbildung 22: Biegefestigkeiten $f_b$ und deren Verteilungen für simulierte BSH-Träger in Abhängigkeit der Höhe $h$ und für die zwei Festigkeitsklassen (a) GL 24h und (b) GL 30h	32
Abbildung 23: Änderung des Höhenfaktors $k_h$ in Abhängigkeit der BSH-Trägerhöhe, in (a) linearer und (b) logarithmischer Darstellung, wobei $h = 600$ mm die Bezugshöhe ist	32
Abbildung 24: Skizze des punktgestützten BSP-Elements (links) und experimenteller Aufbau (rechts)	33
Abbildung 25: Von oben nach unten: Querschnitt des thermisch aktivierten BSP-Elements, Finite-Elemente-Modell für die Feuchtigkeitssimulationen und resultierende Feuchteverläufe für ausgewählte Punkte, für die auch experimentelle Ergebnisse vorhanden waren.	34
Abbildung 26: Finite-Elemente-Modell einer Schraub-Press-Verklebung von Holzrippenelementen aus BSP und BSH und resultierende Spannungsverteilung in der Leimschicht unter Berücksichtigung verschiedener Leimschicht-Steifigkeiten	35
Abbildung 27: Versuchsaufbau für Feuchteaufnahme-Untersuchungen über die Stirnflächen von BSP-Elementen und Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse für mehrere Messpunkte	36

## Literaturverzeichnis

- Aicher, Simon, Nikola Zisi, und Kai Simon. 2021. „Screw-Gluing of Ribbed Timber Elements – Effects of Screw Spacing and Plate Stiffness on Bond Line Cramping Pressure“. *Otto Graf Journal* 20:30.
- Kandler, Georg, Markus Lukacevic, und Josef Füssl. 2016. „An algorithm for the geometric reconstruction of knots within timber boards based on fibre angle measurements“. *Construction and Building Materials* 124:945–60.
- Lukacevic, M., und J. Füssl. 2014. „Numerical simulation tool for wooden boards with a physically based approach to identify structural failure“. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(4):497–508. doi: 10.1007/s00107-014-0803-y.
- Lukacevic, Markus, Maximilian Autengruber, Thomas Raimer, und Josef Füssl. 2021. „Effect of cast-in-place concrete application on moisture distribution in timber-concrete composite floors with notched connections, investigated by means of numerical simulation“.
- Lukacevic, Markus, Josef Füssl, und Josef Eberhardsteiner. 2015. „Discussion of common and new indicating properties for the strength grading of wooden boards“. *Wood Science and Technology* 49(3):551–76.
- Lukacevic, Markus, Georg Kandler, Min Hu, Anders Olsson, und Josef Füssl. 2019. „A 3D model for knots and related fiber deviations in sawn timber for prediction of mechanical properties of boards“. *Materials & Design* 166:107617.
- Miehe, C., F. Welschinger, und M. Hofacker. 2010. „Thermodynamically Consistent Phase-Field Models of Fracture: Variational Principles and Multi-Field FE Implementations“. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 83(10):1273–1311. doi: <https://doi.org/10.1002/nme.2861>.
- Muster, M., und A. Frangi. 2020. „Experimental Analysis and Structural Modelling of the Punching Behaviour of Continuous Two-Way CLT Flat Slabs“. *Engineering Structures* 205:110046. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110046.
- Pech, Sebastian, Markus Lukacevic, und Josef Füssl. 2021. „A Robust Multisurface Return-Mapping Algorithm and Its Implementation in Abaqus“. *Finite Elements in Analysis and Design* 190:103531. doi: 10.1016/j.finel.2021.103531.
- Pech, Sebastian, Markus Lukacevic, und Josef Füssl. 2022a. „A Hybrid Multi-Phase Field Model to Describe Cohesive Failure in Orthotropic Materials, Assessed by Modeling Failure Mechanisms in Wood“. *Engineering Fracture Mechanics* 271:108591. doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108591.
- Pech, Sebastian, Markus Lukacevic, und Josef Füssl. 2022b. „Validation of a Hybrid Multi-Phase Field Model for Fracture of Wood“. *Engineering Fracture Mechanics* 108819. doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108819.

Vida, Christoffer, Markus Lukacevic, Josef Eberhardsteiner, und Josef Füssl. 2022. „Modeling Approach to Estimate the Bending Strength and Failure Mechanisms of Glued Laminated Timber Beams“. *Engineering Structures* 255:113862. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113862.

Vida, Christoffer, Markus Lukacevic, Georg Hochreiner, und Josef Füssl. 2022. „Size effect on bending strength of glued laminated timber predicted by a numerical simulation concept including discrete cracking“. *Materials & Design*.

## Abkürzungen

BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
HBV	Holz-Beton-Verbund



**Technische Universität Wien**  
**Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen**  
Karlsplatz 13/202, 1040 Wien  
[www.imws.tuwien.ac.at](http://www.imws.tuwien.ac.at)