

Diploma Thesis

**The effect of fresh concrete application on the
moisture distribution in timber-concrete composite
floors with notched connections, investigated by
means of numerical simulation**

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

Diplomarbeit

**Der Einfluss des Aufbringens von Frischbeton auf die
Feuchtigkeitsverteilung in
Holz-Beton-Verbundkonstruktionen mit Kernen,
untersucht mittels numerischer Simulationen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Thomas Raimer, BSc

Matr.Nr.: 01225660

unter der Anleitung von

Dipl.-Ing. **Maximilian Autengruber**

Dipl.-Ing. Dr.-techn. **Markus Lukacevic**

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Josef Füssl**

Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/202, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2020



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

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit und dem Abschluss meines Studiums unterstützt haben. Allen voran danke ich meinen Betreuern Herrn Dipl.-Ing. **Maximilian Autengruber** und Herrn Dipl.-Ing. Dr.-techn. **Markus Lukacevic** für die engagierte und professionelle Betreuung. Sie sind mir stets für Fragen zur Verfügung gestanden und haben mich mit hilfreichen Denkanstößen durch die Erstellung dieser Arbeit geleitet.

Bei Herrn Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. **Josef Füssl** möchte ich mich ebenfalls für seine ausgezeichnete, unterstützende Betreuung sowie dafür, dass er mir den Rahmen für diese Arbeit am Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen ermöglicht hat bedanken.

Bei meinen Studienkolleginnen und Studienkollegen möchte ich für die gegenseitige Unterstützung während des gemeinsamen Bauingenieurstudiums sowie für die wunderbaren Freundschaften, die daraus entstanden sind, bedanken.

Außerdem danke ich meiner Freundin Franziska, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt hat und mir auch bei der Erstellung dieser Arbeit durch begleitendes Korrekturlesen geholfen hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meiner gesamten Familie, die mir das Studium an der Technischen Universität Wien ermöglicht hat und mich dabei stets unterstützt und motiviert hat, besonders bedanken.



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

Kurzfassung

Durch den Einsatz von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen erlebt die Verwendung von Holzwerkstoffen im Massivbau einen Aufschwung. Bei Verwendung von Frischbeton gelangt jedoch Feuchtigkeit aus dem feuchten Beton in das Holz. Sowohl die mechanischen als auch die bauphysikalischen Holzeigenschaften werden durch die Holzfeuchtigkeit maßgebend beeinflusst. Um Aussagen über das Ausmaß der erhöhten Holzfeuchtigkeit aufgrund des feuchten Aufbetons zu tätigen, können Versuchsmessungen durchgeführt werden. Diese gestalten sich allerdings als sehr zeitintensiv und technisch anspruchsvoll.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, mithilfe eines auf der Finiten-Elemente-Methode basierten Simulationstools, den Feuchteintrag aus dem Frischbeton in eine fünfplagige Brettsperrholzplatte (CLT-Platte) zu erfassen. Es soll das Ausmaß des Feuchteintrags in das Holz beobachtet und beurteilt werden. Außerdem wird eine lokale Versiegelung der Kervenflanke als Alternative zu Trennfolien in der Fuge zwischen den Materialien untersucht. Dazu wurde ein Finite-Elemente-Modell des Kervenbereichs einer CLT-Platte erstellt. Basierend auf den Versuchsergebnissen von Muller [32] wurde der anfängliche Feuchteintrag aus dem Beton ins Holz nachgebildet. Anschließend wurde die Feuchteausbreitung in der CLT-Platte unter verschiedenen realen Innenklimabedingungen über zwei Jahre simuliert.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Aufbringen von Frischbeton auf die Holzoberfläche zu einem stellenweise deutlichen Anstieg der Holzfeuchtigkeit führt. Feuchtegehalte von 20 % bis zu einem Maximalwert von etwa 84 % beschränken sich auf die direkte Umgebung der Kerne. Insgesamt wirkt sich die Erhöhung des Holzfeuchtegehalts nur auf die obersten drei Lamellen aus und hält sich über bis zu zehn Monate. Der Einfluss des Innenklimas beschränkt sich vorwiegend auf die untersten beiden Lamellen und zeigt keine signifikanten Auswirkungen auf die Feuchteentwicklung im oberen Bereich der CLT-Platte.

Die lokal auftretenden Feuchtespitzen führen zu einer starken Abminderung der Festigkeit in der Schubfuge. Gerade in diesem Bereich treten jedoch hohe Schubspannungen auf. Außerdem besteht die Gefahr von schlechteren Verbundbedingungen aufgrund der feuchteinduzierten Reduzierung der Steifigkeit im Kervenbereich. Die Einteilung in die Nutzungsklassen (NKL) des Eurocode 5 berücksichtigt diese Effekte nicht ausreichend. Die Norm bezieht sich dabei auf die mittlere Holzfeuchtigkeit des gesamten Bauteils. Die Simulationen zeigen, dass diese im Holzkörper, außer im ersten Monat nach dem Einbau, durchgehend unter 12 % liegt und nach ein paar Monaten in Richtung einer Ausgleichsfeuchte von 8-9 % absinkt. Das Bauteil wäre demnach der NKL 1 zuzuordnen, welche keine feuchteinduzierte Abminderung der Holzeigenschaften berücksichtigt.

Mit zwei weiteren Modellen wurde untersucht, ob eine lokale Versiegelung im Kervenbereich zu einer Verbesserung der Feuchtesituation im Holz führen kann. Es wurde dazu die Durchlässigkeit an der Oberfläche der Kervenflanke um 50 % bzw. um 100 % reduziert. Es zeigt sich, dass ein relativ hoher Versiegelungsgrad erforderlich ist um den Feuchteintrag aus dem Frischbeton merkbar zu minimieren. Erst durch eine vollständige Versiegelung der Kervenflanke wird es möglich die Holzfeuchtigkeit in der Schubfuge auf unter 20 % zu halten.

Mit dem verwendeten numerischen Simulationstool ist es möglich das Feuchteverhalten in CLT-Platten unter sich ändernden Feuchtigkeitsverhältnissen an der Oberfläche, wie das Aufbringen von Beton oder Innenklimabedingungen, nachzustellen. Somit können Aussagen über kritische Feuchtezustände und sich daraus ergebende Auswirkungen auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von CLT-Platten im Verbund mit Beton getroffen werden.



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

Abstract

Because of the usage of timber-concrete composite constructions, wood-based materials are having an uplift in solid construction. However, when using fresh concrete moisture enters the wood. The mechanical behavior as well as the building physical behavior of wood heavily depends on the moisture content. In order to be able to make a statement about the extent of the increased wood moisture due to the wet concrete, experiments can be carried out. Unfortunately those experiments are very time consuming and technically challenging.

The aim of this diploma thesis is to give information about the moisture entry from the concrete into a notched cross-laminated timber (CLT) board with five layers. The calculations are made with a numerical simulation tool based on the finite element method. The extent of moisture entry into the wood is studied and evaluated. In addition, local sealings in the notched area of the board are examined as an alternative to the commonly used separating layer-foils between concrete and wood. The simulations are conducted on a finite element model of a notched connection in a CLT-plate. Based on the data of Muller [32] the initial moisture entry from the concrete into the wood is reproduced. Following this, the moisture propagation is simulated for a period of two years under different realistic indoor climate conditions.

The results show a distinct increase in moisture content in some places due to the application of concrete. However, moisture contents of 20 % up to a maximum of 84 % are restricted to the direct surrounding area of the notch. Overall the increase in wood moisture content only affects the top three layers and holds for up to ten months. The indoor climate mostly shows an influence on the bottom two layers and has no significant impact on the moisture development in the upper area of the slab.

The locally occurring moisture peaks result in a significant reduction in wood strength and stiffness in the shear joint. However, the highest shear stresses occur in this area particular. Furthermore, the load transfer is worsened due to the reduction in stiffness of the notched connection. The classification into service classes within Eurocode 5 does not consider those effects enough. For the classification, the standard refers to the average moisture content in the whole structural component. The simulations show that, with the exception of the first month after installation, the moisture content continuously is below 12 %. After a few months the wood moisture is decreasing towards an equilibrium moisture content of 8-9 %. Therefore, the slab would be assigned to the service class 1, which does not consider any moisture-induced reduction in wood properties.

With another two models the improvement of the moisture propagation in wood due to a local sealing in the notched area was analyzed. For this purpose the permeability at the vertical surface of the notch was reduced by 50 % and 100 %, respectively. The results show that a relatively high degree of sealing is needed to reach a noticeable reduction in moisture entry. Only with a fully sealed vertical surface of the notch it is possible to keep the moisture content in the shear joint under 20 %.

With the used numerical simulation tool it is possible to reproduce the moisture behavior in CLT-slabs under varying humidity conditions like during the application of concrete or under varying indoor climates. This allows statements to be made about critical moisture conditions and the resulting effects on the load-bearing capacity and serviceability of CLT slabs in combination with fresh concrete.



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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation	11
1.2	Ausgangslage	12
1.3	Problemstellung	12
1.4	Gliederung der Arbeit	13
2	Eigenschaften der Materialien	15
2.1	Holz	15
2.1.1	Mechanische Eigenschaften	15
2.1.2	Feuchtigkeit	16
2.1.3	Transportmodelle	22
2.2	Beton	31
2.2.1	Mechanische Eigenschaften	32
2.2.2	Feuchtigkeit	33
2.3	Holz-Beton-Verbund (HBV)	34
2.3.1	Materialanforderungen	34
2.3.2	Verbund	34
2.3.3	Feuchtigkeit	36
3	Modellierung des kombinierten Feuchte- und Energietransports	41
4	Modellierung einer HBV-Platte zur Ermittlung von Feuchtefeldern	45
4.1	Feuchtemessungen an HBV-Elementen aus [32]	45
4.2	Auftretende Feuchteeinwirkungen	47
4.2.1	Kalibrierung der Feuchteaufnahme aus dem Frischbeton	47
4.2.2	Innenraumklima im Wohnbereich	49
4.2.3	Aufbereitung der Klimadaten	50
4.3	Verwendete Modelle	53
4.3.1	Geometrie, Abmessungen und Annahmen	53
4.3.2	Materialkennwerte und Eingangsparameter	55
4.3.3	Randbedingungen	57
5	Ergebnisse und Interpretation	61
5.1	Modell CLT+FB_0% – unversiegelter Kervenbereich	62
5.1.1	Ausbreitung der Feuchte über die Zeit im Bereich der Kerne	64
5.1.2	Vergleich zwischen Frischbeton und Fertigteil - Modell CLT+FT_100%	67
5.1.3	Feuchteverlauf in der Schubfuge	69
5.1.4	Fazit / Interpretation der Ergebnisse	69
5.2	Modelle mit lokaler Versiegelung im Kervenbereich	74
5.2.1	Modell CLT+FB_50% – 50 % Versiegelungsgrad	74
5.2.2	Modell CLT+FB_100% – 100 % Versiegelungsgrad	77
5.2.3	Fazit / Interpretation der Ergebnisse	77
6	Zusammenfassung und Ausblick	83



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

Symbol- und Notationsverzeichnis

α	Temperaturausdehnungskoeffizient in [1 K^{-1}]
β	Feuchteausdehnungskoeffizient in [$\% \text{ } \%^{-1}$]
ξ	Tensor zur Berücksichtigung der orthotropiebedingten Richtungsabhaengigkeit der Holzstruktur [-]
C	Elastizitätstensor 4. Stufe in [N mm^{-2}]
$D_b T$	Diffusionstensor für gebundenes Wasser (Soret-Effekt) in [$\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$]
D_b	Diffusionstensor für gebundenes Wasser in [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]
D_b	Diffusionstensor für gebundenes Wasser in [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]
D_v	Diffusionstensor für Wasserdampf in [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]
f	Wärmefluss in [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]
J_b	Massenfluss von gebundenem Wasser in [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
J_v	Massenfluss von Wasserdampf in [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
J_w	Massenfluss von freiem Wasser in [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
K_r	relativer Durchlässigkeitstensor [-]
K_w	absoluter Durchlässigkeitstensor in [m^2]
K	Wärmeleitungstensor in [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]
\dot{c}_{bv}	Sorptionsrate von Wasserdampf zu gebundenem Wasser in [$\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$]
\dot{c}_{wb}	Sorptionsrate von freiem Wasser zu gebundenem Wasser in [$\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$]
\dot{c}_{wv}	Verdunstungs- bzw. Kondensationsrate zwischen freiem Wasser und Wasserdampf in [$\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$]
μ_w	Viskosität des Wassers in [Pa s]
ν	Querdehnungszahl [-]
ϕ_T	Wärmefluss an der freien Oberfläche in [W m^{-2}]
ϕ_v	Massenfluss des Wasserdampfs durch die freie Oberfläche in [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
ϕ_w	Massenfluss des freien Wassers durch die freie Oberfläche in [$\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
ε	Verzerrungen im Holz
ε^{el}	elastische Verzerrungen
ε^{ms}	mechano-sorptive Verzerrungen
ε^{pl}	plastische Verzerrungen
ε^{Temp}	Temperaturverzerrungen
ε^u	hygrische Verzerrungen
φ	relative Luftfeuchtigkeit [-]
c_b	Konzentration des gebundenen Wassers in [kg m^{-3}]
c_w	Konzentration des freien Wassers in [kg m^{-3}]
$c_{v,0}$	Konzentration des Wasserdampfs in der Umgebung in [kg m^{-3}]
$c_{v,sat}$	Wasserdampfkonzentration bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 %
$c_{w,0}$	Konzentration des freien Wassers in der Umgebung in [kg m^{-3}]
c_w	Wasserdampfkonzentration in [kg m^{-3}]
E	Elastizitätsmodul in [N mm^{-2}]
E_b	Aktivierungsenergie für Diffusionsvorgänge von gebundenem Wasser in [J mol^{-1}]
f_c	Druckfestigkeit in [N mm^{-2}]
f_v	Schubfestigkeit in [N mm^{-2}]

$f_{lum_{gas}}$	Volumensanteil des Gases im Zellhohlraums [-]
f_{lum}	Volumensanteil des Zellhohlraums [-]
G	Schubmodul in $[N\ mm^{-2}]$
h_v	Enthalpie von Wasserdampf in $[J\ kg^{-1}]$
h_w	Enthalpie von freiem Wasser in $[J\ kg^{-1}]$
h_b	Enthalpie des gebundenen Wassers in $[J\ kg^{-1}]$
h_v	Enthalpie des Wasserdampfs in $[J\ kg^{-1}]$
h_w	Enthalpie des freien Wassers in $[J\ kg^{-1}]$
k_T	Wärmetransportkoeffizient in $[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
k_{c_v}	Übergangskoeffizient für Wasserdampf in $[m\ s^{-1}]$
k_{c_w}	Übergangskoeffizient für freies Wasser in $[m\ s^{-1}]$
M_{H_2O}	molare Wassermasse in $[g\ mol^{-1}]$
P_C	Kapillardruck in [Pa]
P_G	Dampfdruck in [Pa]
p_{atm}	atmosphärischer Luftdruck in [Pa]
$p_{v_{air}}$	Partialdruck in den Poren in [Pa]
R	universelle Gaskonstante in $[J\ mol^{-1}\ K^{-1}]$
S_w	Sättigung des Zellhohlraums [-]
T	Temperatur in [K]
u	Holzfeuchtigkeit in [%]
$u_{f,sat}$	Holzfeuchtigkeit bei der die Zellwände vollständig mit Wasser gesättigt sind
u_{sat}	Holzfeuchtigkeit bei der die gesamte Zelle vollständig mit Wasser gesättigt ist
CLT	Brettsperrholz (Cross Laminated Timber)
HBV	Holz-Beton-Verbund

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

In Zeiten, in denen das Umweltbewusstsein und die Nachhaltigkeit einen immer höheren Stellenwert bekommen, nimmt auch die Bedeutung von Holz als Baustoff stetig zu. Im Vergleich zu anderen weit verbreiteten Materialien wie Beton und Stahl ist Holz ein natürlich gewachsener Werkstoff mit komplexem Materialverhalten. Jahresringe und Wuchsunregelmäßigkeiten wie Äste und Risse führen zu einer inhomogenen Verteilung der Holzeigenschaften. Die für die Bemessung von Bauholz notwendigen Kennwerte, wie Steifigkeiten und Festigkeiten, werden dadurch maßgebend beeinflusst.

Aber nicht nur die Inhomogenität aufgrund der Wuchsunregelmäßigkeiten hat Auswirkungen auf die Holzeigenschaften. Holz ist aufgrund seiner hygroskopischen Zellwände ein feuchteabhängiger Werkstoff weshalb auch die umgebenden Klimabedingungen und die damit in Verbindung stehende Holzfeuchtigkeit eine wesentliche Einflussgröße darstellen. Der in den Zellwänden vorhandene Feuchtegehalt steht in ständigem Austausch mit der relativen Luftfeuchtigkeit in den Zellhohlräumen, sowie der Umgebung. Die dadurch entstehenden Feuchtegradienten im Holz führen zu Änderungen in den Materialeigenschaften wie der Steifigkeit, der Festigkeit, der Dichte, der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität, dem Diffusionswiderstand und dem Langzeitverhalten (Kriechen). Außerdem führt eine Änderung des Holzfeuchtegehalts zu Volumsveränderungen im Bauteil. Nimmt Holz Feuchtigkeit auf, dehnt es sich aus und man spricht von „Quellen“. Bei Feuchteabgabe an die Umgebung kommt es zu Verkürzungen im Querschnitt. Dieser Vorgang wird als „Schwinden“ bezeichnet.

Neben den mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften ist auch die Dauerhaftigkeit durch den Feuchtegehalt im Holz beeinträchtigt. So kann es bei einer längerfristig vorhandenen hohen Holzfeuchte zu Schädlingsbefall durch Schimmelpilze und Insekten kommen.

In der *ÖNORM EN 1995-1-1* [39] wird die inhomogene Verteilung der Materialeigenschaften von Holz durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_M in der Bemessung berücksichtigt. Die zusätzlichen Einflüsse aus beispielsweise der Holzfeuchtigkeit oder Rissen werden bei der Ermittlung des Bauteilwiderstands durch Abminderungsfaktoren (k_{mod} , k_{def} , k_{cr}) berücksichtigt.

Die Dimensionen von Trägern oder Brettern aus Vollholz sind durch die Abmessungen der Baumstämme begrenzt. Diese Einschränkungen können durch Herstellen von Holzwerkstoffen übergangen werden. Die erzeugbaren Holzprodukte reichen von dünnen Platten aus verleimten Holzfasern oder Sägespänen bis zu Trägern aus gestapelten und verklebten Brettlagen oder Platten aus kreuzweise verleimten Brettlagen. Das ermöglicht die Herstellung von Bauteilen, deren Dimensionen lediglich durch die möglichen Transportgrößen limitiert sind. Werden die Holzschichten kreuzweise verleimt, wird außerdem eine Reduktion der Richtungsabhängigkeit erreicht.

Die aufgrund der Holzwerkstoffe entstandene Massivholzbauweise ermöglicht auch die Kombination von Holz und Beton zu Holz-Beton-Verbundkonstruktionen (HBV). Dabei werden die Vorteile der verwendeten Baustoffe optimal genutzt. Der Beton übernimmt die im Querschnitt auftretenden Druckspannungen, während das Holz die Zugspannungen übernimmt. Seit den 1960er Jahren wird diese Methode schon zur Sanierung von Altbaudecken verwendet. Im modernen, mehrgeschossigen Hochbau können durch die Kombination der Werkstoffe die immer größer werdenden Spannweiten überbrückt werden.

Die rechnerische Erfassung des komplexen Materialverhaltens von Holz stellt schon seit mehreren Jahren einen der Schwerpunkte am Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen der Technischen Universität Wien dar. Es wurden verschiedene numerische und analytische Modelle entwickelt mit denen beispielsweise Risswachstumsprozesse und Feuchtetransport in Holz beschrieben werden können. In dieser Arbeit soll das Simulationstool für die Änderung der Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Umgebungseinflüsse verwendet werden, um die Feuchteinteraktion zwischen Beton und Holz von HBV-Platten zu erfassen und das dadurch entstehende Feuchtefeld im Holz zu ermitteln.

1.2 Ausgangslage

Bei der Herstellung von HBV-Werkstoffen kommt es zu einem Feuchteeintrag aus dem Frischbeton ins Holz. Bei der Altbausanierung wird dies durch den Einbau einer Trennfolie in der Fuge zwischen den Werkstoffen verhindert. Außerdem kommen meist Schrauben als Schubverbindungsmittel zum Einsatz. Beim Neubau hingegen wird der Schubverbund zwischen Beton und Holz meist über eingeklebte Schubleche oder formschlüssig durch das Einfräsen von Kernen hergestellt. Das Verlegen einer Trennfolie ist bei diesen Methoden mit einem erheblichen Arbeitsaufwand verbunden.

In der Fachliteratur liegen über die Notwendigkeit einer Trennschicht unterschiedliche Meinungen vor. Befürworter fürchten kritische Feuchtezustände aufgrund des Anmachwassers des Frischbetons. Dem gegenüber stehende Versuchsmessungen zeigen allerdings, dass sich die Durchfeuchtung im Holz auf die ersten Millimeter des Holzkörpers beschränkt [43]. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt sind die Eigenschaften und die Tragfähigkeit von Holz stark von der vorliegenden Holzfeuchtigkeit abhängig.

1.3 Problemstellung

In dieser Arbeit wird ein Ausschnitt eines Brettsperrholz-Elements (engl. „cross laminated timber“, CLT) im Kernenbereich einer Verbundplatte modelliert. Der Feuchteeintrag aus dem Beton ins Holz wird basierend auf den Versuchen in [32] nachgestellt. Anschließend wird der CLT-Plattenausschnitt an der Unterseite mit mehreren zweijährigen Innenklimaverläufen beansprucht. Aufgrund des starken Saugverhaltens in Faserlängsrichtung stellt die offene Stirnfläche den kritischsten Bereich für die Feuchteaufnahme dar. Deshalb werden zusätzlich zum Modell mit völlig ungehindertem Feuchteeintrag aus dem Beton Konfigurationen mit lokalen Versiegelungen im an der Stirnfläche der Kerne betrachtet. Das Feuchtefeld in der Holz-Beton-Verbundplatte soll mit Hilfe des von Eitelberger [11] und Autengruber et al. [3] entwickelten numerischen Simulationstool für Feuchtetransport ermittelt werden.

Die Ergebnisse sollen zeigen, ob es durch das Aufbringen von nassem Beton sowohl lokal als auch im gesamten Bauteil zu kritischen Feuchtezuständen im Holz kommen kann. Sofern dies der Fall ist sollen etwaige Auswirkungen auf die Tragfähigkeit beurteilt werden. Außerdem sollen die Berechnungen Aufschluss darüber geben, wie sich die ins Holz eingedrungene Betonfeuchte über einen längeren Zeitraum verhält und ob das Entweichen dieser durch das Innenklima an der Unterseite der Platte beeinflusst wird. Durch den Vergleich zwischen den versiegelten und unversiegelten Modellen soll eine Aussage dazu getroffen werden ob die lokale Versiegelungen im Werk eventuell eine Alternative zu einer Trennschicht darstellen kann.

1.4 Gliederung der Arbeit

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Nach der anfänglichen Einleitung in diesem Abschnitt werden im Kapitel 2 die mechanischen und hygrischen Eigenschaften von Holz, Beton und Holz-Beton-Verbundkörpern beschrieben. Die Implementierung der, im Abschnitt für Holz eingeführten, beschreibenden Differentialgleichungen des kombinierten Feuchte- und Energietransports in Holz in die Finite-Elemente-Methode nach [11] und [3] erfolgt in Kapitel 3. In Kapitel 4 werden die verwendeten Modelle für die Feuchtesimulation beschrieben. Es wird dabei auf die Vorgehensweise zur Ermittlung der erforderlichen Materialparameter und Randbedingungen für das Simulationstool eingegangen. Die Randbedingung an der Oberseite der CLT-Platte in der Fuge wird anhand der Versuchsergebnisse in [32] kalibriert. Kapitel 5 beinhaltet die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse aus den Berechnungen. Es werden die Feuchteverläufe, die sich in den Modellen einstellen, beschrieben und untersucht. Die Modelle mit und ohne Versiegelung im Kernenbereich werden miteinander verglichen. In Kapitel 6 wird schlussendlich eine Zusammenfassung über alle gewonnenen Erkenntnisse aus den Simulationsergebnissen gegeben.



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

Kapitel 2

Eigenschaften der Materialien

2.1 Holz

Holz ist ein natürlich gewachsener Baustoff und besitzt dadurch ein inhomogenes Materialverhalten. Materialeigenschaften wie die Steifigkeit und die Festigkeit sind stark richtungsabhängig und werden zusätzlich durch Wuchsunregelmäßigkeiten und Störzonen wie beispielsweise Äste beeinflusst. Die Kontinuumsmechanik beschreibt Holz als einen orthotropen Werkstoff [27]. Die drei Materialhauptrichtungen orientieren sich an der Faserrichtung und den Jahresringen im Baumstamm. Zur Abbildung der Hauptrichtungen wird ein zylindrisches Koordinatensystem, dessen Achsrichtungen in longitudinaler (L), radialer (R) und tangentialer (T) Richtung verlaufen, verwendet (siehe Abbildung 2.1).

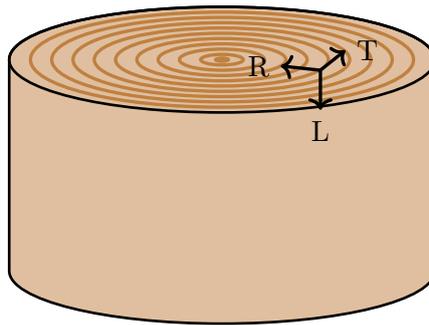


Abb. 2.1: Anatomische Hauptrichtungen von Holz

Holz steht in ständiger Wechselwirkung mit der Umgebungsluft und strebt ein Gleichgewicht zwischen dem Holzfeuchtegehalt und der relativen Luftfeuchtigkeit an. Neben der Wuchsrichtung beeinflussen auch Schwankungen der Holzfeuchtigkeit die mechanischen Eigenschaften. Zusätzlich führen die Feuchteänderungen zu Verzerrungen in Form von Quellen und Schwinden, welche aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten in den Materialrichtungen unterschiedlich ausfallen [5], [34]. Um das Trag- und Verformungsverhalten eines Holzbauteils beschreiben zu können, ist die Kenntnis der vorliegenden Holzfeuchtigkeit daher wesentlich.

2.1.1 Mechanische Eigenschaften

Die Verzerrungen des Werkstoffes Holz können, laut Blaß und Sandhaas [5], in folgende Anteile zerlegt werden:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^u + \varepsilon^{creep} + \varepsilon^{ms} + \varepsilon^{Temp}, \quad (2.1)$$

mit:

- ε^{el} ...elastische Verzerrungen
- ε^{pl} ...plastische Verzerrungen

- ε^u ...hygrische Verzerrungen (Quellen und Schwinden)
- ε^{creep} ...Verzerrungen zufolge Kriechen
- ε^{ms} ...mechano-sorptive Verzerrungen (Kriechen zufolge veränderliche Holzfeuchte)
- ε^{Temp} ...Temperaturverzerrungen.

Zusätzlich zur Belastung sind die Holzdeformationen stark von der Holzfeuchtigkeit abhängig. Insbesondere auf die Langzeitdeformationen hat diese Abhängigkeit einen deutlichen Einfluss [41]. Über die hygrischen Verzerrungen ε^u und die mechano-sorptiven Verzerrungen ε^{ms} wird der direkte Feuchteinfluss berücksichtigt. Aber auch die Kriechverzerrungen ε^{creep} und die Temperaturverzerrungen ε^{Temp} sind abhängig vom Feuchtegehalt im Holz.

Den allgemeinen Zusammenhang zwischen den Spannungen σ und den Verzerrungen ε liefert das *Hooke'sche Gesetz*

$$\sigma = C : \varepsilon, \quad (2.2)$$

wobei C den Elastizitäts- oder Materialsteifigkeitstensor bezeichnet. Es handelt sich dabei um einen Tensor 4. Stufe, durch welchen das linear-elastische Werkstoffverhalten beschrieben wird. Durch Invertieren von C erhält man den Materialnachgiebigkeitstensor D .

Setzt man die drei orthogonal zueinander stehenden Materialhaupttrichtungen als Basisvektoren in das *Hook'sche Gesetz* für anisotrope Werkstoffe ein, erhält man das verallgemeinerte *Hook'sche Gesetz* für orthotrope Werkstoffe [27]:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & 4D_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & 4D_{2323} & 0 \\ \text{symm.} & & & & & 4D_{3131} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Die neun Unbekannten des Materialnachgiebigkeitstensors D können mittels neun unabhängigen Materialkennwerten ermittelt werden:

- 3 Elastizitätsmoduln (E_L, E_R, E_T)
- 3 Schubmoduln (G_{LT}, G_{LR}, G_{RT})
- 3 Querdehnungszahlen ($\nu_{LT}, \nu_{LR}, \nu_{RT}$)

2.1.2 Feuchtigkeit

Aufgrund des anatomischen Aufbaues von Holz handelt es sich um einen kapillarporösen Werkstoff. Der Porenraum, welcher abhängig von der Rohdichte des Holzes zwischen 50% und 70% liegen kann, bewirkt eine sehr große innere Oberfläche, über die ein Feuchteausaustausch mit der Umgebungsluft erfolgen kann. Feuchtigkeit im Holz kann in drei Formen auftreten. Zum einen interagiert der Werkstoff mit der ihn umgebenden Luftfeuchtigkeit, welche in Form von gebundenem „hygroskopischem“ Wasser sowie in Form von Wasserdampf eingelagert werden kann. Andererseits kann freies Wasser durch die Kapillarwirkung in das Holz eindringen und in den Zellhohlräumen eingelagert werden [5]. Somit ergeben sich folgende drei Arten von Wasser im Holz:

- gebundenes Wasser in der Zellwand

- Wasserdampf im Lumen
- freies Wasser im Lumen

Unter der Holzfeuchtigkeit u wird nach Gleichung (2.4) das Verhältnis zwischen der Masse des im Holz vorhandenen Wassers m_w und der darrtrockenen Holzmasse m_d verstanden. Die vorhandene Wassermasse m_w ergibt sich dabei aus der Differenz zwischen der Masse des feuchten Holzes m_f und der darrtrockenen Holzmasse m_d [44].

$$u = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_f - m_d}{m_d} \quad (2.4)$$

Blaß und Sandhaas [5] geben folgende drei wichtige Grenzwerte der Holzfeuchte an:

- Darrtrocken: $u = 0\% \Rightarrow$ Im Holz ist kein Wasser vorhanden
- Fasersättigungspunkt: $u = u_{f,sat} \approx 30\% \Rightarrow$ Zellwände sind vollständig mit Wasser gefüllt
- Wassersättigung: $u = u_{sat} \approx 160 - 190\% \Rightarrow$ Zellwände und Hohlräume sind vollständig mit Wasser gefüllt

Im Vergleich zu anderen Werkstoffen hängen das Verformungsverhalten von Holz sowie wichtige Eigenschaften, wie die Festigkeit, die Steifigkeit, die Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit, neben der Temperatur auch stark vom Feuchtegehalt ab. Außerdem besteht bei Holzfeuchten über 20 % ein erhöhtes Risiko für Pilzbefall [5].

Das verallgemeinerte *Hook'sche Gesetz* für orthotrope Werkstoffe aus Gleichung (2.3) lässt sich unter der Berücksichtigung von Temperatur- und Feuchteausdehnungen wie folgt formulieren:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & 4D_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & 4D_{2323} & 0 \\ \text{symm.} & & & & & 4D_{3131} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_1 \Delta T + \beta_1 \Delta m \\ \alpha_2 \Delta T + \beta_2 \Delta m \\ \alpha_3 \Delta T + \beta_3 \Delta m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Die Verzerrungen zufolge Temperaturänderungen ΔT werden durch die Wärmeausdehnungskoeffizienten α_i berücksichtigt. Nach Neuhaus [34] werden die Dehnungen zufolge Quellen und Schwinden formal äquivalent zu denen infolge einer Temperaturänderung mittels eines Feuchteausdehnungskoeffizienten β_i eingeführt. Laut Mang und Hofstetter [27] können die einzelnen Verzerrungsanteile (Spannungen, Temperaturänderung, Feuchteänderung) superponiert werden.

2.1.2.1 Einfluss der Holzfeuchte auf die Holzeigenschaften

Aufgrund der Schwankungen der Holzfeuchte in Abhängigkeit vom Umgebungsklima entstehen unterhalb des Fasersättigungspunktes Änderungen des Holzvolumens. Dementsprechend ist die Holzdicke feuchteabhängig und muss für Holzwerkstoffe stets bei einem bestimmten Klima angegeben werden. Die Dichte wiederum beeinflusst fast alle wichtigen Holzeigenschaften. Somit sind auch die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holzwerkstoffen wesentlich von der vorherrschenden Holzfeuchte abhängig [5]. Nach Neuhaus [34] nehmen sowohl die Festigkeiten als auch die Steifigkeiten von Holzwerkstoffen mit zunehmender Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich ab.

Steifigkeiten

Gerhards [16] verglich Daten aus der Literatur zum direkten Einfluss von Holzfeuchte und -temperatur auf verschiedene mechanische Eigenschaften von Holz. Er unterschied dabei zwischen dem E-Modul in Faserrichtung E_L und orthogonal zur Faserrichtung E_R und E_T . Die Ergebnisse zeigen einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Holzfeuchtigkeit und den elastischen Eigenschaften. Mit zunehmender Holzfeuchte lagert sich nach [41] Wasser im Holz ein, wodurch die Mikrofibrillen auseinandergedrückt werden und die Steifigkeiten abnehmen.

Ausgehend von einer Holzfeuchtigkeit von $u = 12\%$ steigt nach den Vergleichen in [16] E_L zum darrtrockenen Zustand hin um ca. 10% an bzw. fällt bis zum Fasersättigungspunkt um etwa 20% ab. E_R und E_T reagieren etwas stärker auf Feuchteänderungen. Im darrtrockenen Zustand erhöhen sich die Werte um 20% und um den Fasersättigungspunkt liegen sie etwa 30% unter dem Ausgangswert.

Festigkeiten

Im Vergleich zu den Steifigkeitseigenschaften wirken sich Schwankungen in der Holzfeuchtigkeit auf die diversen Festigkeitsparameter von Holz wesentlich stärker aus. Im Allgemeinen steigt die Festigkeit im Holz bei Feuchteaufnahme, ausgehend von einer Holzfeuchtigkeit von $u = 12$, zu Beginn kurz an und fällt dann, bis der Fasersättigungspunkt erreicht ist, deutlich ab [41].

Da sich diese Arbeit mit dem Verbindungsmittel „Kerbe“ in HBV-Platten (Kapitel 2.3) beschäftigt, sind vor allem deren maßgebenden Festigkeiten von Interesse. In [43] werden als die beiden möglichen Versagensmechanismen im Holz das Abscheren des Vorholzes sowie das Überschreiten der Druckfestigkeit in der Kervenflanke genannt. Dementsprechend sind die Schub- und Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von großer Bedeutung.

Die Vergleiche in [16] zeigen, dass die Druckfestigkeit parallel zur Faser wesentlich stärker auf Feuchteänderungen reagiert als beispielsweise die Zugfestigkeit. Ausgehend von einer Holzfeuchte von $u = 12\%$ steigt die Druckfestigkeit $f_{c,L}$ um 70-80% im darrtrockenen Zustand und fällt um 50-60% in der Nähe des Fasersättigungspunktes. Die Schubfestigkeit parallel zur Faser $f_{v,L}$ zeigt

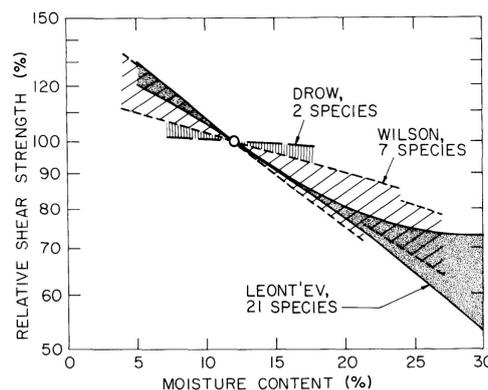


Abb. 2.2: Änderung der Schubfestigkeit parallel zur Faser über den hygroscopischen Bereich aus [16]

ebenfalls eine starke Abhängigkeit von der Holzfeuchte. Im darrtrockenen Zustand ist sie um 20-40% höher und am Fasersättigungspunkt um 25-45% niedriger als bei der Ausgleichsfeuchte von $u = 12\%$ [16]. In Abbildung 2.2 ist die Änderung der Schubfestigkeit über den hygroscopischen Bereich dargestellt. Die Untersuchungen in [45] zeigen, dass die Schubfestigkeit rechtwinklig zur Faser kaum auf Änderungen der Holzfeuchte reagiert.

2.1.2.2 Quellen und Schwinden

Die Verformungen zufolge Feuchteänderungen werden als Quellen und Schwinden bezeichnet. Quellen beschreibt dabei das Ausdehnen des Werkstoffes bei Wasseraufnahme, Schwinden das Zusammenziehen bei Wasserabgabe [8]. Als Ursache dieses Materialverhaltens nennen Blaß und Sandhaas [5] die Ausdehnung bzw. Kontraktion der Zellwände, welche Wasser einlagern oder abgeben können. Über dem Fasersättigungspunkt findet die Wasseraufnahme nur mehr in den Zellhohlräumen in Form von freiem Wasser statt. Quellen und Schwinden beschränken sich daher auf einen Holzfeuchtegehalt unterhalb des Fasersättigungspunktes im hygroskopischen Bereich.

Die Quell- und Schwindeigenschaften von Holz sind in Radial-, Tangential- und Längsrichtung unterschiedlich. Während die Verformung und in weiterer Folge das Schwind- und Quellmaß für Fichtenholz laut Colling [6] in Längsrichtung mit 0,01 % je % Feuchteänderung Δu sehr gering ist, schwindet bzw. quillt Holz in Tangentialrichtung mit 0,32 % pro % Δu ca. doppelt so stark wie in Radialrichtung mit 0,16 % pro % Δu . Das in Österreich gültige nationale Anwendungsdokument [35] des Eurocode 5 [39] fasst hingegen das Schwind- bzw. Quellmaß für die Radial- und Tangentialrichtung in ein Maß rechtwinklig zur Faserrichtung mit 0,24 % pro % Δu zusammen.

Die Herstellung von Holzwerkstoffen dient unter anderem der Homogenisierung des orthotropen Werkstoffverhaltens von Vollholz. Durch die beispielsweise kreuzweise Verleimung der Brettlagen hindern sich die Bretter (Lamellen) gegenseitig in den, durch Feuchteänderungen hervorgerufenen, Verformungen. In CLT-Platten fallen dadurch die Quell- und Schwinddeformationen in Plattenebene in beiden Richtungen sehr gering aus. Quer zur Plattenebene ist der Feuchteinfluss deutlich größer. Dank der verhältnismäßig geringen Plattendicke sind die Verformungen jedoch meist vernachlässigbar [34]. In Gereke et al. [15] werden dreilagige, kreuzweise verleimte Brettsperrholzplatten auf feuchteinduzierte Spannungen untersucht. Neben den verbesserten mechanischen Eigenschaften und der verringerten Feuchteverformung durch die kreuzweise Verleimung, zeigen die Ergebnisse, dass aufgrund der Verformungsbehinderung zwischen den Lamellen innere Spannungen im Holzquerschnitt auftreten können [15]. Wird dabei die Holzfestigkeit überschritten, können in den Randbereichen Risse entstehen [8].

2.1.2.3 Feuchtetransport im Holzkörper

In Abbildung 2.3 sind die möglichen Feuchtigkeitszustände in einer Holzzelle schematisch dargestellt. Unmittelbar nach dem Fällen beginnt das Holz zu trocknen. Dabei entweicht zuerst das freie Wasser aus den Zellhohlräumen bis der Fasersättigungspunkt $u_{f,sat}$ erreicht ist [52]. Er beschreibt jenen Zustand in dem die Zellwände vollständig gesättigt sind und das freie Wasser vollständig aus den Zellholrräumen entwichen ist [44].

Ist die Holzfeuchte niedriger als der Fasersättigungspunkt, liegt sie nur mehr in Form von gebundenem Wasser vor [52]. Dieses ist durch Wasserstoffbrückenbindungen und Van-der-Waals-Kräfte an die Zellwände gebunden, weshalb mehr Energie für den Wasseraustritt erforderlich ist. Das gebundene Wasser beginnt sich deshalb erst aus den Zellwänden zu lösen, nachdem der Fasersättigungspunkt unterschritten ist [5].

Ist auch das gebundene Wasser vollständig aus dem Holz entwichen, liegt der darrtrockene Zustand mit einer Holzfeuchte von $u = 0\%$ vor.

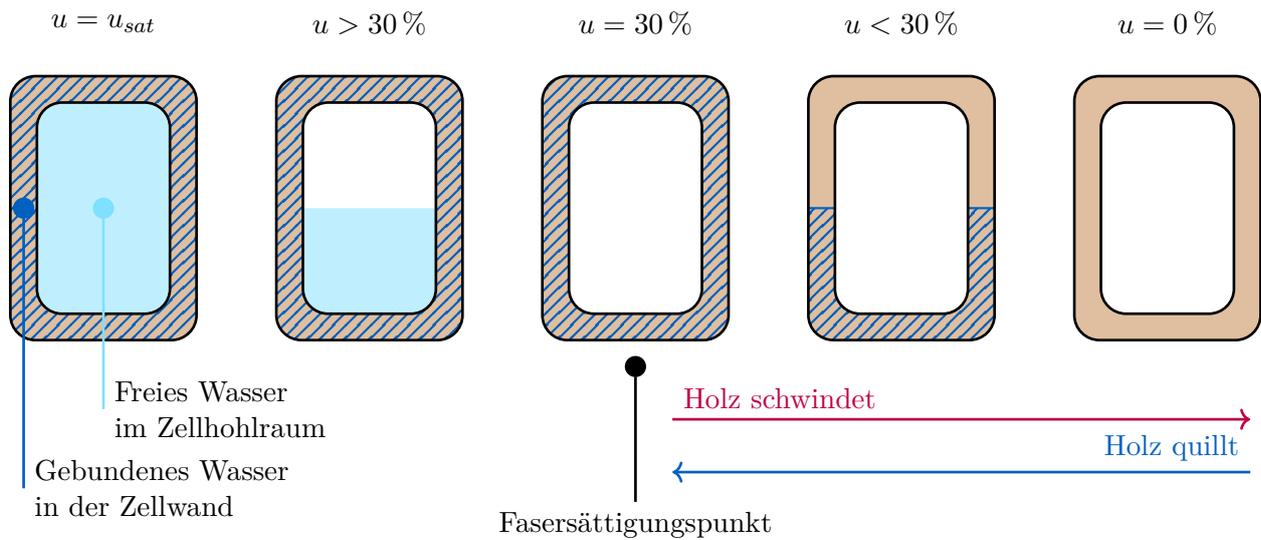


Abb. 2.3: Wasserabgabe und -aufnahme der Holzzelle [52]

Der Fasersättigungspunkt teilt die, im Holz auftretenden, Feuchtezustände demnach in zwei Bereiche auf. Der „hygroskopische Bereich“ ist durch gebundenes Wasser in den Zellwänden und Wasserdampf in den Zellhohlräumen charakterisiert. Tritt eine Variation des Sättigungsgrads der Holzfasern auf, kommt es zu Volumenänderungen in Form von Quellen und Schwinden (siehe Kapitel 2.1.2.2). Außerdem hat eine Änderung der Holzfeuchte in diesem Bereich Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeiten, Steifigkeiten, Kriechverformungen und Wärmeleitfähigkeit (siehe Kapitel 2.1.2.1) [34].

Im hygroskopischen Bereich strebt Holz stets nach einem Gleichgewicht zwischen der Holzfeuchte und der relativen Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft. Ist dieser Zustand erreicht wird der vorliegende Feuchtegehalt im Holz als „Gleichgewichtsfeuchte“ bezeichnet. Neben der relativen Luftfeuchtigkeit ist diese auch von auftretenden mechanischen Spannungen, der Trocknungsgeschichte, der Holzart und der Temperatur abhängig [44].

Sind die Holzfasern vollständig gesättigt, beginnt der „kapillare Bereich“. Da die Zellwände nicht mehr wasseraufnahmefähig sind, kann Feuchtigkeit nur mehr in Form von freiem Wasser in den Zellhohlräumen eingelagert werden [34]. Aufgrund der vollständigen Sättigung der Zellwände und der schwachen Bindung des freien Wassers durch die Kapillarkräfte, bewirkt eine Variation der Holzfeuchte in diesem Bereich keine Änderungen des Volumens oder der mechanischen Holzeigenschaften [44].

Nach Kollmann [22] kann freies Wasser in den Zellhohlräumen schon auftreten bevor die Zellwände vollständig gesättigt sind. Der Fasersättigungspunkt ist demnach nur ein theoretischer Begriff, da sich keine scharfe Grenze zwischen „hygroskopischem“ und „kapillarem Bereich“ ziehen lässt. Viel mehr verschmiert sich diese zu einem „Fasersättigungsbereich“. Blaß und Sandhaas [5] geben diesen Übergangsbereich in Abhängigkeit von der Holzart zwischen einem Feuchtegehalt von 25 % und 35 % an. Im Mittel kann vereinfacht ein Fasersättigungspunkt bei einer Holzfeuchtigkeit von 30 % angenommen werden [44].

2.1.2.4 Transportprozesse innerhalb der Holzzelle

Der Feuchtetransport in Holz unterhalb des Fasersättigungspunktes wird durch Diffusion beschrieben. Dabei handelt es sich um den Ausgleich von Konzentrationsgradienten durch Teilchenbewegungen zur kleineren Feuchtekonzentration hin. Der Diffusionsprozess wird mit den Diffusionskoeffizienten beschrieben [41].

Im hygroskopischen Bereich treten zwei Formen des Feuchtetransports in einer Holzzelle auf:

- Diffusion von Wasserdampf in den Zellhohlräumen und
- Diffusion von gebundenem Wasser in den Zellwänden.

Bei Konzentrationsunterschieden zwischen dem gebundenen Wasser in der Zellwand und dem Wasserdampf im Lumen besteht das Bestreben nach Gleichgewicht. Dadurch kommt es zur Wasseraufnahme (Adsorption) oder -abgabe (Desorption) in den Zellwänden in Form von Sorption. Die beiden Diffusionsprozesse in den Zellwänden und den -hohlräumen sind somit über die Sorptionsrate \dot{c}_{bv} miteinander gekoppelt (siehe Kapitel 2.1.3.3) [12]. In Abbildung 2.4 sind die beschriebenen Transportvorgänge innerhalb mehrerer Holzzellen unterhalb des Fasersättigungspunktes dargestellt. Der Wasserdampf im Lumen kann über Adsorption in die Zellwände aufgenommen werden. Dort kann sich das gebundene Wasser über Diffusion weiter ausbreiten. Über Diffusion kann die Feuchtigkeit wieder in Form von Wasserdampf in den Zellhohlraum wandern, wo sie anschließend weitertransportiert werden kann.

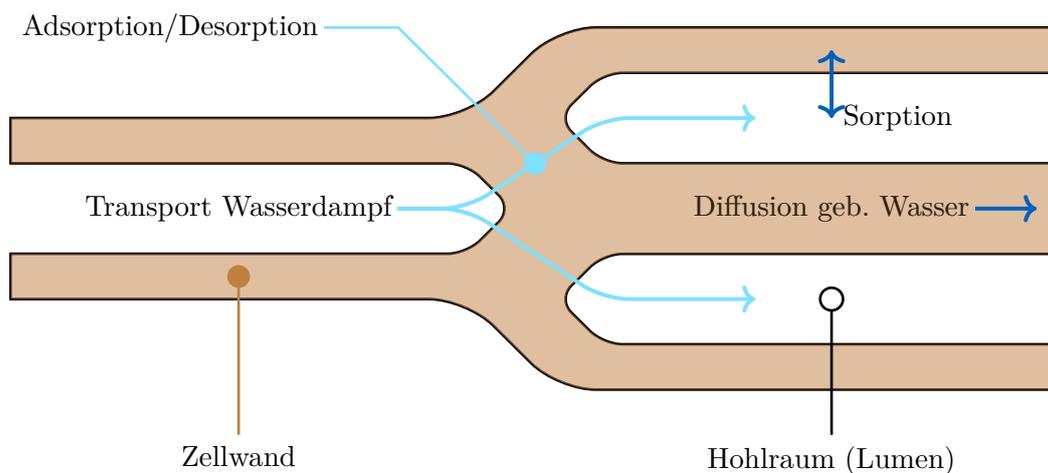


Abb. 2.4: Darstellung des Feuchtetransports in der Holzzelle aus Krabbenhoft und Damkilde [23]

Ist der Fasersättigungspunkt erreicht, kann kein gebundenes Wasser mehr aufgenommen werden und die Wasserdampfkonzentration in den Zellhohlräumen entspricht der Sättigungskonzentration $c_{v,sat}$. Bei Kontakt mit flüssigem Wasser kann über die Kapillarwirkung in den Zellhohlräumen freies Wasser aufgenommen werden. Sind die Poren vollständig mit Wasser gefüllt, wird dieser Zustand als Wassersättigung bezeichnet [41].

Der Massenfluss innerhalb der Holzzelle wird über die Tensoren \mathbf{J}_v für den Wasserdampf, \mathbf{J}_b für das gebundene Wasser und \mathbf{J}_w für das freie Wasser beschrieben. Die drei beschreibenden Differentialgleichungen (2.9) bis (2.11), welche in Kapitel 2.1.3 eingeführt werden, sind über folgende Terme miteinander verknüpft:

- \dot{c}_{wb} ... Sorption von freiem Wasser zu gebundenem Wasser

- \dot{c}_{bv} ... Sorption von Wasserdampf zu gebundenem Wasser
- \dot{c}_{wv} ... Verdunstung bzw. Kondensation zwischen freiem Wasser und Wasserdampf

Auf die Interaktion zwischen den Wasserphasen über die Sorptionsraten \dot{c}_{bv} , \dot{c}_{wv} und \dot{c}_{wb} wird in den Kapiteln 2.1.3.3 bis 2.1.3.5 näher eingegangen. In Abbildung 2.5 ist die Interaktion in der Holzzelle grafisch dargestellt.

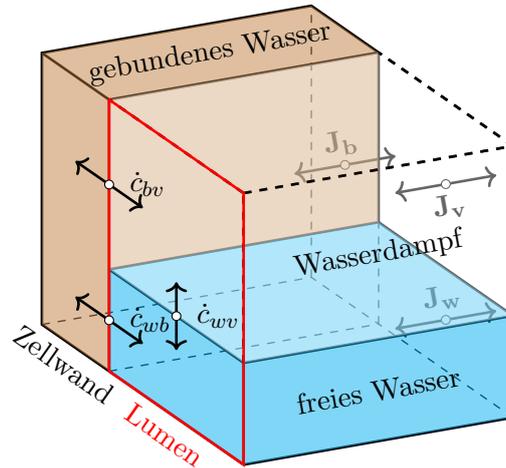


Abb. 2.5: Interaktion zwischen Wasserdampf, gebundenem Wasser und freiem Wasser

2.1.3 Transportmodelle

Die Beschreibung der in der Holzzelle stattfindenden Diffusionsprozesse kann mit Hilfe der *Fick'schen Gesetze* erfolgen. Die Massenstromdichte \mathbf{J} in $[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ wird über das *erste Fick'sche Gesetz* durch den Diffusionskoeffiziententensor \mathbf{D} und der Feuchtekonzentration c in stationärer Form definiert [41]:

$$\mathbf{J} = -\mathbf{D} \cdot \frac{\partial c}{\partial \mathbf{x}}. \quad (2.6)$$

Mit der Massenstromdichte \mathbf{J} wird jene Wassermenge beschrieben, die sich pro Zeiteinheit durch eine Fläche orthogonal zur Diffusionsrichtung hindurchbewegt [10]. Das Massenerhaltungsgesetz (2.7) fordert ein Gleichgewicht zwischen den, in ein Kontrollvolumen ein- und ausströmenden, Feuchteströmen sowie der Konzentrationsänderung im Volumen.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{x}} \quad (2.7)$$

Einsetzen von Gleichung (2.6) in das Massenerhaltungsgesetz (2.7) liefert die Diffusionsgleichung nach dem *zweiten Fick'schen Gesetz* in transienter Form:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \left(\mathbf{D} \cdot \frac{\partial c}{\partial \mathbf{x}} \right). \quad (2.8)$$

In Frandsen und Svensson [13] sowie Krabbenhoft und Damkilde [23] wird ein Multi-Fick'scher Ansatz zur Beschreibung des Diffusionsprozesses in der Holz-Zelle vorgestellt. Die Diffusionsvorgänge in den Zellwänden und den Poren werden darin jeweils über das *Fick'sche Gesetz* in einer separaten Gleichung beschrieben. Autengruber et al. [3] erweitern diesen Ansatz um den Anteil des freien Wassers in den Poren. Die resultierenden Differentialgleichungen für den Massenerhalt sehen wie folgt aus:

Massenerhaltung gebundenes Wasser:

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J}_b - \dot{c}_{bv} - \dot{c}_{wb} \quad (2.9)$$

Massenerhaltung Wasserdampf:

$$\frac{\partial c_v \cdot f_{lum_{gas}}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J}_v \cdot f_{lum_{gas}} + \dot{c}_{bv} - \dot{c}_{wv} \quad (2.10)$$

Massenerhaltung freies Wasser:

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J}_w + \dot{c}_{wb} + \dot{c}_{wv} \quad (2.11)$$

Um den Wärmestrom im Holz zu berücksichtigen, werden die Massenerhaltungsgleichungen (2.10) bis (2.11) um eine Energieerhaltungsgleichung nach Gleichung (2.12) erweitert.

Energieerhaltung:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \cdot h}{\partial t} = & + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{f} \\ & - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J}_b \cdot \bar{h}_b - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J}_v \cdot h_v \cdot f_{lum_{gas}} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{J}_w \cdot h_w \\ & + \dot{c}_{bv} \cdot (h_v - h_b) + \dot{c}_{wb} \cdot (h_w - h_b) + \dot{c}_{wv} \cdot (h_w - h_v) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Der Wärmefluss wird darin über den Tensor \mathbf{f} beschrieben, \bar{h}_b ist die gemittelte Enthalpie des gebundenen Wassers und h_v bzw. h_b beschreiben die spezifische Enthalpie des Wasserdampfes bzw. des gebundenen Wassers. Die Energieerhaltungsgleichung beschreibt beispielsweise auch die Verdampfungskälte, weshalb die Sorptions- und Verdunstungs-/Kondensationsterme in Gleichung (2.12) ebenfalls enthalten sein müssen. Es ergibt sich für die Beschreibung der Transportvorgänge im Holz schlussendlich ein Differentialgleichungssystem, bestehend aus vier miteinander gekoppelten Differentialgleichungen. Die Implementierung des gekoppelten Differentialgleichungssystems in die Finite-Elemente-Methode erfolgt im Kapitel 3.

2.1.3.1 Beschreibung der Materialparameter

Um die gekoppelten Differentialgleichungen (2.9) bis (2.12) lösen zu können, müssen die Massen- und Wärmeflusstensoren \mathbf{J}_b , \mathbf{J}_v , \mathbf{J}_w sowie \mathbf{f} bestimmt werden.

Gebundenes Wasser

Der Massenfluss des gebundenen Wassers wird über den folgenden Transportvorgang beschrieben [3]:

$$\mathbf{J}_b = -\mathbf{D}_b \cdot \frac{\partial c_b}{\partial x} - \mathbf{D}_{bT} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.13)$$

mit

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_b &= \mathbf{D}_0 \cdot \exp\left\{\frac{-E_b}{R \cdot T}\right\}, \\ \mathbf{D}_{bT} &= \mathbf{D}_0 \cdot \frac{c_b \cdot E_b}{R \cdot T^2} \cdot \exp\left\{\frac{-E_b}{R \cdot T}\right\} \text{ und} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$E_b = 38500 - 29000 \cdot \frac{c_b}{\rho_d}. \quad (2.15)$$

Im ersten Term der Gleichung (2.13) wird der Massenfluss des gebundenen Wassers im isothermalen Fall beschrieben, welcher durch den Gradienten der Konzentration des gebundenen Wassers c_b hervorgerufen wird [3]. Der Diffusionstensor \mathbf{D}_b nach Gleichung (2.14) berechnet sich über die Aktivierungsenergie für Diffusionsvorgänge von gebundenem Wasser E_b nach Gleichung (2.15), die universelle Gaskonstante R ($8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$) und die Temperatur T in [K].

Der zweite Term in Gleichung (2.13) beschreibt den Massenfluss des gebundenen Wassers, hervorgerufen durch einen thermalen Gradienten, über den gekoppelten Diffusionstensor \mathbf{D}_{bT} und berücksichtigt somit den sogenannten Soret-Effekt [3]. \mathbf{D}_{bT} ist im Vergleich zu \mathbf{D}_b zusätzlich von der Konzentration des gebundenen aktivierten Wassers abhängig.

Die Orthotropierichtungen werden in \mathbf{D}_b und \mathbf{D}_{bT} über den Tensor \mathbf{D}_0 wie folgt berücksichtigt:

$$\mathbf{D}_0 = \begin{bmatrix} 2,5 \cdot 7 \cdot 10^{-6} & & \\ & 7 \cdot 10^{-6} & \\ & & 7 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}_{LRT}. \quad (2.16)$$

Wasserdampf

Der Massenfluss von Wasserdampf ist über den Gradienten der Wasserdampfkonzentration c_v definiert [3]:

$$\mathbf{J}_v = -\mathbf{D}_v \cdot \frac{\partial c_v}{\partial x}. \quad (2.17)$$

Die Definition der Diffusion erfolgt nach dem ersten Fick'schen Gesetz [3]:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_v &= \xi \cdot \left(2,31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p_{atm}}{p_{atm} + p_{v_{air}}} \cdot \left\{ \frac{T}{273} \right\}^{1,81} \right) \text{ mit} \\ p_{v_{air}} &= c_v \cdot \frac{R \cdot T}{M_{H_2O}}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Der Diffusionstensor für Wasserdampf \mathbf{D}_v ist vom Partialdruck in den Poren $p_{v_{air}}$ in [Pa], dem atmosphärischen Luftdruck $p_{atm} = 101325$ [Pa] und der Temperatur T in [K] abhängig.

Tab. 2.1: Diagonaleinträge von \mathbf{K}_w und \mathbf{K}_r nach [40]

Parameter	Faserrichtung		
	L	R	T
\mathbf{K}_w	$1 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-15}$
\mathbf{K}_r	S_w^8	S_w^3	S_w^3

Der Partialdruck in den Poren $p_{v_{air}}$ errechnet sich über die Konzentration des Wasserdampfes c_v , der universellen Gaskonstante R in $[\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}]$, der Temperatur T in $[\text{K}]$ und der molaren Wassermasse M_{H_2O} in $[\frac{\text{g}}{\text{mol}}]$. Dem Diffusionsprozess liegt die Annahme zugrunde, dass die Diffusion in den Poren analog zum Diffusionsvorgang in reiner Luft stattfindet. Die orthotropiebedingte Richtungsabhängigkeit der hölzernen Zellstruktur wird über die Matrix ξ berücksichtigt. Es handelt sich um eine Diagonalmatrix mit den Einträgen $\xi_L = 0.9$ und $\xi_R = \xi_T = 0.11$ nach Autengruber et al. [3].

Freies Wasser

Die Definition des Flusses von freiem Wasser im Holz erfolgt nach dem *Darcy'schen Gesetz*. Über die Differenz des Dampfdrucks P_G und des Kapillardrucks P_C ergibt sich der Massenfluss zu

$$\mathbf{J}_w = -\rho_w \cdot \frac{\mathbf{K}_r \cdot \mathbf{K}_w}{\mu_w} \cdot \frac{\partial P_G - P_C}{\partial x}, \quad (2.19)$$

mit der absoluten Durchlässigkeit \mathbf{K}_w und der relativen Durchlässigkeit \mathbf{K}_r . Die Einträge der Diagonalmatrizen sind in Tabelle 2.1 angeführt. In [47] wird die Viskosität des Wassers μ_w in Abhängigkeit der Temperatur T mit

$$\mu_w = 2,414 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{2478}{T-140}} \quad (2.20)$$

berechnet. Gleichung (2.21) beschreibt den Kapillardruck P_C aus [46], welcher von der Sättigung des Zellhohlraums mit freiem Wasser S_w abhängig ist:

$$P_C = 12400 \cdot S_w^{-0.61}, \quad (2.21)$$

mit

$$S_w = \frac{c_w}{f_{lum} \cdot \rho_{H_2O}}. \quad (2.22)$$

Der Volumsanteil des Zellhohlraums berechnet sich in Abhängigkeit der Konzentration des gebundenen Wassers nach Gleichung (2.23). Die darin vorkommende Dichte des Zellmaterials ρ_{cwm} liegt ungefähr bei $1530 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$ [3].

$$f_{lum} = 1 - \left(\rho_d \cdot \frac{1 + \frac{c_b}{\rho_d}}{1 + 0,84 \cdot c_b} \right) \cdot \frac{1}{\rho_{cwm}} \quad (2.23)$$

Jener Volumsanteil des Zellhohlraums, der nicht mit freiem Wasser gefüllt ist, enthält ein Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf c_v . Er kann wie folgt ermittelt werden:

$$f_{lum_{gas}} = f_{lum} \cdot (1 - S_w) \quad (2.24)$$

Wärmeleitung

Wärmetransport in Form von Konduktion entsteht durch einen Temperaturgradienten und ist in Gleichung (2.25) beschrieben [3].

$$\mathbf{f} = -\mathbf{K} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.25)$$

Der Wärmeleitungstensor \mathbf{K} ist nach [48] wie folgt definiert:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 \cdot \left(0,12 + 0,23 \cdot \frac{c_w + c_b}{\rho_d} \right), \quad (2.26)$$

mit der Diagonalmatrix \mathbf{K}_0 . Die Einträge werden nach [40] mit $K_{0,L} = K_{0,R} = 2$ und $K_{0,T} = 1$ angenommen.

2.1.3.2 Interaktion zwischen den Phasen

Wie bereits in den vorangehenden Abschnitten erwähnt, besteht eine Interaktion zwischen den drei vorkommenden Wasserphasen *gebundenes Wasser*, *Wasserdampf* und *freies Wasser* (siehe Abbildung 2.5). Nachfolgend werden die Zusammenhänge der einzelnen Phasen untereinander näher beschrieben.

2.1.3.3 Gebundenes Wasser – Wasserdampf

Sorptionsisotherme

Der Feuchteausaustausch zwischen dem gebundenen Wasser in den Zellwänden und dem Wasserdampf in den Zellhohlräumen findet in Form von Sorption innerhalb des hygrokopischen Bereichs statt. Nimmt das Holz während es sich dem Gleichgewicht annähert Feuchtigkeit auf, so spricht man von Adsorption. Wird die Ausgleichsfeuchte durch Trocknung erhalten, nennt man diesen Vorgang Desorption. Für eine bestimmte Temperatur kann die Gleichgewichtsfeuchte, vom darrtrockenen Zustand mit einer Holzfeuchte von $u = 0\%$ bis zur vollständigen Fasersättigung mit $u = u_{f,sat}$, in Form einer Kurve, der sogenannten Sorptionsisotherme, dargestellt werden [22].

Wie Abbildung 2.6 zeigt, sind die Isothermen bei Adsorption und Desorption nicht kongruent. Die Ausgleichsfeuchte unter einer bestimmten relativen Luftfeuchtigkeit, welche sich durch Desorption einstellt, liegt etwa um zwei bis vier Prozent höher als jene, die sich durch Adsorption einstellt. Dieser „Hysterese-Effekt“ der Sorptionsisothermen bewirkt kleinere Änderungen der Holzfeuchte unter wechselnden Klimabeanspruchungen, als ohne Hysterese zu erwarten wären [5].

Zur numerischen Implementierung der Sorptionsvorgänge in Abaqus wird das Modell von Autengruber et al. [3], basierend auf Frandsen et al. [14] und Frandsen und Svensson [13], verwendet. Die Sorptionsisothermen geben die Ober- und Untergrenze der Holzfeuchte, innerhalb derer eine mögliche Ausgleichsfeuchte liegen kann, an [14]. Die Beschreibung dieser Kurven kann laut Hailwood und Horrobin [17] nach Gleichung (2.27) erfolgen:

$$u_{eq}^\alpha = \frac{\varphi}{f_1^\alpha + f_2^\alpha \cdot \varphi + f_3^\alpha \cdot \varphi^2}, \quad \alpha = a, d. \quad (2.27)$$

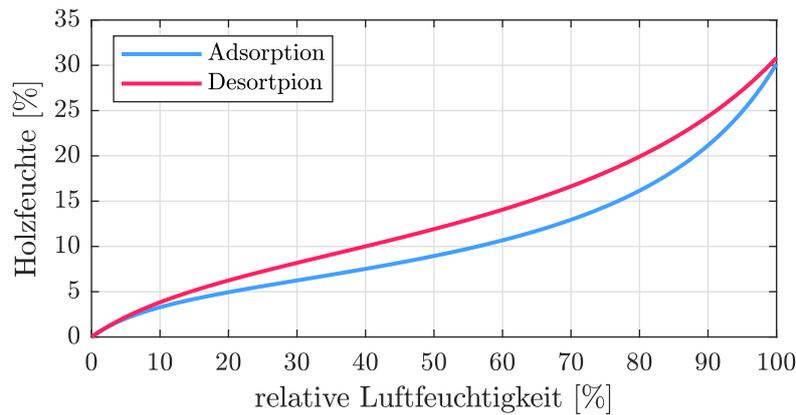


Abb. 2.6: Sorptionsisotherme mit Hystereseeffekt

Frandsen et al. [14] ermittelten die Formfaktoren f_1^α , f_2^α und f_3^α in Tabelle 2.2 anhand der Messdaten von Ahlgren [1]. Der Zusammenhang zwischen der Ausgleichsfeuchte u_{eq}^α und der zugehörigen Konzentration des gebundenen Wassers c_{eq} sowie die Verknüpfung der Wasserdampfkonzentration c_v und der relativen Luftfeuchtigkeit φ lauten wie folgt:

$$\begin{aligned} c_{eq} &= u_{eq}^\alpha \cdot \rho_d \\ c_v &= \varphi \cdot c_{vsat} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Die Sorptionsrate \dot{c} gibt jene Wassermenge an, welche pro Zeiteinheit ihren Zustand ändert [3].

Tab. 2.2: Formfaktoren der Sorptionsisotherme nach [14]

α	f_1^α	f_2^α	f_3^α
Adsorption a	1,804	13,63	-12,12
Desorption d	1,886	7,884	-6,526

Sie wird über die feuchteabhängige Reaktionsfunktion H_c bestimmt.

$$c_{bv} = H_{bv} \cdot (c_{eq} - c_b) \quad (2.29)$$

Abhängig davon ob Adsorption ($c_b < c_{eq}$) oder Desorption ($c_b > c_{eq}$) vorliegt, berechnet sich die Reaktionsfunktion H_{bv} wie folgt:

$$H_{bv} = \begin{cases} C_{bv,1} \cdot \exp\left(-C_{bv,2} \cdot \left(\frac{c_b}{c_{eq}}\right)^{C_{bv,3}}\right) + C_{bv,4}, & c_b < c_{eq} \\ C_{bv,1} \cdot \exp\left(-C_{bv,2} \cdot \left(2 - \frac{c_b}{c_{eq}}\right)^{C_{bv,3}}\right) + C_{bv,4}, & c_b > c_{eq} \end{cases} \quad (2.30)$$

Bei den Hilfwerten für $C_{bv,1}$, $C_{bv,3}$ und $C_{bv,4}$ handelt es sich um Konstanten, während $C_{bv,2}$ von der relativen Luftfeuchtigkeit φ abhängig ist:

$$C_{bv,2} = c_{21} \cdot \exp(c_{22} \cdot \varphi) + c_{23} \cdot \exp(c_{24} \cdot \varphi) \quad (2.31)$$

Die Variablen c_{21} , c_{22} , c_{23} und c_{24} , die zur Bestimmung von $C_{bv,2}$ benötigt werden, sind ebenfalls konstant. Alle Hilfwerte der Reaktionsfunktion H_c wurden aus [9] entnommen und sind in Tabelle 2.3 angeführt.

Tab. 2.3: Hilfwerte für die Reaktionsfunktion H_c

$C_{bv,1}$	$C_{bv,3}$	$C_{bv,4}$	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{24}
$3,8 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	80,0	$5,94 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	3,58	2,21	$1,59 \cdot 10^{-3}$	14,98

Sorptionshysterese

Die oben beschriebene Ad- und Desorptionsisotherme bilden die Grenzkurven zwischen denen der aktuelle Feuchtigkeitszustand im Holz liegen kann. Ausgehend von einem beliebigen Holzfeuchtezustand u_0 zwischen den beiden Kurven nähert sich nach [14] die Holzfeuchte, im Bestreben nach Gleichgewicht, einer der beiden Isothermen asymptotisch an. Je nachdem ob Ad- oder Desorption vorliegt, wandert die Holzfeuchte in Richtung der entsprechenden Kurve. Dieser Vorgang erfolgt entlang einer sogenannten „scanning curve“, welche die zugehörige Adsorptions- bzw. Desorptionsisotherme, ausgehend von u_0 , darstellt. Frandsen et al. [14] beschreibt die „scanning curve“ über den Parameter $s(\varphi)$, der wie folgt definiert ist:

$$s(\varphi) = \frac{u_{eq}(\varphi) - u_a(\varphi)}{u_d(\varphi) - u_a(\varphi)}, \quad (2.32)$$

mit einem Wertebereich zwischen 0 und 1. Der Parameter s definiert die Lage der aktuellen Ausgleichsfeuchte auf einer vertikalen Linie zwischen den beiden Grenzkurven in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit φ . Ist $s = 0$, liegt die Ausgleichsfeuchte auf der Adsorptionskurve, bei $s = 1$ liegt sie auf der Desorptionskurve. Die Berechnung erfolgt über die Ausgleichsfeuchte $u_a(\varphi)$ auf der Adsorptionskurve, die Ausgleichsfeuchte $u_d(\varphi)$ auf der Desorptionskurve sowie der Ausgleichsfeuchte $u_{eq}(\varphi)$ unter der aktuellen relativen Luftfeuchtigkeit. In Abbildung 2.7 sind die Verläufe der „scanning curves“ für Adsorption und Desorption qualitativ dargestellt.

Adsorption: Nimmt das Holz Feuchtigkeit auf startet die „scanning curve“ ausgehend von der Desorptionskurve mit dem Parameter $s = 1$. Die Kurve verläuft durch die Holzfeuchtigkeit u_{eq} welche zu Beginn des Prozesses im Holz vorhanden ist. Diese nähert sich im weiteren Verlauf entlang der „scanning curve“ asymptotisch der Adsorptionsisotherme an. Hat der Parameter s den Wert 0 erreicht, liegt die Holzfeuchtigkeit u auf der Adsorptionsisotherme.

Desorption: Der Desorptionsprozess verläuft äquivalent zur Adsorption. Die „scanning curve“ startet nun ausgehend von der Adsorptionskurve mit dem Parameter $s = 0$ und verläuft ebenfalls durch die zu Beginn vorhandene Holzfeuchtigkeit u_{eq} . Diese nähert sich asymptotisch, entlang des weiteren Verlaufs der „scanning curve“, der Desorptionsisotherme an. Hat der Parameter s den Wert 1 erreicht, ist liegt die Holzfeuchtigkeit u auf der Desorptionsisotherme.

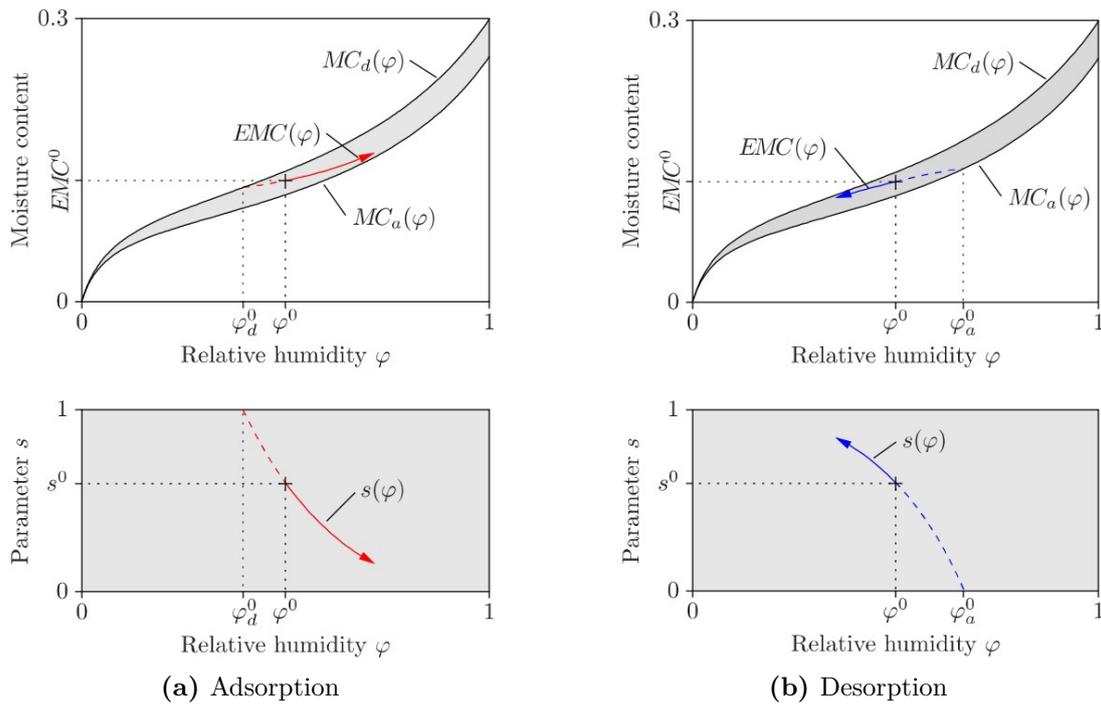


Abb. 2.7: Hysteresekurven und „scanning curves“ für Adsorption und Desorption aus Eitelberger [11]

2.1.3.4 Freies Wasser – Wasserdampf

Die Interaktion zwischen freiem Wasser und Wasserdampf findet in Form von Verdunstung und Kondensation statt [3]. In Autengruber et al. [3] wird zur Berücksichtigung dieses Verhaltens eine Verdunstungsrate \dot{c}_{wv} analog zu Gleichung (2.29) aus dem, in Kapitel 2.1.3.3 verwendeten, Modell von [13] und [14] eingeführt. Die Verdunstungsrate wird über die von der Wasserdampfkonzentration c_v abhängigen Reaktionsfunktion H_{wv} ermittelt.

$$\dot{c}_{wv} = H_{wv} \cdot (c_{v_{sat}} - c_v) \cdot f_{lum_{gas}} \quad (2.33)$$

Die Reaktionsfunktion H_{wv} berechnet sich abhängig davon, ob Verdunstung oder Kondensation vorliegt. In Holzzellen kann bei Vorhandensein von freiem Wasser von einem gesättigten Dampfdruck ausgegangen werden [3]. Liegt die vorhandene Wasserdampfkonzentration c_v unter der Sättigungsdampfdruckkonzentration $c_{v_{sat}}$, tritt Verdunstung auf. Ist die Wasserdampfkonzentration höher als die Sättigungsdampfdruckkonzentration, tritt Kondensation auf.

$$H_{wv} = \begin{cases} C_{wv,1} \cdot \exp\left(-C_{wv,2} \cdot \left(\frac{c_v}{c_{v_{sat}}}\right)^{C_{wv,3}}\right) + C_{wv,4}, & c_v < c_{v_{sat}} \\ C_{wv,1} \cdot \exp\left(-C_{wv,2} \cdot \left(2 - \frac{c_v}{c_{v_{sat}}}\right)^{C_{wv,3}}\right) + C_{wv,4}, & c_v > c_{v_{sat}} \end{cases} \quad (2.34)$$

Bei den Werten $C_{wv,1}$, $C_{wv,2}$, $C_{wv,3}$ und $C_{wv,4}$ handelt es sich um Konstanten, welche die Form der Reaktionsfunktion beschreiben. Sie wurden von Autengruber et al. [3] durch Simulationen bestimmt und sind in Tabelle 2.4 angeführt.

Tab. 2.4: Hilfwerte für die Reaktionsfunktion H_{wv}

$C_{wv,1}$	$C_{wv,2}$	$C_{wv,3}$	$C_{wv,4}$
$1,0 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$	20,0	50,0	$1,0 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$

2.1.3.5 Freies Wasser – gebundenes Wasser

Für die Interaktion von freiem Wasser und gebundenem Wasser wird in Autengruber et al. [3] nur der Übergang von freiem Wasser zu gebundenem Wasser berücksichtigt. Ist kein freies Wasser vorhanden, liegt das Wasser in den Zellhohlräumen in Form von Wasserdampf vor. Existiert freies Wasser im Holz, dann liegt analog zur Annahme in Kapitel 2.1.3.4 gesättigter Dampfdruck vor. Die Wasserdampfkonzentration c_v entspricht in diesem Fall der Konzentration $c_{v,sat}$ des gesättigten Zustands. Die Ermittlung der Sorptionsrate \dot{c}_{wb} erfolgt analog zu Kapitel 2.1.3.3 und 2.1.3.4.

2.1.3.6 Randbedingungen

Die freien Oberflächen des betrachteten Versuchskörpers stehen in ständiger Interaktion mit der Umgebung. Das führt zu Massen- und Wärmeflüssen durch die Grenzflächen, welche im Modell ebenfalls definiert werden müssen [3]. Im Falle des Einsickerns von freiem Wasser beschreiben Autengruber et al. [3] dessen Massenfluss ϕ_w durch die freie Oberfläche nach Gleichung (2.37). Da die Wasserdampfkonzentration c_v bei vorhanden sein von freiem Wasser gleich der gesättigten Konzentration wird, ist für den Wasserdampf in diesem Fall keine Randbedingung notwendig.

$$\phi_w = k_{c_w} \cdot (c_{w,0} - c_w) \cdot f_{lum} \quad (2.35)$$

Der Übergangskoeffizient k_{c_w} beschreibt einen möglichen Widerstand gegen Eindringen von freiem Wasser. Dieser kann beispielsweise durch Beschichtungen erzeugt werden. Das freie Wasser kann nur über die Zellhohlräume an der Oberfläche eindringen. In Gleichung (2.35) wird dies über den Volumsanteil des Zellhohlraums f_{lum} berücksichtigt. Die Wasserkonzentration der Umgebung $c_{w,0}$ kann maximal den Wert einer vollständig mit freiem Wasser gesättigten Zellpore annehmen:

$$c_{w,max} = f_{lum} \cdot \rho_{H_2O} \quad (2.36)$$

Liegt kein freies Wasser an der Oberfläche vor, muss nur der Massenfluss des Wasserdampfs ϕ_v berücksichtigt werden [3].

$$\begin{aligned} \phi_v &= k_{c_v} \cdot (c_{v,0} - c_v) \cdot f_{lum} \text{ und} \\ \phi_w &= 0 \end{aligned} \quad (2.37)$$

$c_{v,0}$ definiert die Wasserdampfkonzentration in der Umgebung. Mit k_{c_v} wird wiederum ein Übergangskoeffizient eingeführt. Dieser ist abhängig von der Geschwindigkeit des Luftzugs an der Oberfläche und der Oberflächenbeschaffenheit und berücksichtigt somit den Luftstrom mittels Konvektion.

Beim Trocknungsvorgang entweicht zuerst das freie Wasser aus dem Zellhohlraum. Die Wasserdampfkonzentration der Umgebungsluft ist niedriger als im gesättigten Zellkörper. Entweicht Wasserdampf aus dem Hohlraum in die Umgebung, sinkt die Konzentration in der Zelle ab. Gleichzeitig verdunstet das freie Wasser und hebt die Wasserdampfkonzentration wieder auf Sättigungsniveau an. Ist das freie Wasser einmal vollständig entwichen, beginnt der Wasser-

dampfgehalt ebenfalls zu sinken. Der Übergang zwischen den beiden Vorgängen erfolgt über die Glättungsfunktion α_k [3]:

$$\alpha_k = \exp\left(-20\left(1 - \frac{c_w}{1000}\right)^{1000}\right). \quad (2.38)$$

Der Wertebereich von α_k liegt zwischen 1 bei vorhandenem freien Wasser und sehr kleinen Werten ($< 10^{-8}$) wenn kein freies Wasser vorliegt. Die Randbedingungen für Trocknung ergeben sich dadurch wie folgt:

$$\begin{aligned} \phi_v &= k_{c_v} \cdot (c_{v,0} - c_v) \cdot f_{lum} \cdot (1 - \alpha_k) \\ \phi_w &= k_{c_v} \cdot (c_{v,0} - c_{v,sat}) \cdot f_{lum} \cdot \alpha_k \end{aligned} \quad (2.39)$$

Bei den Verdunstungsvorgängen während dem Trocknen kommt es aufgrund des Zustandswechsels zu einem deutlichen Abfall der Temperatur. Der Wärmefluss ϕ_T , definiert durch den Wärmetransportkoeffizienten k_T und der Umgebungstemperatur T_0 , wird mit den Massenflüssen aus Gleichung (2.39) durch Berücksichtigung der zugehörigen Enthalpien h_v und h_w in Form einer Energierandbedingung zusammengefasst.

$$\begin{aligned} \phi_T &= k_T \cdot (T_0 - T) \\ &+ k_{c_v} \cdot (c_{v,0} - c_v) \cdot f_{lum} \cdot (1 - \alpha_k) \cdot h_v \\ &+ k_{c_v} \cdot (c_{v,0} - c_{v,sat}) \cdot f_{lum} \cdot \alpha_k \cdot h_v \\ &+ k_{c_w} \cdot (c_{w,0} - c_w) \cdot f_{lum} \cdot h_w \end{aligned} \quad (2.40)$$

2.1.3.7 Initialer Zustand

Für den Anfangszustand zum Zeitpunkt Null werden die Anfangstemperatur T_{ini} im Bauteil sowie die anfangs vorhandene Wasserdampfkonzentration $c_{v,ini}$ in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit φ_{ini} festgelegt. Tritt schon zu Beginn freies Wasser im Bauteil auf, also ein Zustand in dem $c_{w,ini} > 0$, wird die anfängliche Wasserdampfkonzentration $c_{v,ini}$ gleich der gesättigten Konzentration $c_{v,sat}$ gesetzt. Die Konzentration des gebundenen Wassers $c_{b,ini}$ zu Beginn wird so gewählt, dass sie im Gleichgewicht mit der anfänglichen Wasserdampfkonzentration steht [3].

2.2 Beton

Beton ist ein künstlich hergestellter Werkstoff, der sich aus mehreren Bestandteilen zusammensetzt. Er wird durch Zusammenmischen von mineralischer Gesteinskörnung unterschiedlicher Größe, Zement als Bindemittel und Wasser hergestellt. Durch eine korrekte Abstufung der Gesteinskörnung erhält man einen Werkstoff mit homogenem Materialverhalten. Zusätzlich zu der beschriebenen Grundmischung können Zusatzmittel und Zusatzstoffe beigefügt werden, um die Frischbetoneigenschaften zu beeinflussen [18].

2.2.1 Mechanische Eigenschaften

Beton ist durch eine sehr hohe Druckfestigkeit charakterisiert. Die Zug-, Biegezug- und Schubfestigkeit sind im Verhältnis dazu relativ gering, weshalb aus Beton gefertigte Bauteile mit einer Stahlbewehrung verstärkt werden. Diese übernimmt die auftretenden Zug- und Schubspannungen im Bauteil, während der Beton die Druckspannungen aufnimmt [18]. Eine weitere Möglichkeit ist die Verbundbauweise, bei der Beton mit anderen Werkstoffen wie Holz oder Baustahl kombiniert wird. Dabei werden jene Teile des Bauteilquerschnitts die vorwiegend Druck erfahren in Beton ausgeführt und die zugbeanspruchten Teile aus Holz oder Stahl [20].

Aus kontinuumsmechanischer Sicht handelt es sich bei Beton um einen isotropen Werkstoff. Er weist in allen Richtungen dieselben mechanischen Eigenschaften auf. Die Komponenten des Materialnachgiebigkeitstensors \mathbf{D} in Gleichung (2.3) aus Abschnitt 2.1.1 sind demnach, unabhängig von der Orientierung des rechtwinkligen karthesischen Koordinatensystems, immer gleich. Für die Tensorkomponenten ergibt sich nach [27] folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} D_{1111} &= D_{2222} = D_{3333}, \\ D_{1122} &= D_{2233} = D_{1133}, \\ D_{1212} &= D_{2323} = D_{3131} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Die Komponenten des Materialnachgiebigkeitstensors \mathbf{D} können über den E-Modul E und die Querdehnungszahl ν sowie den Schubmodul G ausgedrückt werden [27].

Durch Anwenden der Zusammenhänge in Gleichung (2.41) im *Hook'schen Gesetz* für orthotrope Werkstoffe in Gleichung (2.3), erhält man das *Hook'sche Gesetz* für isotrope Werkstoffe.

In einem unter Dauerlast beanspruchten Beton setzen sich die Gesamtverzerrungen $\varepsilon_c(t)$ zum Zeitpunkt t bei konstanten Umgebungsbedingungen aus der Schwinddehnung $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$, der elastischen Dehnung $\varepsilon_{ci}(t_0)$ und der Kriechdehnung $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$ zusammen [33]. Der Zusammenhang ist in Gleichung (2.42) dargestellt:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{cs}(t, t_s) + \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) \quad (2.42)$$

mit dem Startzeitpunkt der Trocknung t_s und dem Belastungsalter t_0 . Neben den belastungsbedingten Verformungen entstehen auch aufgrund von Feuchtgradienten Deformationen in Betonkörpern.

2.2.1.1 Kriechen

Unter Kriechen wird das Verformungsverhalten verstanden, welches sich bei dauerhafter Belastung über die elastischen Verzerrungen ε_{ci} hinaus einstellt. Trotz gleichbleibendem Belastungszustand nehmen die Deformationen des Bauteils über die Zeit weiter zu und nähern sich einem Grenzwert an. Das Kriechen ist abhängig von der Betonzusammensetzung, dem Betonalter zum Zeitpunkt der erstmaligen Lastaufbringung, der Lastgröße und der Umgebungsfeuchtigkeit. Unter einer zeitlich unveränderlichen, kriechwirksamen Spannung, können die sich einstellenden Kriechverzerrungen zum Zeitpunkt unendlich mithilfe der Endkriechzahl $\varphi_{(\infty, t_0)}$ und dem E-Modul nach 28 Tagen E_{c0} abgeschätzt werden [26].

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi_{(\infty, t_0)} \cdot \frac{\sigma_c}{E_{c0}} \quad (2.43)$$

Die Kriechzahl ist abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit und den Querschnittsabmessungen und berücksichtigt die, in [33] vorgestellte, Aufspaltung des Kriechprozesses in einen Grundkriechanteil und einen Trocknungskriechanteil zufolge Feuchteinteraktion mit der Umgebung.

2.2.1.2 Schwinden

Schwinden bezeichnet die feuchtebedingte Volumenabnahme eines Betonkörpers, die bei konstanter Temperatur ohne äußere Belastungen auftreten. Der Schwindprozess lässt sich in vier Komponenten aufteilen [33]

- das Kapillarschwinden,
- das Schrumpfen,
- das Trocknungsschwinden und
- das Karbonatisierungsschwinden.

Das Kapillarschwinden tritt im frischen Beton, aufgrund des Feuchteverlustes an der Oberfläche, auf. Durch Anpassungen in der Betonmischung und eine sachgemäße Nachbehandlung kann dieser Effekt vermieden werden und ist somit vernachlässigbar. Das Schrumpfen beschreibt die Formänderungen aufgrund der chemischen Reaktion und dem Aushärten des Betons. Findet eine Wasserabgabe des Betons an die Umgebung statt, wird dies als Trocknungsschwinden bezeichnet, was in Normalbeton den größten Anteil an den Schwindverzerrungen ε_{cs} darstellt. Das Karbonatisierungsschwinden bezieht sich auf die Volumenänderungen, welche durch Umkristallisationsvorgänge im Zementstein auftreten. Die Hydratationsprodukte im Zementstein reagieren unter Beisein von Feuchtigkeit mit dem Kohlendioxid in der Luft und setzen somit zuvor gebundenes Wasser frei [33].

2.2.2 Feuchtigkeit

Der Feuchtetransport in Beton kann nach Wiens und Alfes [50] auf vier Arten erfolgen: Permutation, kapillares Saugen, Diffusion und Osmose. Letztere beschreibt den Flüssigkeitstransport, hervorgerufen durch Unterschiede der Konzentrationen von gelösten Stoffen in einem Lösungsmittel und kann aufgrund der geringen Auswirkungen vernachlässigt werden.

Ist die Oberfläche eines Betonkörpers mit drückendem Wasser beaufschlagt, so dringt dieses aufgrund des hydraulischen Drucks in das Betongefüge in Form von Permutation ein. Die Eindringtiefe kann, abhängig vom Wasserdruck, bis zu 25 mm betragen. Anschließend an den Druckwasserbereich breitet sich das Wasser durch kapillares Saugen weiter in Richtung Betonkern aus. Dabei wandert das Wasser, hervorgerufen durch Grenzspannungen an den Porenwänden, durch die Kapillaren des Betonkörpers. Handelt es sich um eine freie Oberfläche, findet eine Feuchteabgabe zur Umgebungsluft statt. Dabei wandert der Wasserdampf aufgrund eines Partialdruckunterschieds, hervorgerufen durch die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur, durch die Hohlräume im Beton an die Oberfläche. Es kommt zu einer Austrocknung des luftseitigen Bereichs eines Betonbauteils über die Zeit [50].

In Beddoe und Springenschmid [4] wurden Betonplatten unterschiedlicher Dicken auf Feuchtetransport untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Diffusionsbereich an der freien Oberfläche etwa 80 mm Richtung Betonkern erstreckt. Der an den Druckwasserbereich anschließende Kapillarbereich erstreckt sich über bis zu 70 mm. Je nach Plattendicke können sich diese beiden Bereich überschneiden und gegenseitig beeinflussen.

2.3 Holz-Beton-Verbund (HBV)

Die Idee der Holz-Beton-Verbundbauweise ist es die Stärken der beiden verwendeten Werkstoffe optimal zu nutzen. Die im Verbundquerschnitt auftretenden Druckspannungen werden vom Beton aufgenommen, das Holz übernimmt die Zugspannungen. Durch den Verbund wird die Biegesteifigkeit des Gesamtquerschnitts, im Vergleich zu den Einzelquerschnitten, deutlich erhöht [20].

Die ersten Überlegungen zu Holz-Beton-Verbundkonstruktionen entstanden auf Basis des bestehenden Modells des Eisenbetons nach dem ersten Weltkrieg. In Zeiten der Eisenknappheit war man bestrebt das teure Eisen im Beton durch den günstigeren Werkstoff Holz zu ersetzen [20]. In den 1960er Jahren stellte die HBV-Bauweise eine günstige Methode zur Sanierung von bestehenden Altbaudecken dar. Das Trag- und Verformungsverhalten der bestehenden Konstruktion konnte erheblich verbessert werden, ohne dabei die Lastabtragung der vorhandenen Struktur zu verändern [51].

Die Weiterentwicklung der Massivholzbauweise ermöglichte den Einsatz von flächigen HBV-Konstruktionen. Mit diesen Systemen gelang es, den hohen Anforderungen des modernen, mehrgeschossigen Hochbaus gerecht zu werden. Es können Spannweiten von 8 bis 10 Meter bei gleichzeitiger Einhaltung der Anforderungen an das Schwingungsverhalten erreicht werden [51].

Die Verbundbauweise bringt neben den statischen und konstruktiven Verbesserungen auch aus bauphysikalischer Sicht Vorteile mit sich. Aufgrund des höheren Eigengewichts im Vergleich zu einer reinen Massivholzkonstruktion erreichen HBV-Konstruktionen ein besseres Luftschalldämmmaß. Auch das Brandverhalten fällt deutlich günstiger aus [19].

2.3.1 Materialanforderungen

Bei HBV-Konstruktionen können je nach Anwendung Vollholz, Brettschichtholz und Holzwerkstoffe wie Brettstapelholz (BST) oder Brettsperrholz (CLT) zum Einsatz kommen. Die Decke kann im Werk in die gewünschte geometrische Form gebracht werden [42]. Die verwendeten Betone müssen, abhängig von der Bauweise, verschiedene Kriterien erfüllen. Das Eigengewicht sollte möglichst gering sein, der Beton sollte gut verarbeitbar sein (Konsistenz), geringe zeitabhängige Verformungen aufweisen (Kriechen und Schwinden) und möglichst wenig Feuchtigkeit abgeben [51]. Holschemacher und Dehn [19] diskutieren die Eignung verschiedener Betone für die HBV-Bauweise. Folgende Betonarten werden dabei betrachtet:

- Selbstverdichtende Betone
- Selbstverdichtende Leichtbetone
- Stahlfaserbetone
- Konstruktive Leichtbetone
- Hochfeste/ultrahochfeste Betone

2.3.2 Verbund

Bei Verbundquerschnitten kann grob in drei Arten des Verbunds unterschieden werden: *starrer Verbund*, *nachgiebiger Verbund* und *kein Verbund*. Je nachdem, welcher Verbundgrad im Bauteil erreicht wird, erhalten die Teilquerschnitte unterschiedliche Dehnungs- und Spannungsverteilungen (siehe Abbildung 2.8) [32]. Der Verbund kann über unterschiedliche Verbindungsmittel hergestellt werden: [20]

- mechanischer Verbund durch metallische Verbindungsmittel,
- Formschluss durch eingefräste Kerfen und Nocken im Holz und
- Klebeverbund

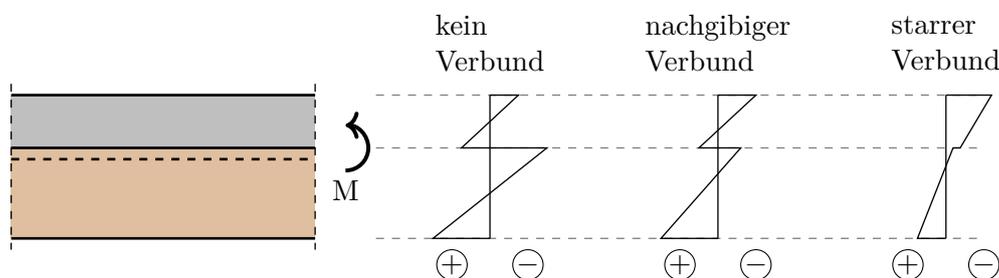


Abb. 2.8: Unterschiedliches Tragverhalten eines Verbundquerschnitts

Die Verbindungsmittel weisen unterschiedliche Steifigkeiten auf und erreichen verschiedene Verbundgrade. In Abbildung 2.8 sind die den Verbundgraden entsprechenden Spannungsverläufe über einen HBV-Querschnitt dargestellt. Bei Verwendung von mechanischen oder formschlüssigen Verbindungsmitteln erhält man ein Bauteil mit nachgiebigem Verbund. Einzig über den Klebeverbund ist eine Herstellung von vollständig starr verbundenen Teilquerschnitten möglich. Die Wahl des Verbindungsmittels beeinflusst das Trag- und Verformungsverhaltens des Bauteils wesentlich und ist im Endeffekt vom Einsatzbereich, dem gewünschten Grad des Verbunds und den Kosten abhängig [20, 24]. In dieser Arbeit wird die Kerfe als Verbindungsmittel näher betrachtet.

2.3.2.1 Kerfen

Kerfen werden orthogonal zur Lamellenrichtung in Brettstapel- oder CLT-Elementen durch Einfräsungen oder Aussparungen hergestellt. Beim Aufbringen einer monolithischen Beton-Tragschicht wird, wie in Abbildung 2.9 dargestellt, durch das Verfüllen der Einfräsung ein formschlüssiger Verbund erzeugt. Die Schubkraft, welche in der Fuge zwischen den Querschnitten wirkt, wird über eine Druckstrebe im Beton auf die Kerfenflanke und damit ins Holz übertragen (siehe Abbildung 2.10). In der Vergangenheit wurden zusätzlich stiftförmige Verbindungsmittel eingebaut, um die Abhebekraft durch die exzentrische Lasteinleitung aufzunehmen. Untersuchungen von Michelfelder [31] konnten zeigen, dass diese jedoch keinen wesentlichen Beitrag zur Lastableitung beisteuern. Dieser zusätzliche Aufwand kann somit entfallen [20, 25, 29].

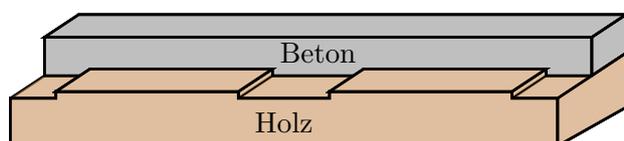


Abb. 2.9: HBV-Decke mit Kerfen als Verbindungsmittel

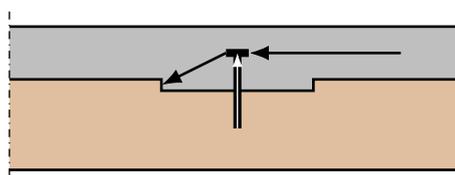


Abb. 2.10: Kerfe mit stiftförmigem Verbindungsmittel aus [31]

2.3.3 Feuchtigkeit

In dieser Arbeit werden die, über die Zeit im Kernenbereich auftretenden, Holzfeuchtigkeiten von HBV-Platten durch Feuchteintrag aus dem Frischbeton auf kritische Zustände untersucht. Im Folgenden wird auf die Feuchteinteraktion zwischen Beton und Holz, den Einfluss des Klebers auf den Feuchtetransport in CLT-Platten sowie den Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Kerventragfähigkeit und -steifigkeit eingegangen.

2.3.3.1 Interaktion Beton – Holz

Üblicherweise wird in HBV-Bauteilen zwischen Beton und Holz eine wasserdichte Trennschicht eingebaut, um den Wassereintrag ins Holz zu verhindern. Dies erfordert allerdings zusätzliche Arbeitsschritte, wodurch mehr Personal und Zeit notwendig sind. Im Folgenden werden Untersuchungen betrachtet, in denen diese Feuchtetrennschicht weggelassen wurde, um die Auswirkungen des erhöhten Feuchtegehalts im Holz zu beurteilen.

Feuchteintrag aus Frischbeton in einen Vollholzkörper über die ersten fünf Monate

In [20] wurde ein Vollholz-Balkenstück mit einer Anfangsholzfeuchte von 12 % an der Oberseite mit Beton beaufschlagt. Der Holzprobekörper war 140 mm breit, 260 mm hoch und 300 mm lang, über die Dicke der Aufbetonschicht sind keine Angaben bekannt. Der Probekörper wurde bei 22 °C Raumtemperatur und etwa 70 % relativer Luftfeuchtigkeit über 5 Monate gelagert. In regelmäßigen Abständen wurde an mehreren Punkten im Querschnitt die Holzfeuchte gemessen (siehe Abbildung 2.11a).

Die Messergebnisse zeigen, dass eine kritische Durchfeuchtung in den ersten 30 mm ab der Werkstoffuge auftritt. Der maximale Feuchtegehalt direkt unterhalb der Fuge beträgt nach vier Tagen etwa 43 % (siehe Abbildung 2.11c). In den Eckbereichen, die zum Teil von zwei Seiten mit feuchtem Beton umgeben sind, steigt die Feuchtigkeit sogar auf beinahe 60 % an (siehe Abbildung 2.11b). Im Kernbereich wurden keine nennenswerten Feuchtedifferenzen gemessen. Die Feuchtegradienten nehmen mit der Zeit immer stärker ab. Nach spätestens 90 Tagen liegt jeder Messpunkt unter 20 % Holzfeuchtigkeit und der Balken kann als trocken angesehen werden. Ab dann verändert sich die Feuchtigkeit bis zum Versuchsende nicht mehr maßgeblich.

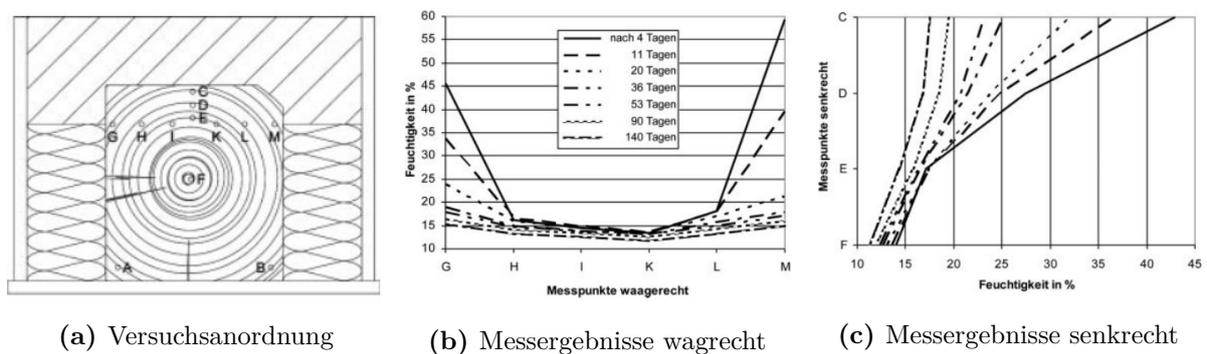


Abb. 2.11: Versuchsanordnung und Messergebnisse aus [20]

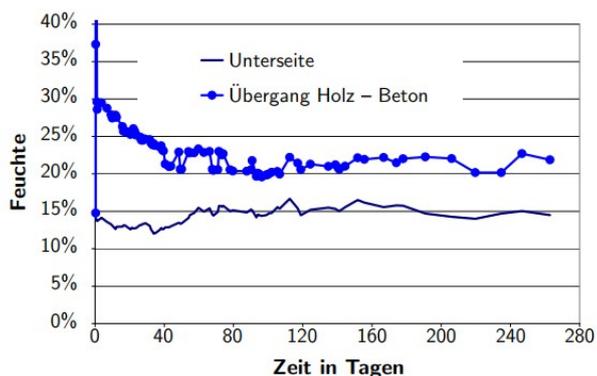


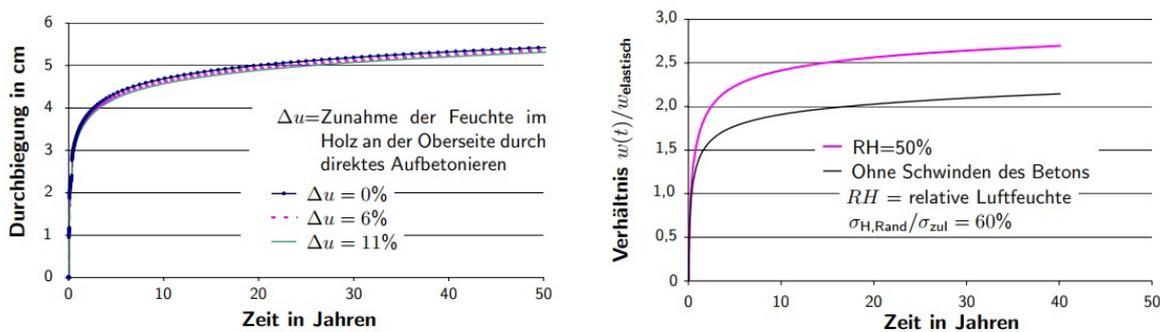
Abb. 2.12: Feuchteverlauf im Holz aus [42]

Langzeitverhalten einer Brettstapel-Beton-Verbundkonstruktion ohne Trennschicht

Schänzlin [42] führt in seiner Arbeit Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken in Form von numerischen Berechnungen durch. Er betrachtet dazu einen Deckenstreifen in Form eines ein Meter breiten Trägers, mit einer Spannweite von 525 cm und einer Dauerbelastung von $5,5 \text{ kN/m}^2$. Der Brettstapel hatte eine Höhe von 16 cm, die Ortbetonschicht war 8 cm dick. Der Verbund wurde über Kerben hergestellt.

Innerhalb der ersten 3,5 Stunden zeigen die Feuchteberechnungen im Träger (Abbildung 2.12) einen Anstieg am Übergang zwischen Beton und Holz von etwas mehr als 15%. Anschließend fällt die Holzfeuchte bis sie sich nach etwa 80 Tagen zwischen 20% und 25% einpendelt. Die steigende Holzfeuchte bringt eine Senkung des E-Moduls im Holz mit sich. Gleichzeitig nehmen die Kriechverformungen zu. Dadurch entstehen erhöhte Durchbiegungen. Nachdem der Querschnitt durch die erhöhte Feuchtigkeit zu Beginn quillt, trocknet er anschließend aus und beginnt zu schrumpfen. Das Schrumpfen wirkt den entstehenden Durchbiegungen entgegen. Aufgrund dieser gegenseitig wirkenden Effekte ist der Einfluss des Befeuchtens auf die Langzeitdurchbiegungen gering und nach Schänzlin [42] vernachlässigbar.

In Abbildung 2.13b sind die Deformationen mit und ohne Berücksichtigung des Betonschwindens zu sehen. Daraus ist ein wesentlicher Einfluss auf die Langzeitdeformationen zu erkennen. Während ohne Berücksichtigung von Schwinden das Verhältnis zwischen elastischer Verformung und Langzeitverformung bei 2,1 liegt, steigt es unter Berücksichtigung von Betonschwinden auf 2,8 an. Das Betonschwinden ist daher für die Bemessung von HBV-Tragwerken nicht vernachlässigbar.



(a) Langzeitdeformationen zufolge Befeuchtung

(b) Deformationen zufolge Betonschwinden

Abb. 2.13: Messergebnisse des Langzeitverhaltens aus [42]

Feuchteinteraktion zwischen Frischbeton und Brettsperrholz

In [32] wurden die Einflüsse der Befeuchtung von Brettsperrholz durch Frischbeton untersucht. Es wurden insgesamt 15 Probekörper bestehend aus 10-12 cm dicken Brettsperrholzelementen mit einer Grundfläche von 20×20 cm und einer 8 cm starken Aufbetonschicht getestet. Es kamen unterschiedliche Betonmischungen mit variierendem Wasser-Zement-Wert (w/z -Wert) und verschiedenen Zusatzmitteln zum Einsatz. Zwei Probekörper wurden mit einer Einfräsung in der obersten Brettlamelle hergestellt, um den Einfluss von Kernen auf die Feuchteaufnahme zu untersuchen. Die Messungen erstreckten sich insgesamt über 28 Tage.

Hinsichtlich des Einflusses des w/z -Wertes auf die Feuchteinteraktion zeigen die Ergebnisse in [32] einen eindeutigen Zusammenhang. Höhere w/z -Werte führen zu einer höheren Wasseraufnahme in der obersten Lamelle und somit der gesamten Holzplatte. Dies ist auf den mit dem w/z -Wert ansteigenden Kapillaranteil im Betongefüge sowie die größere Menge an freiem Wasser zurückzuführen.

Neben den Betonmischungen mit unterschiedlichen w/z -Werten wurde auch selbstverdichtender Beton mit einem erhöhtem Mehlkorngelalt (Feinanteile mit einer Größe $< 0,125$ mm) verwendet. Die Annahme, dass die Holzporen an der Oberfläche durch die Feinanteile im Beton verstopfen und somit weniger Feuchteaufnahme ins Holz möglich ist, konnte allerdings nicht bestätigt werden. Es zeigten sich kaum Unterschiede zwischen selbstverdichtendem Beton und „Normalbeton“.

Zusätzlich zu den Probekörpern mit ebener Holzoberfläche wurden auch zwei Elemente mit einer Einkerbung untersucht. Dadurch kommt auch das Hirnholz in der Kervenflanke mit dem feuchten Beton in Berührung und es entsteht eine zusätzliche Wasseraufnahme in Faserrichtung. Im Vergleich zu den Probekörpern mit ebenen Oberflächen findet eine deutlich erhöhte Feuchteaufnahme statt. Innerhalb der ersten fünf Stunden kommt es zu einem starken Anstieg in der obersten Lamelle. Die Holzfeuchtigkeit liegt um beinahe 75 % über den Werten in den ebenen Probekörpern. Diese erhöhte Anfangsfeuchtigkeit führt, verglichen zu den restlichen Probekörpern, zu einem deutlichen Unterschied in der obersten Lamelle bis zum Ende der Versuchsdauer.

Die Versuche aus [32] dienen als Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen. Die Verwendung und Implementierung der Messdaten wird in Kapitel 4.3 näher beschrieben.

2.3.3.2 Auswirkung von Klebstoffen auf den Feuchtetransport im Holz

Zur Herstellung des Verbunds zwischen den Holzschichten kommen unterschiedliche Klebstoffe zum Einsatz. Als wesentliches Kriterium gilt die Sicherstellung der vollen Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Klebefuge über die gesamte Lebensdauer des Bauteils. Dafür geeignete Klebstoffe sind hauptsächlich härtbare Kunstharzkleber, auch Bauholzkleber genannt [34]. Normativ sind gemäß *ÖNORM B 1995-1-1* [35] bzw. *DIN EN 14080* [7] folgende Klebstofftypen zugelassen:

- Phenoplast- und Aminoplast-Klebstoffe (z. B. MF, MUF, PRF, UF)
- feuchtigkeitsvernetzende Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis (PUR)
- Emulsion-Polymer-Isocyanat-Klebstoffe (EPI)

Bei handelsüblichen Brettsperrholzelementen beschränkt sich laut Mestek et al. [30] die Verklebung auf Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis (1K-PUR) und Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz (MUF).

Mannes et al. [28] und Volkmer et al. [49] untersuchten diverse Klebstoffe auf ihr Diffusionsverhalten. Dabei wurden sowohl der Klebstoff alleine in Form von Klebstofffilmen als auch in Anwendung zur Verklebung von zwei Holz-Probekörpern untersucht. Bei den Versuchen ergaben sich deutliche Unterschiede in der Feuchtewiedergabe zwischen den verwendeten Klebstoffen.

Mannes et al. [28] berichtet bei der Verwendung von EPI und 1K-PUR, im Vergleich zu den restlichen verwendeten Klebstoffen, von einer deutlichen Wasserkonzentration unterhalb der Klebefuge zwischen den beiden Holz-Probekörpern. Auch Volkmer et al. [49] identifiziert EPI und 1K-PUR als wesentlich diffusionsdichter, als die restlichen untersuchten Klebstoffe.

Die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen decken sich mit jenen aus [32], welche als Grundlage für die numerische Untersuchung in dieser Arbeit dienen. Die Versuchsmessungen zeigen eine klare Beeinflussung der Feuchtweiterleitung im Holz durch den verwendeten Klebstoff, wobei die Probekörper mit MUF-Klebefugen eine höhere Feuchtweiterleitung im Fugenbereich aufweisen, als jene mit PUR-Klebefugen. Auf die Berücksichtigung der Klebefugen im Finite-Elemente-Modell dieser Arbeit wird in Kapitel (4.3) näher eingegangen.

2.3.3.3 Auswirkung der Holzfeuchte auf die Kerventragfähigkeit

In Michelfelder [31] wird eine Parameterstudie zum Trag- und Verformungsverhalten von Kernen in HBV-Bauteilen durchgeführt. Es werden dabei in einem numerischen Modell die Kervengeometrie und der E-Modul von Holz variiert. Außerdem werden in Versuchen aufgetretene Versagensursachen untersucht. Die Ergebnisse zeigen unter anderem einen proportionalen Zusammenhang zwischen dem E-Modul im verwendeten Holz und dem Verbindungsmittelmodul K_{ser} . Die Steifigkeit des Verbindungsmittels steigt mit zunehmendem E-Modul an. Als maßgebende Versagensursache wird Abscheren des Vorholzes angeführt, ähnlich wie bei der zimmermannsmäßigen Versatzverbindung. In Abbildung 2.14 ist der Schubspannungsverlauf im Vorholz dargestellt. Direkt am Einschnitt entsteht eine Schubspannungsspitze, die in Abhängigkeit der Vorholzlänge nach hinten immer weiter abnimmt. Die Tragfähigkeit der Kerne ist demnach maßgebend von der Schubfestigkeit im Vorholz abhängig. Außerdem zeigt die Variation der Kervengeometrie, dass die Spannungsspitze durch höhere Kerntiefen und längere Vorholzlängen verringert werden kann [31].

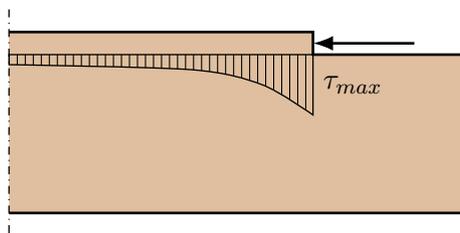


Abb. 2.14: Qualitativer Schubspannungsverlauf im Vorholz einer Kerne

In Kapitel 2.1.2.1 wird der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Steifigkeit und Festigkeit von Holz beschrieben. Die Tragfähigkeit einer Kervenverbindung ist nach den Untersuchungen in Michelfelder [31] sowohl von der Schubfestigkeit als auch vom Holz-E-Modul abhängig. Erhöhte Holzfeuchtigkeiten wirken sich negativ auf diese beiden Parameter aus, wodurch auch die Tragfähigkeit von Kervenverbindungen herabgesetzt wird.



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

Kapitel 3

Modellierung des kombinierten Feuchte- und Energietransports

Bei den in Kapitel 2.1.3 eingeführten konstitutiven Gleichungen (2.10)-(2.12) handelt es sich um ein gekoppeltes, nichtlineares, partielles Differentialgleichungssystem. Da für diese Problemstellung keine analytische Lösung vorliegt [3], wird das numerische Verfahren der Finiten-Elemente-Methode (FEM) verwendet. Dabei wird der zu untersuchende Körper mit unendlich vielen Freiheitsgraden gedanklich in endlich viele Elemente mit einfacher geometrischer Form zerlegt. Jedes dieser sogenannten finiten Elemente definiert sich über eine bestimmte Anzahl an Knoten und über vorgegebene Funktionsklassen zur Approximierung von a priori unbekanntem kontinuierlichen Feldern, in diesem Fall den Feuchte- und Temperaturfeldern. Dieser Übergang von einem ursprünglich kontinuierlichen System mit unendlich vielen Freiheitsgraden auf ein System mit endlich vielen Freiheitsgraden, nennt sich Diskretisierung. Durch die diskrete Formulierung der beschreibenden Differentialgleichungen in einem linearen Gleichungssystem, können die unbekanntem Größen ermittelt und das räumliche Problem gelöst werden [53].

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit wird durch das Simulationstool des Instituts für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, an der Technischen Universität Wien, im Rahmen der kommerziellen FEM-Software „Abaqus“ gelöst. Eitelberger [11] und Autengruber et al. [3] lösen die spezialisierte Problemstellung des kombinierten Feuchte- und Energietransports durch Implementierung von Subroutinen, welche anhand von Versuchen validiert wurden. Die verwendeten theoretischen Grundlagen basieren auf den Modellen von [13], [14] und [23]. Über die User-Element-Subroutine "UEL" können eigene Elementstypen definiert werden. Das damit entwickelte User-Element basiert auf einem Quader-Element mit 8 Integrationspunkten und folgenden vier Freiheitsgraden:

- NT11: c_b ...Konzentration des gebundenen Wassers [g/cm^2]
- NT12: c_v ...Konzentration des Wasserdampfs [g/cm^2]
- NT13: c_w ...Konzentration des freien Wassers [g/cm^2]
- NT14: T ...Temperatur [K]

Für jedes Element müssen die Orientierung der lokalen Materialrichtungen sowie alle lokalen Materialeigenschaften, wie die Dichte und die Materialtensoren (siehe Kapitel 2.1.3.1) definiert werden.

Das implementierte Lösungsverfahren basiert auf der grundlegenden Gleichung (3.1) der FEM und funktioniert analog zur Lösung von Spannungsproblemen. Mit der Systemsteifigkeitsmatrix \mathbf{K} und dem Elementknotenlastvektor \mathbf{p} , kann das Gleichungssystem für die unbekanntem Knotenpunktverschiebungen \mathbf{q} gelöst werden.

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{p} \quad (3.1)$$

Die gekoppelten Differentialgleichungen (2.10)-(2.12) können durch räumliche und zeitliche Diskretisierung nach Autengruber et al. [3] in einem linearen Gleichungssystem gelöst werden. Die räumliche Diskretisierung erfolgt durch Einführung von geometrisch kompatiblen virtuellen Feldfunktionen und der Beschreibung des Verlaufs der Zustandfunktionen zwischen den Knotenpunkten durch lineare Interpolationsfunktionen N , wie in Gleichung (3.2) dargestellt. Die diskretisierten Variablen sind durch großgeschriebene hochgestellte Indizes gekennzeichnet.

$$\begin{aligned}\partial c_b &= N^M \cdot \partial c_b^M, c_b = N^M \cdot c_b^M, \\ \partial c_v &= N^N \cdot \partial c_v^N, c_v = N^N \cdot c_v^N, \\ \partial c_w &= N^O \cdot \partial c_w^O, c_w = N^O \cdot c_w^O, \\ \partial T &= N^P \cdot \partial T^P, T = N^P \cdot T^P,\end{aligned}\tag{3.2}$$

In einem weiteren Schritt bringen Autengruber et al. [3] das implizierte Euler-Verfahren für die zeitliche Diskretisierung zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein numerisches Verfahren zur Lösung von Anfangswertproblemen durch schrittweise Linearisierung [21]. Dies führt auf die folgenden vier gekoppelten Differentialgleichungen:

$$\begin{aligned}F_{c_b}^M &= \frac{1}{\Delta t} \int_V N^M (c_{b,t+\Delta t} - c_{b,t}) dV \\ &+ \int_V \frac{\partial N^M}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{D}_b \cdot \frac{\partial c_b}{\partial \mathbf{x}} dV \\ &+ \int_V \frac{\partial N^M}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{D}_{bT} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV \\ &+ \int_V N^M \dot{c}_{bv} dV + \int_V N^M \dot{c}_{wb} dV \\ &+ \int_S N^M \phi_b dS = 0,\end{aligned}\tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}F_{c_v}^N &= \frac{1}{\Delta t} \int_V N^N (c_{v,t+\Delta t} f_{lum_{gas,t+\Delta t}} - c_{v,t} f_{lum_{gas,t}}) dV \\ &+ \int_V \frac{\partial N^N}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{D}_v \cdot \frac{\partial c_v}{\partial \mathbf{x}} f_{lum_{gas,t}} dV \\ &- \int_V N^N \dot{c}_{bv} dV + \int_V N^N \dot{c}_{wv} dV \\ &+ \int_S N^N \phi_v dS = 0,\end{aligned}\tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
F_{c_w}^O &= \frac{1}{\Delta t} \int_V N^O (c_{w,t+\Delta t} - c_{w,t}) dV \\
&+ \int_V \frac{\partial N^O}{\partial \mathbf{x}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{\mathbf{K}_r \mathbf{K}_w}{\mu_w} \cdot \frac{\partial (P_g - P_c)}{\partial \mathbf{x}} dV \\
&- \int_V N^O \dot{c}_{wb} dV - \int_V N^O \dot{c}_{wv} dV \\
&+ \int_S N^O \phi_w dS = 0,
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
F_T^P &= \frac{1}{\Delta t} \int_V N^P [(\rho h)_{t+\Delta t} - (\rho h)_t] dV \\
&+ \int_V \frac{\partial N^P}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{K} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV \\
&+ \int_V \frac{\partial N^P}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{D}_b \cdot \frac{\partial c_b}{\partial \mathbf{x}} \bar{h}_b dV \\
&+ \int_V \frac{\partial N^P}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{D}_{bT} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} \bar{h}_b dV \\
&+ \int_V \frac{\partial N^P}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{D}_v \cdot \frac{\partial c_v}{\partial \mathbf{x}} h_v f_{lum_{gas}} dV \\
&+ \int_V \frac{\partial N^P}{\partial \mathbf{x}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{\mathbf{K}_r \mathbf{K}_w}{\mu_w} \cdot \frac{\partial (P_g - P_c)}{\partial \mathbf{x}} h_w dV \\
&- \int_V N^P \dot{c}_{bv} (h_v - h_b) dV \\
&- \int_V N^P \dot{c}_{wb} (h_w - h_b) dV \\
&- \int_V N^P \dot{c}_{wv} (h_w - h_v) dV \\
&+ \int_S N^P \phi_b h_b dS + \int_S N^P \phi_v h_v dS \\
&+ \int_S N^P \phi_w h_w dS + \int_S N^P \phi_T dS = 0.
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Man erhält ein zu Gleichung (3.1) äquivalentes lineares Gleichungssystem (3.7) für den Massenstrom, welches für jeden Integrationspunkt zu lösen ist. Die Lösung erfolgt mittels der Newton-Raphson-Methode.

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{cccc} K_{c_b c_b}^{MQ} & K_{c_b c_v}^{MR} & K_{c_b c_w}^{MS} & K_{c_b T}^{MT} \\ K_{c_v c_b}^{NQ} & K_{c_v c_v}^{NR} & K_{c_v c_w}^{NS} & K_{c_v T}^{NT} \\ K_{c_w c_b}^{OQ} & K_{c_w c_v}^{OR} & K_{c_w c_w}^{OS} & K_{c_w T}^{OT} \\ K_{T c_b}^{PQ} & K_{T c_v}^{PR} & K_{T c_w}^{PS} & K_{TT}^{PT} \end{array} \right]_i \cdot \begin{pmatrix} q_{cb}^Q \\ q_{cv}^R \\ q_{cw}^S \\ q_T^T \end{pmatrix}_{i+1} = \\
& \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial F_{c_b}^M}{\partial c_b^Q} & \frac{\partial F_{c_b}^M}{\partial c_v^R} & \frac{\partial F_{c_b}^M}{\partial c_w^S} & \frac{\partial F_{c_b}^M}{\partial T^T} \\ \frac{\partial F_{c_v}^N}{\partial c_b^Q} & \frac{\partial F_{c_v}^N}{\partial c_v^R} & \frac{\partial F_{c_v}^N}{\partial c_w^S} & \frac{\partial F_{c_v}^N}{\partial T^T} \\ \frac{\partial F_{c_w}^O}{\partial c_b^Q} & \frac{\partial F_{c_w}^O}{\partial c_v^R} & \frac{\partial F_{c_w}^O}{\partial c_w^S} & \frac{\partial F_{c_w}^O}{\partial T^T} \\ \frac{\partial F_T^P}{\partial c_b^Q} & \frac{\partial F_T^P}{\partial c_v^R} & \frac{\partial F_T^P}{\partial c_w^S} & \frac{\partial F_T^P}{\partial T^T} \end{array} \right]_i \cdot \begin{pmatrix} q_{cb}^Q \\ q_{cv}^R \\ q_{cw}^S \\ q_T^T \end{pmatrix}_{i+1} = \begin{pmatrix} -F_{c_b}^M \\ -F_{c_v}^N \\ -F_{c_w}^O \\ -F_T^P \end{pmatrix}_i \quad (3.7)
\end{aligned}$$

Die Einträge der Elementssteifigkeitsmatrix auf der linken Seite werden aus den Ableitungen der Feldfunktionen nach den unbekanntem Freiheitsgraden c_b , c_v , c_w und T am Ende des Zeitinkrements $(t + \Delta t)$ gebildet. Bei entkoppelten Systemen sind nur die Terme der Hauptdiagonale mit Werten ungleich Null versehen. Neben den bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnten Koppeltermen zufolge der Interaktion zwischen den Phasen \dot{c}_{wb} , \dot{c}_{bv} und \dot{c}_{wv} , sind die Differentialgleichungen auch durch die Abhängigkeit der Feldfunktionen von den vier Freiheitsgraden miteinander gekoppelt. Die Elementssteifigkeitsmatrix wird mit dem unbekanntem Knotenfreiheitsgradvektor \mathbf{q} für den Iterationsschritt $i + 1$ multipliziert. Die räumlich und zeitlich diskretisierten Feldfunktionen $F_{c_b}^M$, $F_{c_v}^N$, $F_{c_w}^O$ und F_T^P befinden sich auf der rechten Seite des Gleichungssystems. Sie sind für den Schritt i bekannt.

Die Feldfunktionen F müssen mit den gesuchten Knotenfreiheitsgraden q im Gleichgewicht stehen. Um dies zu ermöglichen, darf keine singuläre Elementssteifigkeitsmatrix vorliegen, was durch Anpassen des Gleichungssystems an die Randbedingungen erreicht wird. Außerdem muss der Knotenfreiheitsgradvektor von Null verschieden sein. Das Gleichungssystem (3.7) kann für jedes Element nach den unbekanntem Freiheitsgraden r gelöst werden.

Kapitel 4

Modellierung einer HBV-Platte zur Ermittlung von Feuchtefeldern

Die Untersuchung des Langzeitverhaltens von Materialien und Strukturen in Form von Versuchen stellt stets eine Herausforderung dar, die mit sehr viel Aufwand verbunden ist. Neben den technischen Schwierigkeiten ist das Hauptproblem die lange Dauer der Versuche. Wesentlich schneller lassen sich Ergebnisse durch Simulationen erzielen. Voraussetzung dafür ist die Möglichkeit die physikalischen Zusammenhänge durch numerische Modelle beschreiben zu können.

In dieser Arbeit soll das Langzeit-Feuchteverhalten von Brettsperrholzplatten nach Aufbringen von Frischbeton an der Oberseite und unter Innenklimabeanspruchung an der freien Unterseite untersucht werden. Insbesondere soll die Fragestellung behandelt werden, ob es durch den erhöhten Feuchteeintrag im Bereich der Kerven sowohl kurzfristig, als auch langfristig zu kritischen Feuchtezuständen im Holz kommt. Da die erhöhte Feuchtigkeit direkt in der Schubfuge des Kervenvorholzes auftritt, soll untersucht werden ob die Festigkeit in diesem Bereich beeinträchtigt wird. Sind über lange Zeit erhöhte Feuchtefelder im Holz vorhanden, kann das neben einer verringerten Festigkeit unter anderem auch zu Schäden wie Schimmelbildung führen. Es werden dazu Simulationen des kombinierten Feuchte- und Energietransports mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Dabei kommt die kommerzielle Software „Abaqus“ zum Einsatz. Die Interaktion zwischen Holz und Luft ist hinreichend bekannt und wurde eingangs in den Kapiteln 2.1.2.3 und 2.1.3 ausführlich beschrieben. Die Schwierigkeit in dieser Aufgabenstellung stellt der Feuchteeintrag des Frischbetons in das Holz dar. In Kapitel 2.3.3 wurden bereits durchgeführte Versuche zur Feuchteinteraktion zwischen den beiden Werkstoffen vorgestellt. Eine mathematische Beschreibung der physikalischen Vorgänge ist allerdings nicht bekannt. Um die Simulationen durchführen zu können werden deshalb im ersten Schritt die Feuchterandbedingungen und die Übergangskoeffizienten in der Fuge anhand von Versuchsdaten geeicht. Als Grundlage dazu dienen die in [32] durchgeführten Versuche an HBV-Elementen. Weiterführend wird ein Ausschnitt aus einer HBV-Platte modelliert und verschiedene Konfigurationen untersucht. Es werden unterschiedliche Innenraumklimaverhältnisse an der Unterseite, sowie Versiegelungen im Kervbereich aufgebracht. Insgesamt wird die Feuchteausbreitung im Holzkörper über einen Zeitraum von 24 Monaten simuliert.

4.1 Feuchtemessungen an HBV-Elementen aus [32]

Um den Feuchteaustausch zwischen Beton und Holz in den Simulationen berücksichtigen zu können, werden die erforderlichen Parameter in der Fuge zwischen den Werkstoffen anhand der Versuchsdaten in [32] kalibriert. Darin wurden für insgesamt 15 verschiedene Brettsperrholz-Beton-Verbundkörper Feuchtemessungen über die ersten 28 Tage nach Aufbringen des Frischbetons durchgeführt. Der Versuchsumfang umfasst sieben verschiedene Betonmischungen und vier verschiedene Brettsperrholzaufbauten, welche unterschiedlich miteinander kombiniert werden. Die Probekörper besitzen einen Grundriss von 20×20 cm und sind 18 bzw. 20 cm hoch. Es soll ein

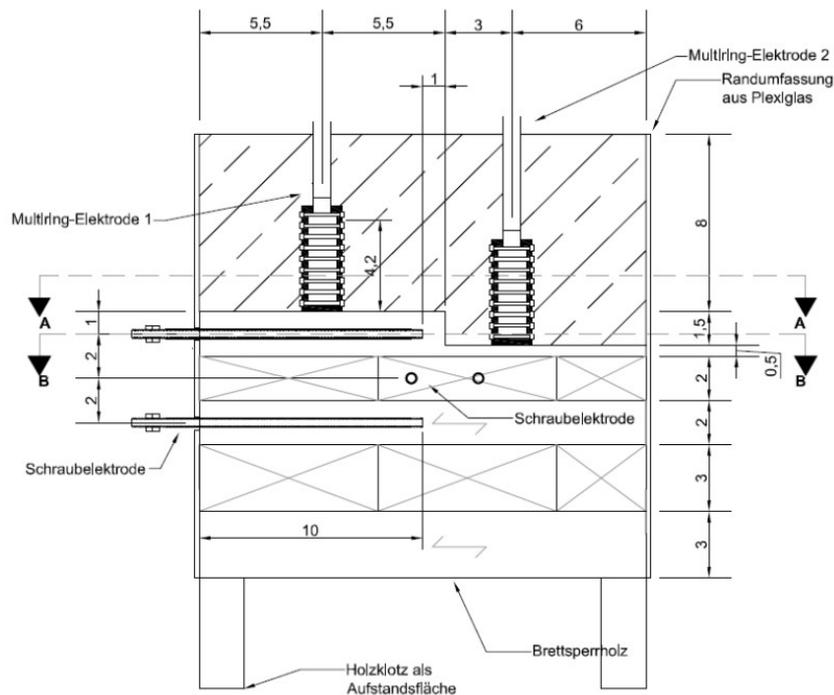


Abb. 4.1: Schnitt durch den Versuchskörper mit Kerbe aus [32]

Ausschnitt aus einer Holz-Beton-Verbundplatte nachgestellt werden. Die verwendeten Brettsperholzplatten unterscheiden sich durch eine ebene oder eine 1,5 cm eingekervte Oberfläche. Als Aufbeton kommen Betonmischungen mit verschiedenen Wasser-Zement-Werten und Zusatzmitteln zum Einsatz. Der Referenzbeton, mit dem jedes vorkommende Brettsperholzelement beaufschlagt wurde, wurde als Normalbeton mit einem Wasser-Zement-Wert von 0,6 hergestellt. Zur Erfassung des Feuchtetransports im Holz wurden mittig in den oberen drei Brettlamellen jeweils zwei Feuchtesensoren (Schraubelektroden) eingebaut. Im Falle der gekervten Oberfläche befindet sich die Spitze des Sensors in der obersten Lamelle etwa 1 cm von der Kervenflanke entfernt. Um das seitliche Entweichen von Feuchtigkeit zu verhindern und einen Feuchtetransport in vertikaler Richtung zu gewährleisten, wurden die Probekörper an den seitlichen Flächen mit Kunststoffplatten abgeschalt. Somit sind nur die Betonoberfläche und die Untersicht der Brettsperholzplatte dem Umgebungsklima ausgesetzt.

Als Referenz für die Simulationen in dieser Arbeit dienen die Probekörper „C“ und „D“. Beide Probekörper besitzen das gleiche Brettsperholzelement und denselben Aufbeton. Die Lamellen der Holzplatte besitzen von oben nach unten Dicken von 2-2-2-3-3 cm. Als Aufbeton wird der oben erwähnte Referenzbeton verwendet. Der Probekörper „C“ (dargestellt in Abbildung 4.1) ist an der Oberfläche 1,5 cm tief eingekervt, Probekörper „D“ besitzt im Vergleich dazu eine ebene Oberfläche.

4.2 Auftretende Feuchteinwirkungen

Um das Feuchteverhalten eines Holz-Beton-Verbundelements realistisch simulieren zu können, ist es von besonderer Bedeutung die Feuchteinteraktion zwischen Holz und Beton sowie zwischen der freien Holzoberfläche und der umgebenden Luft zu erfassen. Nachfolgend wird auf den Ermittlungsprozess der erforderlichen Randbedingungen und Übergangskoeffizienten an den Grenzflächen sowie die zugrundeliegenden Annahmen näher eingegangen.

4.2.1 Kalibrierung der Feuchteaufnahme aus dem Frischbeton

Betrachtet man die in Kapitel 2.1.3 eingeführten Übergangs- und Ausbreitungskoeffizienten im Holz, fällt auf, dass sich die Werte in radialer und tangentialer Richtung größenordnungsmäßig kaum bis gar nicht unterscheiden und deutlich unter den longitudinalen Werten liegen [3]. Die Feuchteaufnahme von Holz fällt in Längsrichtung stärker aus als orthogonal dazu. Das spiegelt sich auch in den Ergebnissen von Muller [32] wieder. Holzfeuchtigkeiten über 30 %, sprich Zustände in denen freies Wasser vorliegt, treten nur in einem Probekörper mit Kerne auf. Diese unterscheiden sich von den Probekörpern mit ebener Oberfläche durch eine mit Beton in Kontakt stehende Oberfläche orthogonal zur Faserrichtung. Dadurch entsteht zusätzlich zum vertikalen Wassereintrag eine Feuchteaufnahme in Faserrichtung. Diese fällt aufgrund des erhöhten Saugverhaltens von Holz in Längsrichtung deutlich stärker aus.

Im ersten Iterationsschritt zur Ermittlung der Feuchterandbedingungen wird zuerst die Holzfeuchteaufnahme aus dem Beton in radialer Richtung nachgestellt. Dafür kommt ein dreidimensionales Modell bestehend aus $1 \times 1 \times 1$ mm großen Elementen zum Einsatz (siehe Abbildung 4.2). Insgesamt besteht dieses aus 104 Elementen, definiert durch 420 Knoten. Das Modell entspricht einem Ausschnitt aus dem Versuchskörper mit einer 1×1 mm großen Grundfläche, der sich über die Dickenrichtung erstreckt. Die roten Punkte markieren die Messpunkte, an

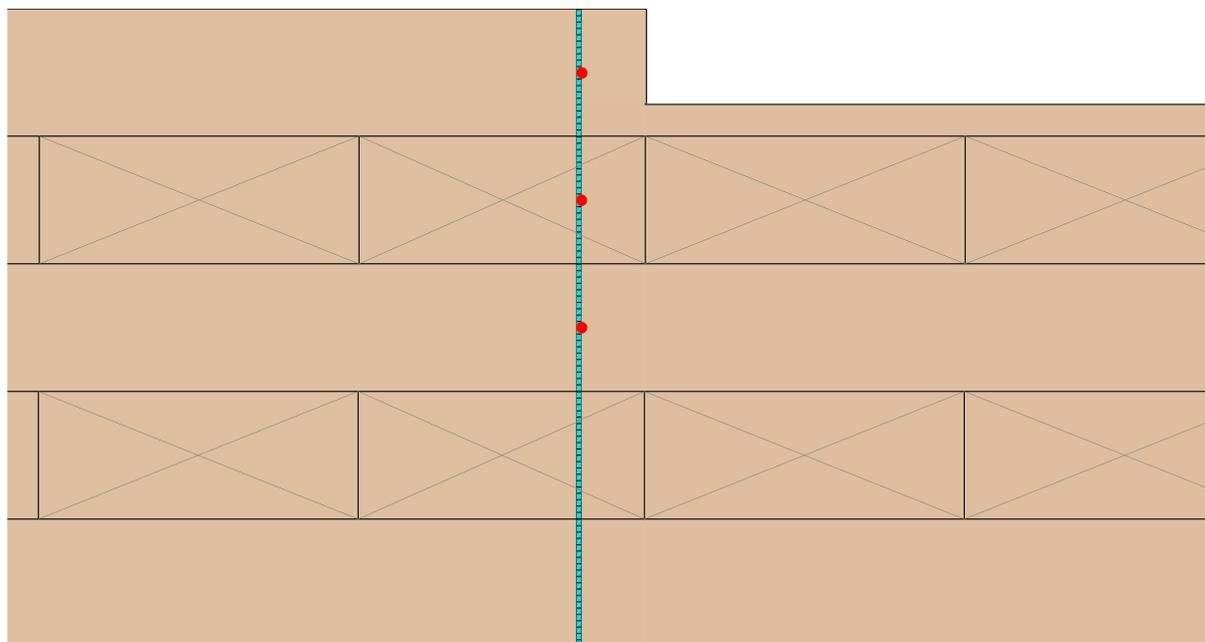


Abb. 4.2: „1D“-Modell – Markierung der Messpunkte am FE-Netz und Situierung in der CLT-Platte

denen die Berechnungsergebnisse ausgewertet werden. Sie liegen in jenen Tiefen in denen im Versuchskörper Messsonden angebracht wurden (siehe Abbildung 4.1). Mit der Modellgeometrie soll eine Reduzierung auf die radiale Transportrichtung erreicht werden, da die Feuchtegradienten in die beiden anderen Richtungen gleich Null sind.

Als erste Referenz aus [32] dient der Probekörper „D“ mit ebener Oberfläche, da in diesem Versuchskörper von einer Feuchteaufnahme rein orthogonal zur Faserrichtung ausgegangen werden kann. Abbildung 4.3 zeigt den Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen in den oberen drei Lamellen aus Muller [32] und den Simulationsergebnissen des „1D“-Modells für die Zunahme der Holzfeuchtigkeit Δu ausgehend von einer Anfangsholzfeuchtigkeit von etwa 12 %. Auf die numerische Implementierung der Randbedingungen und deren Funktionsform über die Zeit wird in Kapitel 4.3.3 eingegangen.

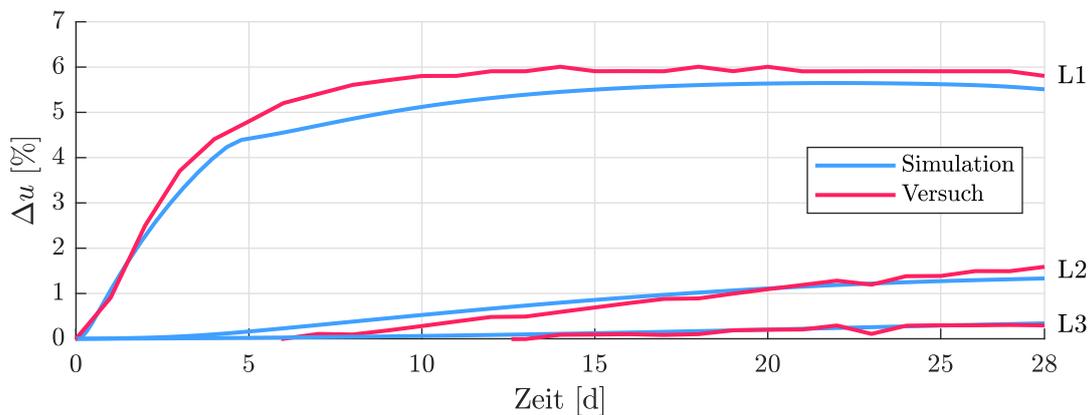


Abb. 4.3: Vergleich von Versuch und Simulation – radiale Richtung (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)

4.2.1.1 Ergänzung der Feuchteaufnahme aus dem Frischbeton in Längsrichtung

Das für die radiale Richtung kalibrierte Modell wird im zweiten Schritt auf eine 1 mm dicke Scheibe mit Einkerbung erweitert. Es wird der Querschnitt von Versuchskörper „C“ nachgebildet. Das Modell erstreckt sich links und rechts der Kerbe um jeweils 3,5 cm und besteht aus insgesamt $6755 \times 1 \times 1 \times 1$ mm großen Elementen, definiert durch 13860 Knoten. In Abbildung 4.4 sind der Modellkörper und die Messpunkte, an denen ausgewertet wird, dargestellt. Diese entsprechen wiederum jenen aus dem Versuchsaufbau von Muller [32].

An der Oberfläche der obersten Lamelle wird die, im vorigen Abschnitt ermittelte, Feuchterandbedingung angebracht. Zusätzlich wird an der Hirnholzfläche der Kervenflanke eine weitere, zweite Randbedingung angesetzt. Dabei wird die Feuchtebelastung durch Wasserdampf einerseits erhöht und zusätzlich dazu freies Wasser eingeführt. Das ermöglicht die Abbildung des über den Fasersättigungspunkt hinausgehenden Feuchteintrag aus dem Beton im Bereich der Kerbe. Die Simulationsergebnisse werden schlussendlich mit den Versuchsmessungen von Probekörper „C“ verglichen.

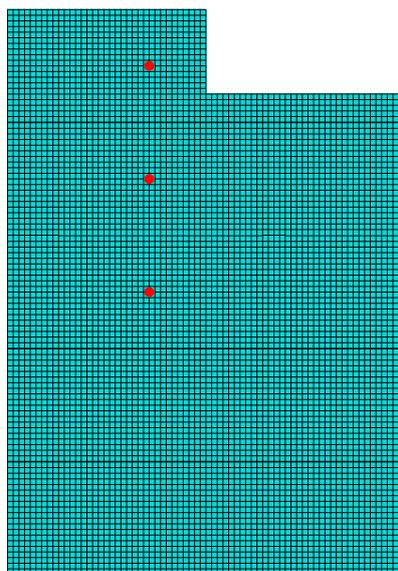


Abb. 4.4: „2D“-Modell – Markierung der Messpunkte

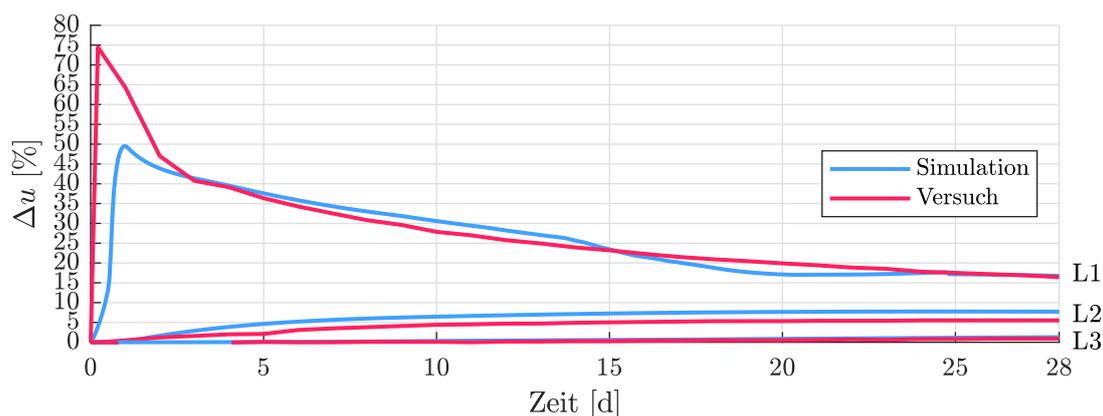


Abb. 4.5: Vergleich von Versuch und Simulation – „2D“-Modell (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)

Wie Abbildung 4.5 zeigt, kann die extreme Spitze von beinahe 75 % Holzfeuchtedifferenz nach fünf Stunden, die im Versuch gemessen wurde, nicht zur Gänze nachgebildet werden. Nach Absinken der Spitze nähern sich allerdings die Simulationsergebnisse den Versuchsergebnissen rasch an. Ab dem Zeitpunkt von etwa drei Tagen nach Aufbringen des Frischbetons kann der Verlauf der Messkurve sehr gut nachgebildet werden. Unter Vernachlässigung dieses kurzzeitig vorhandenen Extremwerts zu Beginn, welcher unter anderem auch auf die Versuchsanordnung zurückzuführen sein kann, werden die Versuchsergebnisse daher gut abgebildet.

4.2.2 Innenraumklima im Wohnbereich

In einer Studie des Fraunhofer-IBP [2] wurden über den Zeitraum von 2002 bis 2005 Temperatur- und Luftfeuchtedaten in mehreren unterschiedlichen Gebäuden aufgenommen. Die Messdaten sind in 10-minütiger Auflösung vorhanden. Für die Simulation werden die Messergebnisse aus zwei Wohnzimmern mit möglichst unterschiedlichen Verläufen ausgewählt. Bei jener mit starken Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit handelt es sich um eine Wohnküche in einem

Studentenwohnheim. Die Daten der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen wird auf diese Messungen als „feuchtes“ Innenklima referenziert. Zusätzlich wird ein möglichst „trockener“ Innenklimaverlauf eines Wohnzimmers ohne Küche gewählt. Die Verläufe sind in Abbildung 4.7 zu sehen. Die beiden gewählten Messkurven sollen die Extremwerte für die auftretenden Feuchtigkeiten in einem Innenraum darstellen.

Bei Betrachtung der Abbildungen 4.6 und 4.7, ist zu erkennen, dass die Luftfeuchtigkeiten über das Jahr verteilt schwanken. Der Verlauf erreicht seine Tiefpunkte im Winter und die Hochpunkte im Sommer. Die Temperaturen hingegen verhalten sich weitgehend konstant und liegen zum Großteil des Jahres im Bereich von 20°C. Lediglich in den Sommermonaten treten etwas höhere Temperaturen auf.

Ein Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeiten zeigt, dass im feuchteren der beiden gewählten Räume die Kurve wesentlich ausgeprägtere Amplituden aufweist. Feuchtigkeiten von 50-60 % werden das gesamte Jahr über erreicht bzw. überschritten. Der Maximalwert tritt mit 84 % relativer Luftfeuchtigkeit Anfang September auf. Das Minimum von 7 % wird im März erreicht.

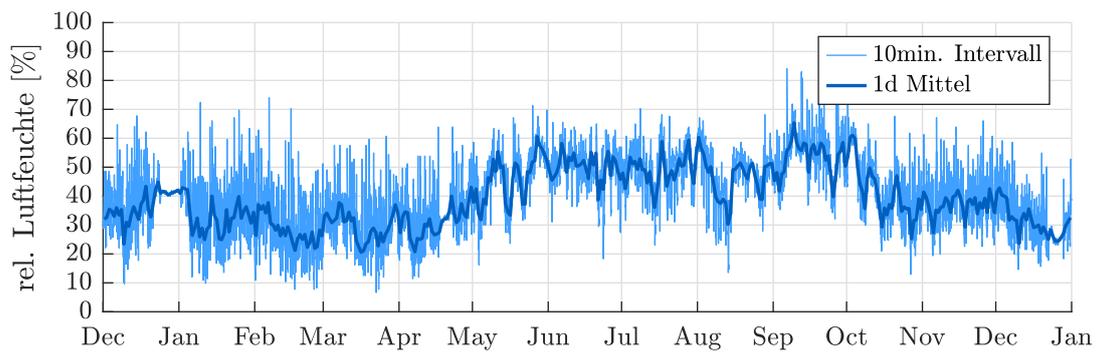
Im trockenen Raum hingegen liegt die gemessene Feuchtigkeit deutlich geringer und verläuft wesentlich konstanter mit geringeren Spitzen. Feuchtigkeiten im Bereich von 50-60 % treten mit einzelnen Ausnahmen nur im Sommer zwischen Ende Mai und August auf. Die Grenze von 60 % wird nur drei Mal überschritten, wobei der Maximalwert mit 63 % Ende Juni auftritt. Die niedrigste gemessene relative Luftfeuchtigkeit liegt Ende Februar bei 13 %.

4.2.3 Aufbereitung der Klimadaten

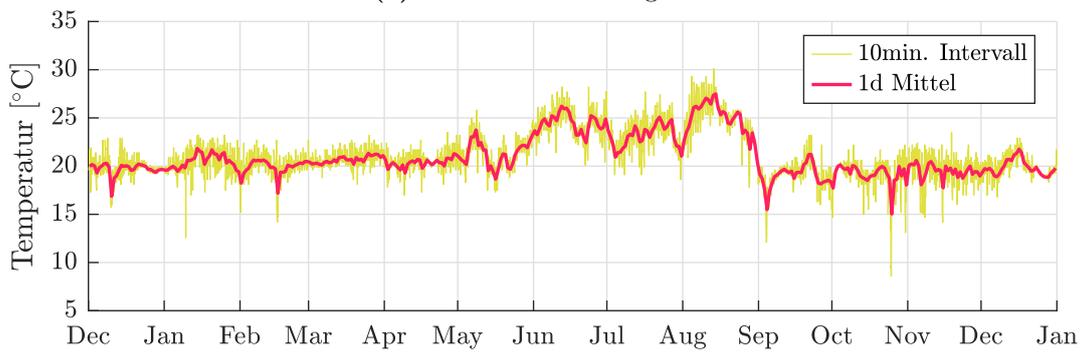
Zur Optimierung der Rechenzeit und um eine höhere numerische Stabilität zu gewährleisten, werden die Aufzeichnungen in einem größeren Intervall als dem ursprünglich vorhandenen 10-minütigen Intervall als Randbedingung aufgebracht. Um herauszufinden mit welcher Genauigkeit es sinnvoll ist die Messergebnisse als Randbedingungen bei der Simulation aufzubringen, werden verschiedene Mittelwerte über einen Tag getestet. Es werden die Werte für den Tagesverlauf der relativen Luftfeuchtigkeit vom 16.07.2003 stundenweise, alle 6 Stunden und über den gesamten Tag gemittelt und dazwischen linear interpoliert. In Abbildung 4.8 sind die gewählten Mittelwerte auf der linken Seite dargestellt und werden mit der gemessenen Kurve verglichen.

Die gemittelten Kurven werden auf das in Kapitel 4.2.1 vorgestellte „1D“-Modell als Randbedingung angesetzt und die Holzfeuchte innerhalb der ersten 10 mm gemessen um die Eindringtiefe der Feuchteschwankungen an der Oberfläche in den Holzkörper zu ermitteln. Die Ergebnisse sind zur jeweiligen gemittelten Oberflächenfeuchtigkeit in Abbildung 4.8 auf der rechten Seite zu sehen.

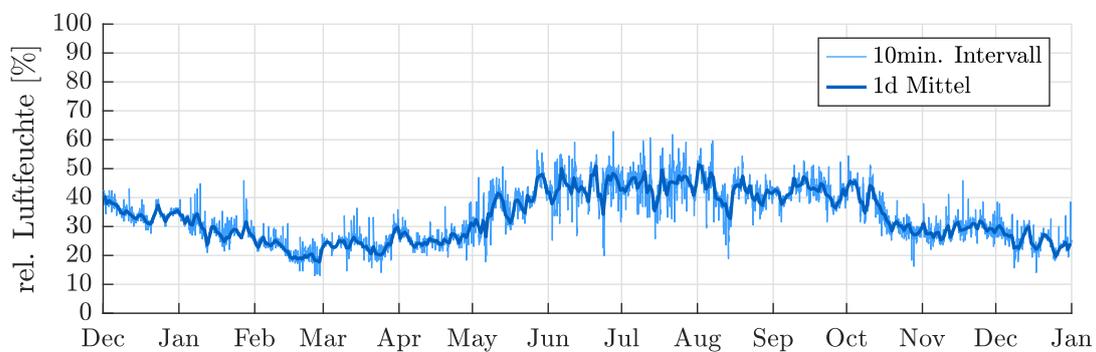
Aus Abbildung 4.8 ist zu erkennen, dass mit der 6-stündigen bzw. der täglichen Auflösung die auftretenden Spitzen über den Tag nicht abgedeckt werden können. Mit der stündlichen Auflösung werden die auftretenden Spitzen hingegen ausreichend erfasst, ohne im Vergleich zur 10-minütigen Auflösung große Verluste zu erzeugen. Eine genauere Auflösung der Daten wäre daher numerisch nicht sinnvoll, da die damit abgedeckten Spitzen nur direkt an der Holzoberfläche zu Änderungen im Feuchteverlauf führen, aber nicht tiefer in den Querschnitt hinein wandern. Kurzzeitige Feuchteschwankungen sind damit für eine Langzeitbetrachtung vernachlässigbar. Die gemittelten Werte werden dann über den Tag, ausgehend von 00:30 Uhr im Stundentakt aufgetragen. Zwischen den Stundenmittelwerten wird der Verlauf linear interpoliert. Da die Simulationen über einen Zeitraum von 24 Monaten durchgeführt werden, müssen die Daten erweitert werden. Es wird von einer Herstellung der Platte Anfang Juni ausgegangen. Der Einbau erfolgt ein Monat danach Anfang Juli. Die aufbereiteten Daten werden daher beginnend von Juli zwei Mal aneinander kopiert um sie auf 24 Monate zu verdoppeln.



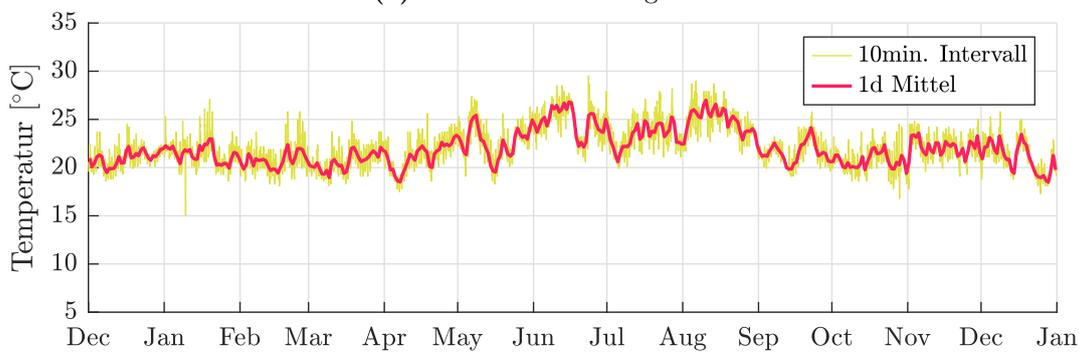
(a) relative Luftfeuchtigkeit



(b) Temperatur

Abb. 4.6: „Feuchtes“ Innenklima: Jahrgang von 1. Dezember 2002 bis 31. Dezember 2003

(a) relative Luftfeuchtigkeit



(b) Temperatur

Abb. 4.7: „Trockenes“ Innenklima: Jahrgang von 1. Dezember 2002 bis 31. Dezember 2003

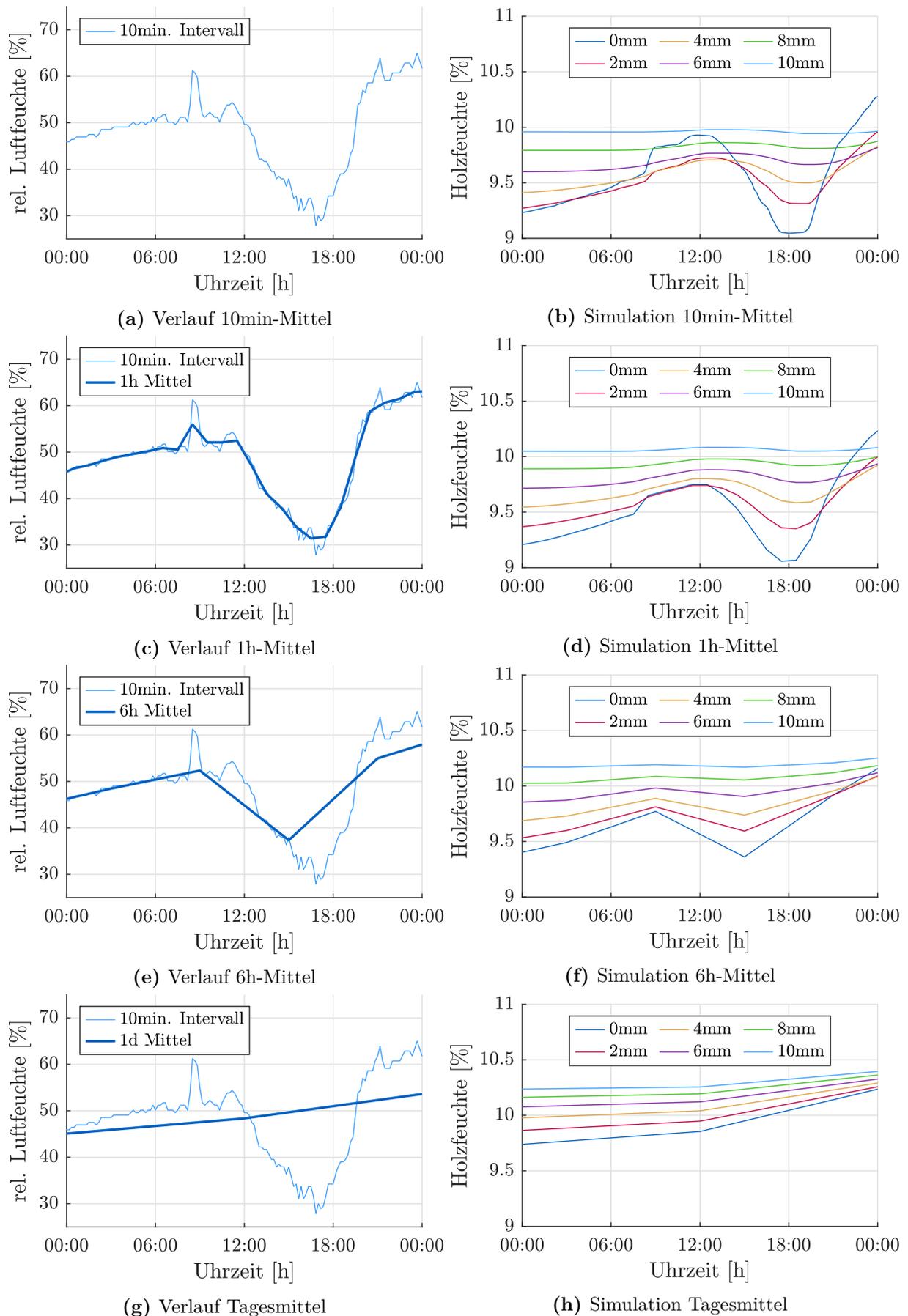


Abb. 4.8: Vergleich der Auswirkung unterschiedlicher Mittelwerte auf die Simulationsergebnisse

4.3 Verwendete Modelle

Für die Langzeitsimulationen wird eine Brettsperrholz-Beton-Verbundplatte mit Aufbeton in Form von Ortbeton oder als Fertigteil betrachtet. Modelliert wird nur der Brettsperrholzteil des Verbundkörpers. Der Feuchteeintrag im Falle von Ortbeton erfolgt über Feuchterandbedingungen an der Holzoberfläche, welche in Kapitel 4.2.1 bestimmt wurden. Außerdem werden an der Unterseite jeweils eine der beiden als „feuchtes“ bzw. „trockenes“ Innenklima bezeichneten Klimazustände aus Kapitel 4.2.2 angesetzt. Auf die genaue numerische Implementierung dieser Feuchterandbedingungen, wird in Kapitel 4.3.3 näher eingegangen.

Neben der unterschiedlichen Befeuchtung soll untersucht werden, wie sich eine Versiegelung der Hirnholzfläche im Kervenbereich auf den Feuchteeintrag aus dem Frischbeton auswirkt. Dazu werden im Modell die Übergangskoeffizienten des Materials genau in diesem Bereich um 50 % bzw. 100 % reduziert.

Zusätzlich zu den Modellen mit Ortbeton an der Oberseite, werden zwei Berechnungen unter Annahme von Betonfertigteilen durchgeführt. In diesem Fall kommt es zu keinem Feuchteeintrag aus dem Beton, da dieser im getrockneten Zustand aufgebracht wird. Die Platte wird von Beginn weg an der Oberseite als versiegelt angenommen. Der Feuchteaustausch findet daher nur an der Unterseite statt. Insgesamt werden die in Tabelle 4.1 angeführten acht Fälle betrachtet.

Tab. 4.1: Verwendete Modelle

Modellbezeichnung	Beton		Versiegelung			Innenklima	
	Frischbeton	Fertigteil	0%	50%	100%	feucht	trocken
CLT+FB_0%_1	×		×			×	
CLT+FB_0%_2	×		×				×
CLT+FB_50%_1	×			×		×	
CLT+FB_50%_2	×			×			×
CLT+FB_100%_1	×				×	×	
CLT+FB_100%_2	×				×		×
CLT+FT_100%_1		×	×			×	
CLT+FT_100%_2		×	×				×

In den nachfolgenden Kapiteln wird näher auf den Aufbau der Modellkörper, die gewählten Annahmen und Randbedingungen eingegangen.

4.3.1 Geometrie, Abmessungen und Annahmen

Bei dem für die Langzeitsimulation verwendeten Modell handelt es sich um einen Ausschnitt einer CLT-Beton-Verbundplatte. Da von einem gleichmäßig über die Oberfläche verteilten Feuchteeintrag aus dem Aufbeton ausgegangen wird, genügt es eine Kerbe mit ihrem Einzugsbereich, wie in Abbildung 4.9 (roter Bereich) dargestellt, zu betrachten. Das Modell kann theoretisch beliebig oft aneinandergesetzt werden, um einen vollständigen Deckenstreifen zu formen. Der Plattenausschnitt hat eine Länge von insgesamt 60 cm und eine Dicke von 12,04 cm. Die obersten drei Lamellen weisen, analog zu Probekörper „C“ aus [32], eine Stärke von jeweils 2 cm auf, die unteren beiden Lamellen sind 3 cm stark. Zwischen den einzelnen Brettlagen wird eine Kleberschicht mit einer Stärke von 0,1 mm modelliert. Die Kerbe hat eine Länge von 20 cm und ragt 1,5 cm tief in die oberste Lamelle hinein. Als Abstand zwischen den Kerven in der vollständigen Platte werden 40 cm angenommen. Dementsprechend erstreckt sich das Modell links und rechts der Kerbe jeweils um weitere 20 cm. Zur Optimierung der Rechenzeit wird die Platte als dreidimensionale Scheibe mit einer Dicke von 2,5 mm modelliert.

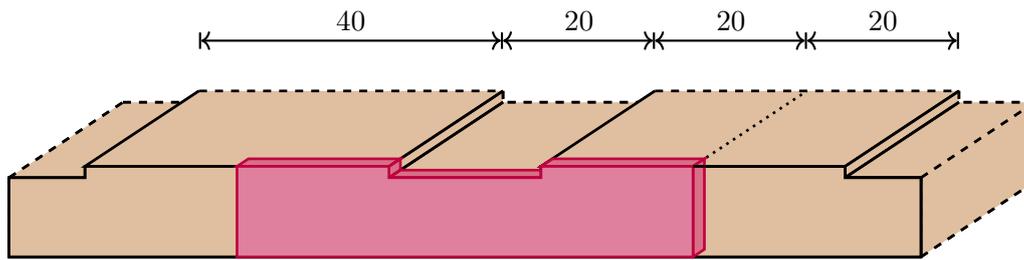


Abb. 4.9: Modellierter Plattenausschnitt

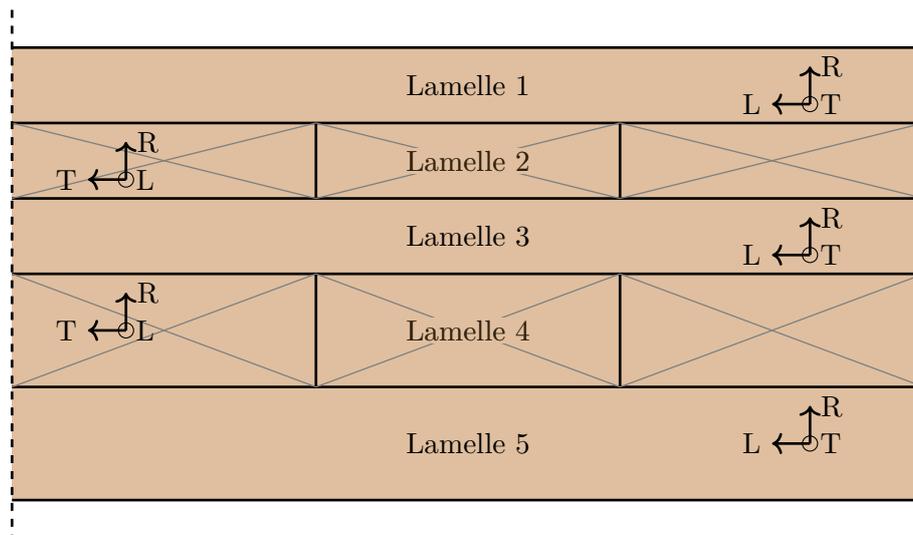


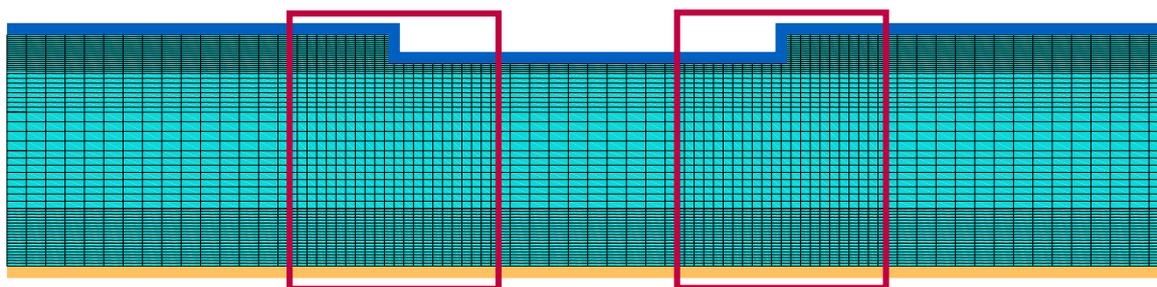
Abb. 4.10: FE-Netz des CLT-Plattenmodells

Der Feuchteintrag ins Modell erfolgt an der Ober- und Unterseite der Platte (siehe blaue und orange Markierung in Abbildung 4.11). Da die oberste und unterste Brettlage somit direkt den Feuchtebeanspruchungen ausgesetzt werden, sind hier die größten Feuchteschwankungen zu erwarten. Um für eine gute Qualität der Ergebnisse zu sorgen, ist das Netz in diesen beiden Lamellen in Dickenrichtung sehr fein gewählt. Zur Querschnittsmitte hin wird das Netz gröber, um die Rechenzeit zu reduzieren. Dasselbe Prinzip kommt auch im Kernenbereich zur Anwendung. Da an der Stirnseite der Kerne sehr hohe Feuchtegradienten zu erwarten sind, ist das Netz im Bereich um die Kante in Längsrichtung über die gesamte Querschnittsdicke verfeinert (rote Markierungen in Abbildung 4.11). Die genauen Elementsabmessungen sind in Tabelle 4.2 angeführt. Das für die Simulation verwendete Modell besteht aus insgesamt 56040 Elementen, definiert durch 72046 Knoten. Es handelt sich um quaderförmige Elemente mit linearen Ansatzfunktionen.

Die Materialrichtungen werden über das Koordinatensystem der Elemente berücksichtigt. Da die Brettlagen in CLT-Platten kreuzweise verleimt werden, muss dies über die Koordinatensysteme der Elemente berücksichtigt werden. Die radiale Richtung ist in allen Elementen in Dickenrichtung orientiert. Die Längs- und Tangentialrichtung rotieren lamellenweise um 90 Grad um die radiale Achse (siehe Abbildung 4.10).

Tab. 4.2: Elementabmessungen des FE-Netzes

Brettlagen	Abmessungen $b \times d \times t$ [mm]	
	außerhalb der Kerve	Kervbereich
Lamelle 1	$10 \times 1 \times 25$	$5 \times 1 \times 25$
Lamelle 2	$10 \times 2,5 \times 25$	$5 \times 2,5 \times 25$
Lamelle 3	$10 \times 5 \times 25$	$5 \times 5 \times 25$
Lamelle 4	$10 \times 3,75 \times 25$	$5 \times 3,75 \times 25$
Lamelle 5	$10 \times 1,5 \times 25$	$5 \times 1,5 \times 25$

**Abb. 4.11:** FE-Netz des CLT-Plattenmodells

4.3.2 Materialkennwerte und Eingangsparameter

Im Folgenden wird auf die Wahl der Materialkennwerte und Eingangsparameter von Holz und Klebstoff zwischen den Brettlagen eingegangen. Der Aufbeton wird im Modell über Feuchterandbedingungen an der Oberfläche berücksichtigt und ist daher nicht modelliert.

4.3.2.1 Holz

Für die Berechnungen wird ein idealisierter Zustand vorausgesetzt. Es wird eine, im Werk fehlerfrei hergestellte, CLT Platte ohne Äste und Eigenspannungen sowie mit konstanter Holzfeuchtigkeit angenommen. Das Bauteil wird aus dem Fertigungswerk mit einem Holzfeuchtegehalt von $u = 12\%$ geliefert. Die Trockenrohddichte ρ_0 des verbauten Holzes beträgt $0,420 \text{ g/cm}^3$ und entspricht einem Wert für Fichtenholz [52]. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% und einer Holztemperatur von 20°C ergeben sich die Anfangsbedingungen für den initialen Gleichgewichtszustand wie folgt:

- NT11: $c_b = 0,0492531 \text{ g/cm}^3$
- NT12: $c_v = 0,1123481 \text{ g/cm}^3$
- NT13: $c_w = 0,0 \text{ g/cm}^3$
- NT14: $T = 293,15 \text{ K}$

Die angeführten Werte für den Holzfeuchtegehalt u , die Trockenrohddichte ρ_0 , die relative Luftfeuchtigkeit und die Holztemperatur entsprechen auch den Materialkennwerten und den Lagerungsbedingungen der Versuchskörper in [32].

4.3.2.2 Kleber

Bei dem in [32] getesteten Probekörper „C“ mit Kerbe wurden die Klebefugen zwischen den Brettlagen mit PUR-Kleber hergestellt. Sowohl die Versuchsergebnisse als auch die, in Kapitel 2.3.3.2 angeführte Literatur, zeigen eine deutliche Beeinflussung der Feuchteweiterleitung über die Klebefuge hinweg, bei Verwendung dieses Klebstoffs [28, 49].

Um dieses Bauteilverhalten auch im Modell abbilden zu können, wird zwischen den einzelnen Brettlagen eine 0,1 mm dünne Kleberschicht modelliert. Die Durchlässigkeitsparameter von Wasserdampf, gebundenem Wasser und freiem Wasser werden in diesen Schichten heruntersetzt. Zur Kalibrierung dienen wiederum die Messergebnisse der beiden Referenzprobekörper „C“ und „D“ aus [32]. Um die Wasserdampfdurchlässigkeit der Kleberschicht zu verringern, werden die Werte des Tensors ξ aus Gleichung (2.18) für alle drei Materialrichtungen auf den Faktor $3 \cdot 10^{-4}$ gesetzt. Zur Steuerung der Durchlässigkeit des gebundenen Wassers werden die Werte im Tensor \mathbf{D}_0 (Gleichung (2.16)) mit dem Faktor $3 \cdot 10^{-4}$ multipliziert. Im Ersten Schritt wird die Veränderung dieser beiden Parameter anhand des Probekörpers „D“ verifiziert, da hier bei den Versuchen kein freies Wasser aufgetreten ist. Abbildung 4.12 zeigt den Vergleich zwischen den Berechnungen mit und ohne Kleber. Es ist zu erkennen, dass bei Weglassen des Einflusses des Klebers auf den Feuchtetransport in der obersten Lamelle geringere Feuchtigkeiten auftreten. Der Wasserdampf kann sich ungehindert tiefer in den Holzkörper ausbreiten und wird nicht in der ersten Lamelle gestaut. In den darunterliegenden Lamellen stellen sich dadurch höhere Feuchtegehalte ein.

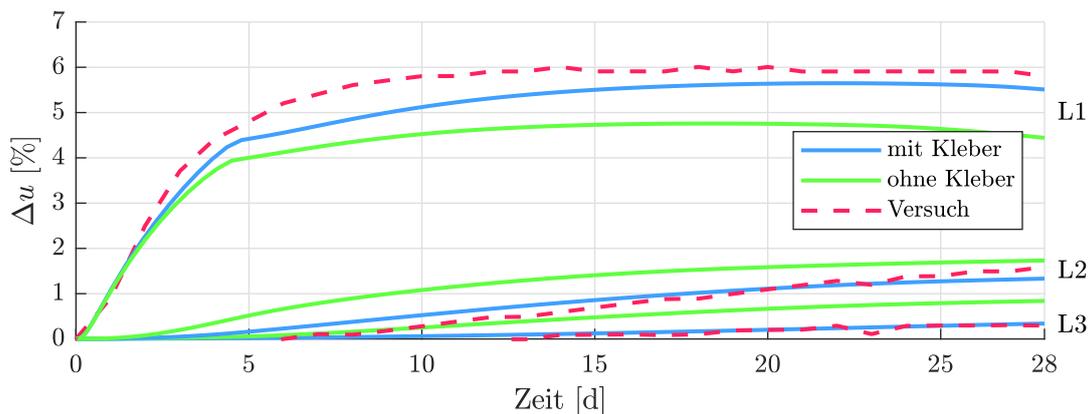


Abb. 4.12: Auswirkung der Kleberschicht auf den Feuchtetransport – ohne freies Wasser (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)

Im zweiten Schritt erfolgt die Berücksichtigung des Verhaltens hinsichtlich freien Wassers. Als Referenz dient der Probekörper „C“, in dem Wassergehalte über dem Fasersättigungspunkt gemessen wurden. Die Abminderung der Durchlässigkeit wird durch Herabsetzen der absoluten Durchlässigkeit K_w aus Gleichung (2.19) auf $K_{w,L} = 5 \cdot 10^{-16}$, $K_{w,R} = 6 \cdot 10^{-19}$ und $K_{w,T} = 5 \cdot 10^{-19}$ erreicht. In Abbildung 4.13 sind die Auswirkungen der Kleberschicht ersichtlich. Es stellt sich dasselbe Verhalten wie vorhin ein. Aufgrund der größeren Feuchtemengen durch das freie Wasser fällt der Unterschied wesentlich deutlicher aus.

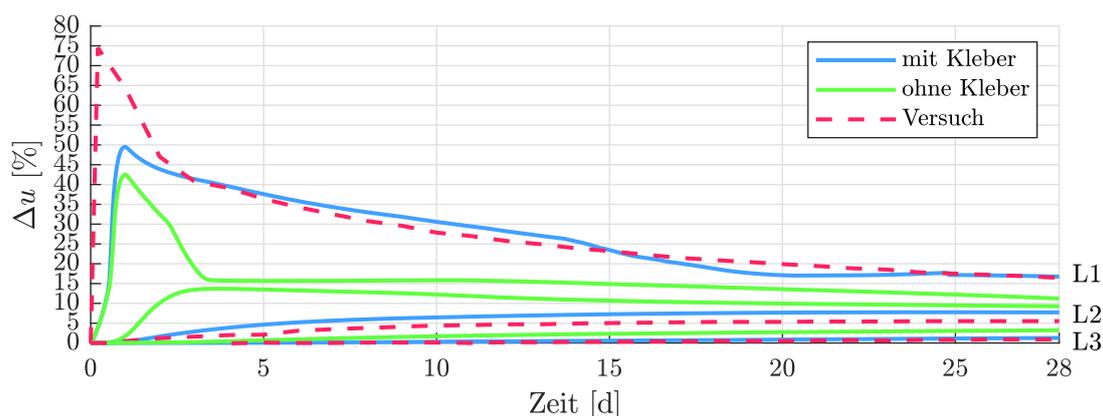


Abb. 4.13: Auswirkung der Kleberschicht auf den Feuchtetransport – mit freiem Wasser (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)

4.3.3 Randbedingungen

In Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 wurde die Vorgehensweise zur Kalibrierung des Feuchteintrags aus dem Frischbeton sowie die Auswahl der Verläufe der Innenklimabeanspruchung auf der freien Oberfläche an der Plattenunterseite beschrieben. Die in Kapitel 2.1.3.6 eingeführten Massenflüsse von freiem Wasser ϕ_w und Wasserdampf ϕ_v an einer freien Holzoberfläche werden über die Übergangskoeffizienten k_{c_w} und k_{c_v} gesteuert. Sie entstehen durch die, an der freien Oberfläche vorliegenden, Randbedingungen. Die numerische Aufbringung der Feuchtebeanspruchung aus dem Beton an der Oberseite und der Umgebungsluft an der Unterseite erfolgt auf zwei unterschiedliche Arten, welche nachfolgend beschrieben werden.

4.3.3.1 Freie Oberfläche an der Deckenunterseite

Durch die Differenz der relativen Luftfeuchtigkeit in der Umgebungsluft und der Holzfeuchtigkeit kommt es zu einem Massenfluss von Wasserdampf ϕ_v an der freiliegenden Holzoberfläche. Freies Wasser tritt nicht auf, weshalb der Übergangskoeffizient k_{c_w} in diesem Fall keinen Einfluss hat. Der Koeffizient für Wasserdampf ermittelt sich nach [3] folgendermaßen:

$$k_{c_v} = \frac{k_T}{\rho_a \cdot c_{p_a}}, \quad (4.1)$$

mit dem Übergangskoeffizienten für Wärmetransport k_T , der Luftdichte ρ_a und der isobaren Wärmekapazität c_{p_a} , die wie folgt definiert sind:

$$\begin{aligned} k_T &= 45 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \\ \rho_a &= \frac{p_{atm} - p_v}{R \cdot T} \\ c_{p_a} &= 1009 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Der Übergangskoeffizient für Wasserdampf wird für den vorliegenden Zustand in jedem Zeitschritt aus k_T ermittelt. Mit der zugehörigen relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur an der Oberfläche, die über den Verlauf der Randbedingungen definiert sind, ergibt sich aus der Feuchtedifferenz der Massenstrom ϕ_v an der Oberfläche.

4.3.3.2 Fuge zwischen Beton und Holz

Für die Aufbringung des Feuchteintrags aus dem Beton wird ein anderer Ansatz, als an der Unterseite gewählt. In der Fuge zwischen Beton und Holz wird angenommen, dass durch die Versiegelung zufolge des Betons keine Feuchteabgabe aus dem Holz möglich ist. Um dieses Verhalten für die Befeuchtung zu erreichen wird die Luftfeuchtigkeit in der Fuge über die ersten 28 Tage konstant mit 99% und die vorhandene freie Wassermenge mit $0,25 \text{ g/cm}^3$ angesetzt. Der Massenfluss in das Holz wird dann über die Übergangskoeffizienten k_{c_w} und k_{c_v} gesteuert. Diese werden manuell festgelegt und über die Zeit ausgehend von der Kalibrierung in Kapitel 4.2.1 verändert. Die Verläufe der Koeffizienten sind in Abbildung 4.14 zu sehen. Wie bei der Kalibrierung bereits erwähnt, wird an der Kervenflanke ein anderer Verlauf gewählt, als auf der Oberfläche. Damit wird der erhöhte Feuchteintrag durch die Kerne nachgebildet.

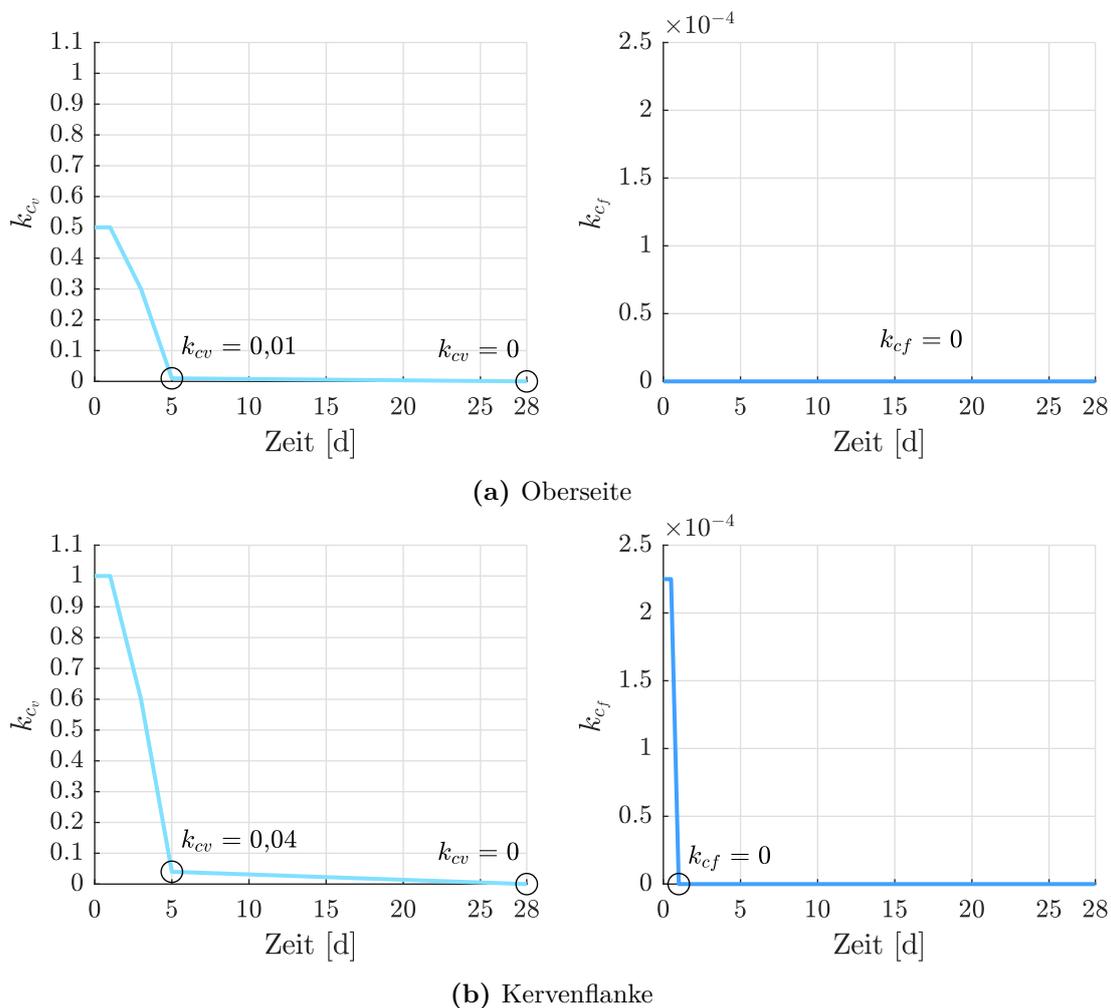


Abb. 4.14: Verläufe der Übergangskoeffizienten k_{c_v} und k_{c_f} in der Fuge zwischen Beton und Holz über die ersten 28 Tage

Versiegelung an der Kervenflanke

Um eine Versiegelung an der Kervenflanke zu simulieren, werden die Übergangskoeffizienten in diesem Bereich herabgesetzt. Es wird zwischen einer Reduzierung der Durchlässigkeit um 50 % bzw. 100 % unterschieden. Unter Verwendung des „1D“-Modells aus Kapitel 4.2.1 wird ermittelt, wie stark die Werte reduziert werden müssen, um die Feuchtespitze in der obersten Lamelle um 50 % zu verringern. Das gewünschte Ergebniss wird durch Multiplizieren der Koeffizienten k_{c_w} und k_{c_v} mit dem Faktor 0,305 erreicht. Für die Versiegelung von 100 % werden beide Übergangskoeffizienten zu Null gesetzt. An der Oberseite gelten in beiden Fällen die Verläufe aus Abbildung 4.14a.



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

Kapitel 5

Ergebnisse und Interpretation

Aus der Feuchtesimulation liegen die Ergebnisse für die in Kapitel 3 eingeführten Freiheitsgrade NT11 bis NT14 für alle Elementsknoten vor. Die Werte werden im Stundentakt ausgegeben. Bei den Freiheitsgraden handelt es sich um die Konzentration des gebundenen Wassers c_b , die Konzentration des Wasserdampfs in den Zellhohlräumen c_v , die Konzentration des freien Wassers c_w sowie die Holztemperatur T . Das gebundene und freie Wasser beziehen sich dabei auf das Gesamtvolumen einer Holzzelle bestehend aus Zellwand und Hohlraum. In Abbildung 5.1 werden die Ergebnisse des Modells ohne Versiegelung im Kervenbereich (CLT+FB_0%) zum Zeitpunkt „28 Tage nach Aufbringen des Frischbetons“ gezeigt. Aufgrund der symmetrischen Ergebnisse im Modellkörper und im Sinne der besseren Lesbarkeit der Ergebnisse wird nur die linke Hälfte des Plattenausschnitts dargestellt. An der Verteilung des gebundenen Wassers ist

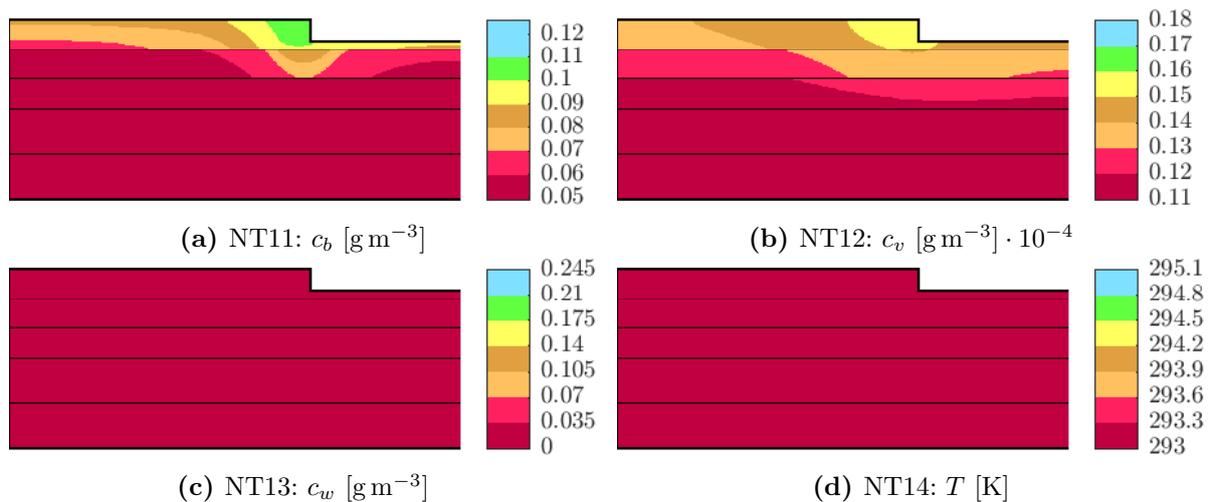


Abb. 5.1: Ergebnisse der Freiheitsgrade aus der Feuchtesimulation nach 28 Tagen für das Modell CLT+FT_0%

der erhöhte Feuchteintrag im Kervenbereich gut sichtbar. Der Einfluss der Kleberschichten auf die Feuchterweiterung im Holz ist an den Sprüngen im Verlauf ebenfalls deutlich zu erkennen. Das zu Beginn eingedrungene freie Wasser ist zum Betrachtungszeitpunkt bereits vollständig in gebundenes Wasser übergegangen. Die gesamte Holzfeuchtigkeit u lässt sich über die Ergebnisse der Konzentration des gebundenen und freien Wassers nach Gleichung (5.1) ermitteln. Theoretisch ist auch der Anteil zufolge der Wasserdampfkonzentration c_v zu berücksichtigen. Dieser ist im Vergleich zu den anderen beiden Wasserphasen jedoch vernachlässigbar klein.

$$u = \frac{c_b + c_w(+c_v)}{\rho_d}. \quad (5.1)$$

Durch die Holzfeuchtigkeit u werden unterhalb des Fasersättigungspunktes die Quell-, Schwind- und Kriechverzerrungen sowie Eigenschaften wie die Steifigkeit und Festigkeit des Holzes beeinflusst. Die Ergebnisse des gebundenen Wassers sind deshalb von besonderer Bedeutung.

Die relative Luftfeuchtigkeit in den Zellhohlräumen steht laut Kapitel 2.1.2.4 zwar in Zusammenspiel mit den anderen beiden vorkommenden Wasserphasen, hat aber im Vergleich zu diesen nur einen indirekten Einfluss auf die Holzeigenschaften und -verformungen.

Die verwendeten Temperaturverläufe für das „feuchte“ und „trockene“ Innenklima (siehe Abbildung 4.6b und 4.7b) weisen Schwankungen im Bereich von wenigen Grad auf. Dementsprechend liegen auch die Änderungen der Holztemperatur in einem vernachlässigbaren Bereich. Der Anteil des Wasserdampfs und der Temperaturverlauf sind für die Betrachtungen in dieser Arbeit daher von zweitrangiger Bedeutung und werden deshalb in den nachfolgenden Kapiteln nicht weiter berücksichtigt.

In Abbildung 5.2 ist die Holzfeuchtigkeit u nach Gleichung (5.1) zum Zeitpunkt „28 Tage nach Aufbringen des Frischbetons“ dargestellt. Da zu diesem Zeitpunkt wie bereits erwähnt kein freies Wasser mehr vorhanden ist, verläuft die Holzfeuchtigkeit analog zum Verlauf des gebundenen Wassers. Es zeigt sich eine Ausbreitung von der Kervenflanke in Plattenrichtung mit erhöhten Feuchtegehalten unmittelbar im Kervenbereich. In einem Abstand von etwa fünf bis zehn Zentimeter links von der Kerne vergleichmäßig sich die Feuchteverteilung und nähert sich der Verteilung im „Regelbereich“ (linker Rand des Modells) an. In Dickenrichtung wandert die Feuchtespitze bis an die Grenze der Lamelle 2. Durch die Kleberschichten kommt es zu einer deutlichen Abschwächung der Weiterleitung zwischen den Lamellen, erkennbar an den Sprüngen im Verlauf.

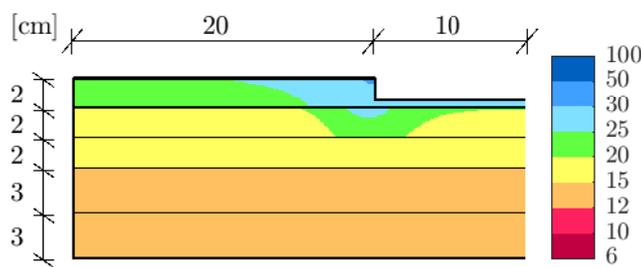


Abb. 5.2: Ergebnis der Holzfeuchtigkeit u in [%] aus der Feuchtesimulation nach 28 Tagen für das Modell CLT+FT_0%

In den nachfolgenden Kapiteln folgt die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse aller verwendeten Modelle. Dazu ist es notwendig die Ergebnisse sowohl zeitlich als auch räumlich zu betrachten. Es wird die Ausbreitung der Holzfeuchte in der gesamten Platte, analog zu Abbildung 5.2, über das erste Monat zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Außerdem wird der Jahresgang der Holzfeuchtigkeit u nach Gleichung (5.1) über den gesamten Simulationszeitraum ausgewertet. Dabei werden entweder einzelne kritische Punkte oder Schnitte durch den Modellkörper betrachtet.

5.1 Modell CLT+FB_0% – unversiegelter Kervenbereich

Der Feuchteeintrag aus dem Frischbeton und die Ausbreitung der entstehenden Feuchtigkeit in der Platte ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Ausgehend vom Startzeitpunkt ist die Holzfeuchte für verschiedene Zeitpunkte zu sehen. Nach dem Aufbringen des nassen Ortbetons bei einer Anfangsholzfeuchte von etwa 12% beginnt diese an den mit Beton in Berührung stehenden Flächen anzusteigen. Speziell im Bereich der Kervenflanke nimmt der Feuchtegehalt sehr rasch zu. Nach 12 Stunden kommt es zu einem lokalen Maximum von 84% an der Fugenoberfläche.

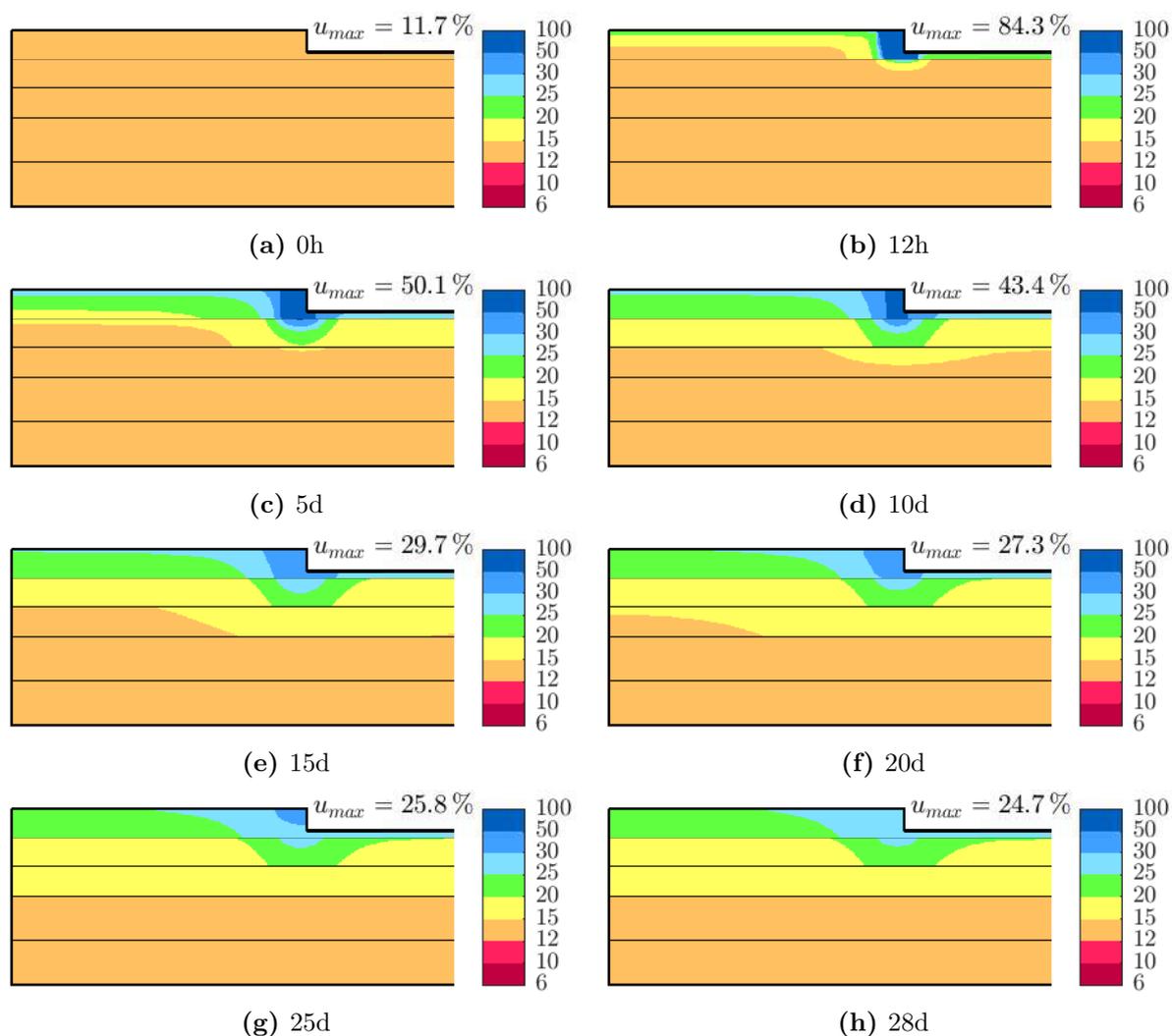


Abb. 5.3: Ergebnisse der Holzfeuchtigkeit u in [%] über die ersten 28 Tage

Ab diesem Zeitpunkt nimmt das vorhandene freie Wasser in der Fuge ab (siehe Verlauf der Randbedingungen in Abbildung 4.14). Ab dem Ende des ersten Tages erfolgt die Feuchtezufuhr nur mehr über Wasserdampf. Die lokal im Kervenbereich konzentrierte, hohe Holzfeuchtigkeit verteilt sich in den darauffolgenden Tagen weiter in Plattenlängsrichtung sowie in Richtung der Plattendicke. Aufgrund der durch die Kleberschicht gestörten Interaktion zwischen den einzelnen Lamellen staut sich die eingedrungene Feuchtigkeit vor allem in der Lamelle 1 an. Es kommt nach fünf Tagen abseits der Kerne im Großteil der Lamelle zu Feuchtigkeiten zwischen 15 % und 20 %. Die erhöhte Feuchtezone mit Feuchtegehalten über 20 % breitet sich um etwa fünf bis zehn Zentimeter weiter in Plattenlängsrichtung aus. Nach 20 Tagen beginnen die Werte langsam zurückzugehen.

Direkt unterhalb der Kerne wandert die Holzfeuchte trotz der verringerten Durchlässigkeit der Kleberschicht relativ rasch in die Lamelle 2. Ab dem fünften Tag ist auch in der Lamelle 2 eine Verteilung in Plattenlängsrichtung zu erkennen. Die Spitze wächst bis zum zehnten Tag zur Grenze zwischen Lamelle 2 und Lamelle 3 weiter. Ab dann beginnt sich auch in der Lamelle 3 die Feuchtigkeit langsam auszubreiten. Die Holzfeuchte wandert dabei wieder ausgehend von der Feuchtespitze unterhalb der Kerne in Plattenlängsrichtung weiter.

Am Ende der ersten 28 Tage stellt sich im Vergleich zur Anfangsfeuchte von 12 % in den Lamellen 1 bis 3 eine erhöhte Holzfeuchtigkeit ein. Feuchtigkeiten über 20 % beschränken sich dabei, mit Ausnahme einer kleinen Spitze unterhalb der Kerne, auf einen Bereich rund um die Kerne in der Lamelle 1 der CLT-Platte. Der restliche Bereich der Lamelle 1 weist einen Feuchtegehalt zwischen 15 % und 20 % auf. In den Lamellen 2 und 3 liegt die Holzfeuchtigkeit zum Großteil zwischen 12 % und 15 %. Die Lamellen 4 und 5 bleiben von der Befeuchtung durch den Beton innerhalb des ersten Monats unbeeinflusst und weisen nach wie vor die Anfangsfeuchtigkeit von etwa 12 % auf. Ausgehend von diesem Zustand wird im Simulationsverlauf von einem Einbau der HBV-Platte auf der Baustelle ausgegangen. Damit kommt es zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Deckenuntersicht durch das vorhandene Raumklima. Im nachfolgenden Abschnitt wird der langzeitige Einfluss der aus dem Beton eingedrungenen Feuchtigkeit sowie die Auswirkung des Innenraumklimas auf der Unterseite untersucht.

5.1.1 Ausbreitung der Feuchte über die Zeit im Bereich der Kerne

Aus den eingehenden Betrachtungen der ersten 28 Tage ist zu erkennen, dass sich die maximalen Holzfeuchtezustände auf einen Bereich um die Kerne beschränken. Um die langfristige Entwicklung in diesem Bereich zu beurteilen wird die Holzfeuchte über die Plattendicke betrachtet. Dazu werden die genauen Verläufe der Holzfeuchte entlang des, in Abbildung 5.4 dargestellten Pfades zwischen Oberseite und Unterseite ausgewertet. Der Pfad verläuft einen Zentimeter links der Kernenkante vertikal durch alle fünf Lamellen. Die Simulationsergebnisse der Holzfeuchte über den gesamten Pfad sind in Abbildung 5.5 für alle vorhandenen Zeitpunkte dargestellt. Abbildung 5.5a zeigt dabei die Ergebnisse bei „feuchtem“ Innenklima an der Unterseite, Abbildung 5.5b die Ergebnisse unter „trockener“ Innenklimabeanspruchung.

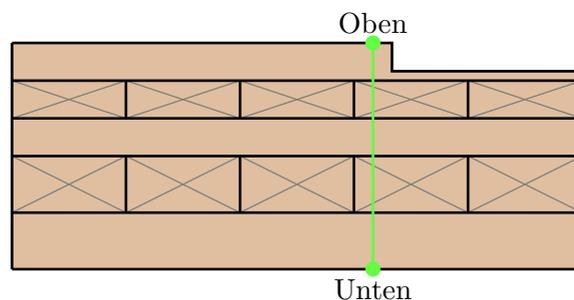
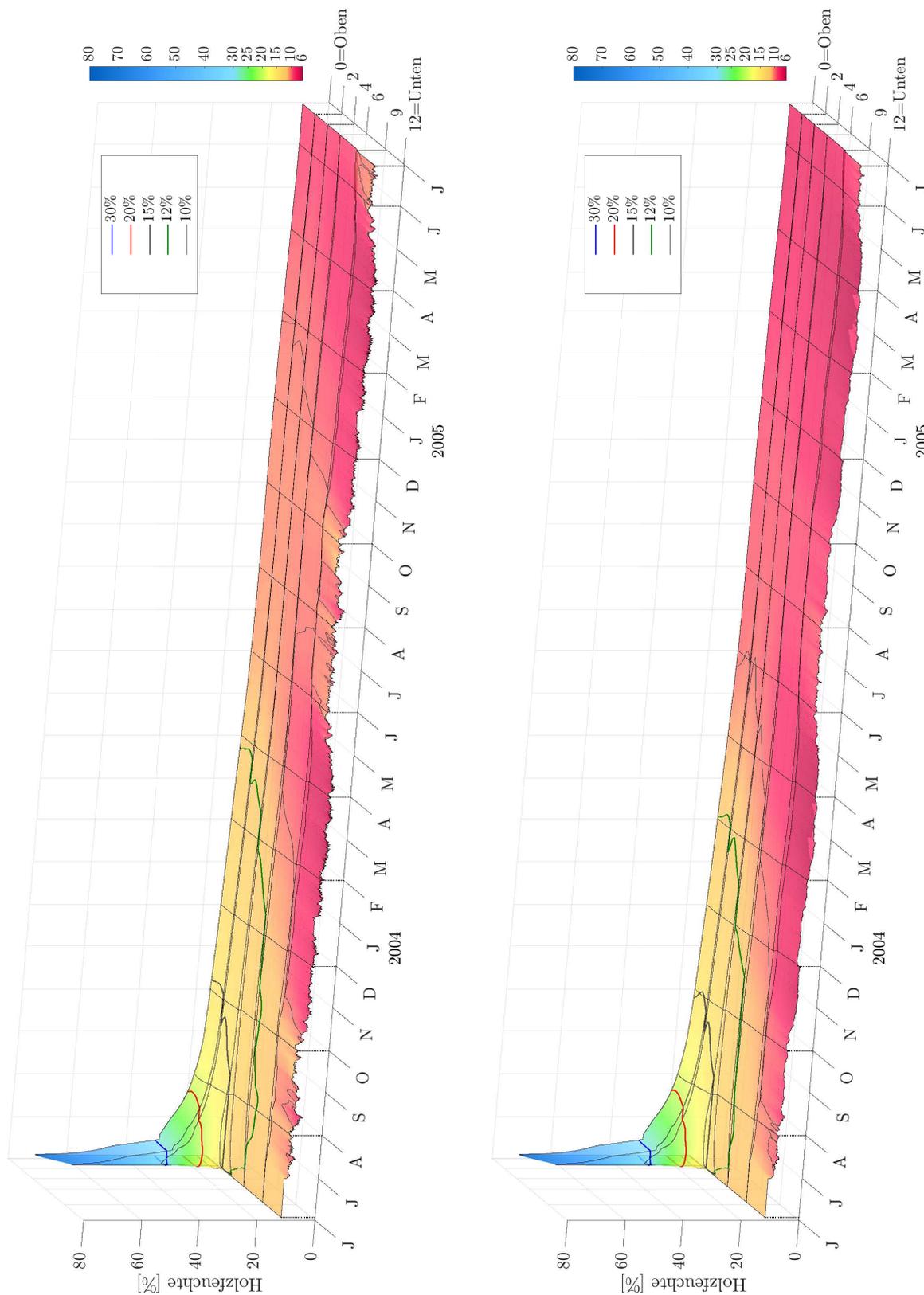


Abb. 5.4: Betrachteter Pfad zur Auswertung der Feuchte über die Zeit

5.1.1.1 Langzeitiger Einfluss der Betonfeuchte

Bei den Simulationen wird davon ausgegangen, dass der Aufbeton noch im Werk auf die Platte aufgebracht wird. Der Einbauzeitpunkt der HBV-Platte auf der Baustelle wird 28 Tage nach Aufbringen des Frischbetons, am 1. Juli 2003 angenommen. Zu diesem Zeitpunkt liegen in der Lamelle 1 und einem kleinen Teil der Lamelle 2 Holzfeuchtigkeiten über 20 % vor. Über die Lamelle 2 und 3 fällt der Feuchtegehalt ab. Bis zur Unterseite der Lamelle 3 sinkt die Feuchtigkeit auf die Anfangsfeuchte von 12 %. Die erhöhte Holzfeuchte in der Lamelle 1 fällt nach dem Einbau im Juli relativ rasch ab. Der Grenzwert von 20 %, markiert durch die rote Höhenschichtlinie, wird noch etwa im zweiten Drittel des Monats unterschritten. Danach flacht der Abfall der Holzfeuchtigkeit in der Lamelle 1 langsam ab. Auch das Gefälle zwischen erster und zweiter Brettlage wird deutlich geringer. Die Feuchtegehalte gleichen sich immer mehr aus und unterscheiden sich nur mehr



(a) feuchtes Innenklima

(b) trockenes Innenklima

Abb. 5.5: Holzfeuchteverlauf über die Plattendicke für das Modell ohne Versiegelung über den Zeitraum von Juni 2003 bis Juni 2005

durch den von der Kleberschicht hervorgerufenen Sprung. Zwischen Mitte September 2003 und Anfang Oktober 2003 wird der Grenzwert von 15 % erreicht. Ab diesem Zeitpunkt wird auch die Differenz zur Lamelle 2 relativ gering und es entsteht eine annähernd gleichmäßige Verteilung über die ersten drei Brettschichten.

Bis hier hin verhalten sich die von der Betonfeuchte beeinflussten Bereiche der CLT-Platte, unabhängig ob „feuchtes“ oder „trockenes“ Innenklima an der Unterseite vorliegt, weitgehend gleich. Zum ersten Mal bemerkbar, wird der Einfluss des Innenklimas beim Erreichen der 12 %-Grenze. Bei Betrachtung der Lamellen 4 und 5 fällt außerdem auf, dass zu Beginn in den Monaten Juli und August des Jahres 2003 die 12 %-Grenze unter „feuchtem“ Raumklima bis in den oberen Bereich der Lamelle 4 ragt. Im weiteren Verlauf beginnt mit Anfang Dezember 2003 die Feuchtigkeit in der Lamelle 3 unter 12 % zu sinken. Gegen Ende März 2004 liegt auch in der Lamelle 1 und somit in der gesamten Platte die Holzfeuchte unter der Grenze. Danach sinkt der Feuchtegehalt nur mehr sehr langsam ab. Es dauert fast elf Monate bis der gesamte Plattenquerschnitt im Bereich der Kerne Ende Jänner 2005 eine Feuchtigkeit unter 10 % aufweist. Aufgrund des „feuchteren“ Raumklimas stellen sich auch von der Unterseite höhere Feuchtegehalte ein und die Betonfeuchte im oberen Bereich der Platte kann weniger rasch nach unten weg entweichen. Am Ende der Simulation stellt sich, mit Ausnahme der Lamelle 5, in der gesamten Platte eine Ausgleichsfeuchte von 9 % ein.

Unter „trockener“ Beanspruchung auf der Unterseite erfolgt die Unterschreitung der 12 %-Grenze von Anfang Jänner 2004 bis Anfang Februar 2004 und damit etwa zwei Monate früher als unter „feuchtem“ Innenklima. Bis Anfang Juni 2004 sinkt die Holzfeuchtigkeit im gesamten Plattenquerschnitt im Bereich der Kerne auf unter 10 % und überschreitet diesen Grenzwert bis zum Ende der Simulation nicht mehr. Im letzten Zeitschritt, Ende Juni 2005, liegt die Holzfeuchtigkeit in Lamelle 1 bis 4 bei etwa 8 %.

5.1.1.2 Einfluss des Innenklimas

„Feuchtes“ Innenklima

Die beim Einbau vorliegende Anfangsfeuchtigkeit von 12 % entspricht der Ausgleichsfeuchte von Nadelholz bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit. Bei Betrachtung des Verlaufes der relativen Luftfeuchtigkeit in Abbildung 4.6a fällt auf, dass dieser Zustand trotz des „feuchteren“ Verlaufes nur durch kurzzeitig vorhandene Spitzen auftritt, sich aber nie längerfristig einstellt. Der Einbau der HBV-Platte erfolgt im Juli 2003. In dieser Zeit treten die höchsten Werte im Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit auf. Dennoch fällt die Holzfeuchtigkeit an der Unterseite der Platte nach dem Einbau zuerst leicht ab. Bis Mitte Oktober 2003 schwankt der Feuchtegehalt in Lamelle 5 zwischen 10 % und 12 %. In den darauffolgenden Herbst- und Wintermonaten fällt die Feuchtigkeit dann dauerhaft auf unter 10 % ab. Gegen Ende Jänner 2004 weitet sich der Einfluss des Innenklimas auch auf die Lamelle 4 aus. Bis zu diesem Zeitpunkt war diese noch weitgehend unbeeinflusst. Im Mai 2004 beginnt die relative Luftfeuchtigkeit wieder leicht anzusteigen und mit ihr auch die Holzfeuchte an der Unterseite. Über die Sommermonate von Anfang Juni 2004 bis Ende September 2004 wird die Grenze von 10 % leicht überschritten. Wie schon im Jahr davor, fällt die Holzfeuchtigkeit Mitte Oktober 2004 auf unter 10 % ab und bleibt bis zum Ende des Frühjahrs unter dem Grenzwert.

Bis zum Beginn des Winters im Jahr 2004 wird die erhöhte Feuchtigkeit aus dem Beton an der Oberseite der Platte in der Zwischenzeit weitgehend abgebaut. Im Frühjahr 2005 ergibt sich dann eine relativ gleichmäßige Feuchteverteilung unter 10 % über den Querschnitt. Im Sommer am Ende des Simulationszeitraums wächst die Feuchtigkeit dann nur mehr in Lamelle 5 auf über 10 %.

„Trockenes“ Innenklima

Beim „trockenen“ Verlauf wird der zur Anfangsfeuchtigkeit äquivalente Umgebungsluft-Zustand von 65 % relativer Luftfeuchtigkeit und 20 °C über das gesamte Jahr nie erreicht (siehe Abbildung 4.7a). Erwartungsgemäß fällt somit auch hier die Holzfeuchtigkeit in der Lamelle 5 gleich nach dem Einbau rasch ab. Nach nur einem Monat liegt die Feuchtigkeit in der gesamten Lamelle 5 unter 10 %. Ab Ende Oktober 2003 beginnt auch in der Lamelle 2 von unten der Einfluss der Trocknung sichtbar zu werden. Mit Anfang Februar 2004 unterschreitet auch die gesamte Lamelle 4 den 10 %-Grenzwert.

Wie schon in Kapitel 5.1.1.1 erwähnt, ist nach knapp einem Jahr die erhöhte Feuchtigkeit zufolge des Frischbetons weitgehend abgebaut. Es sinkt die Feuchtigkeit im gesamten Plattenquerschnitt auf unter 10 % ab. Der Einfluss der Schwankungen in der relativen Luftfeuchtigkeit auf der Unterseite macht sich ab diesem Zeitpunkt nur mehr in der Lamelle 5 bemerkbar. Im Vergleich zum „feuchten“ Innenklima ist beim „trockenen“ Innenklima der Einfluss auf die globale Holzfeuchtigkeit noch geringer.

5.1.2 Vergleich zwischen Frischbeton und Fertigteil - Modell CLT+FT_100%

Um einen Vergleich zum Feuchteverhalten in der CLT-Platte ohne Feuchteeintrag aus dem Beton herzustellen, wird ein Modell unter Annahme einer aufgeklebten Beton-Fertigteilplatte betrachtet. Dazu wird die Holzoberfläche an der Oberseite wie beim Ortbeton als versiegelt angenommen, jedoch findet keine Feuchtebelastung durch den Beton statt, da dieser im bereits erhärteten Zustand aufgebracht wird. Dementsprechend weist die CLT-Platte zu Beginn der Simulation gleichmäßig über das gesamte Modell eine Anfangsfeuchte von 12 % auf.

In Abbildung 5.6 ist die Auswertung entlang des selben Schnittes wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse ist hinsichtlich der Anpassung an die Umgebungsfeuchte an der Unterseite ein ähnliches Verhalten wie bei dem Modell mit Ortbeton zu erkennen. Zu Simulationsbeginn fällt die Holzfeuchte der Lamelle 5 leicht ab, und schwankt dann über den restlichen Sommer zwischen knapp unter 10 % und etwa 12 %. Ab Mitte Oktober 2003 beginnt die Lamelle 5 vollständig unter 10 % auszutrocknen. Anfang Dezember 2003 sinkt, ausgehend von der Lamelle 4, auch in der restlichen Platte die Holzfeuchtigkeit ab. Die Holzfeuchtigkeit wandert langsam von oben nach unten wo sie durch den Desorptionsprozess an die Umgebung abgegeben wird. Mitte April 2004 hat die gesamte Platte die 10 %-Grenze unterschritten. Die Holzfeuchtigkeit vergleichmäßig über die Plattenhöhe und wandert dann langsam in Richtung der Ausgleichsfeuchte. Der Einfluss aus den Feuchteschwankungen an der Unterseite beschränkt sich somit nach einem dreiviertel Jahr auf die Lamellen 4 und 5, wobei die Lamelle 5 deutlich stärker darauf reagiert. Zum Ende der Simulation weist der Großteil der Platte eine Holzfeuchtigkeit von 8,8 % auf.

Vergleicht man die Ergebnisse der Modelle mit nassem Ortbeton (Abbildung 5.4) mit denen der unversiegelten Modelle mit Fertigteil (Abbildung 5.6) bestätigen sich die Erkenntnisse aus Kapitel 5.1.1 erneut. Aufgrund der Betonfeuchte kommt es unter „feuchtem“ Innenklima beinahe ein Jahr später zu einer Vergleichmäßigung der Holzfeuchte über den gesamten Plattenquerschnitt. Sobald allerdings die Feuchtigkeit an der Oberseite ab Ende Oktober 2003 unter 15 % gefallen ist, liegt die Differenz zwischen den beiden Modellen im Bereich von 1-2 % Prozent.

5.1.3 Feuchteverlauf in der Schubfuge

Die Literaturrecherche in Kapitel 2.1.2.1 zeigt, dass erhöhte Feuchtegehalte im Holz einen erheblichen negativen Einfluss auf Steifigkeit und Festigkeit haben. In dem in dieser Arbeit betrachteten CLT-Plattenausschnitt treten die erhöhten Feuchtezustände durch den nassen Aufbeton in einem besonders kritischen Bereich auf. Über die Kerne wird der Verbund zwischen Beton und Holz hergestellt. Es werden die Schubkräfte in der Fuge über die Kervenflanke in das Holz übertragen (siehe Abbildung 2.14). Dementsprechend ist in der Schubfuge im Anschluss an die Kerne mit erhöhten Schubspannungen zu rechnen. Dass gerade in diesem Bereich die Schubfestigkeit durch eine erhöhte Holzfeuchtigkeit herabgesetzt wird ist denkbar ungünstig.

Um die Auswirkungen der Feuchtespitzen im Bereich der Kerne auf die Schubfuge zu beurteilen werden die Ergebnisse entlang des in Abbildung 5.7 dargestellten Pfades in der Schubfuge an ausgewählten Punkten ausgewertet. Die bisherige Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass sich der Feuchteintrag aus dem Beton und die Ausbreitung ebendieser über die ersten Monate unabhängig vom Innenklima an der Unterseite verhalten. Auf eine Unterscheidung zwischen „feuchtem“ und „trockenem“ Innenklima wird daher verzichtet. Abbildung 5.8 zeigt die Verläufe der Holzfeuchte an den ausgewählten Punkten über die ersten zehn Monate. Die Ergebnisse sind nur für das „feuchte“ Innenklima dargestellt.

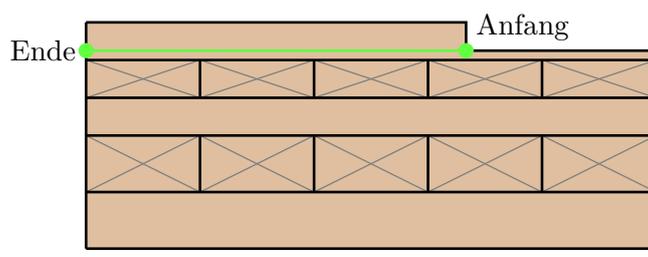


Abb. 5.7: Pfad zur Ergebnisauswertung in der Schubfuge

An der Oberfläche direkt in der Ecke der Kerne, am Punkt A, tritt erwartungsgemäß eine sehr starke Feuchtespitze von über 70 % auf. Diese fällt allerdings sehr rasch wieder ab. Noch im ersten halben Monat sinkt die Feuchtigkeit unter den Fasersättigungspunkt. Bis zum Einbauezeitpunkt Anfang Juli 2003 fällt sie weiter auf etwa 24 % ab.

Über die ersten fünf Zentimeter der Schubfuge kommt es nach der anfänglichen Spitze zu einem starken Abfall der Holzfeuchtigkeit. Der Feuchtegehalt steigt von Beginn an deutlich langsamer an, als an der Oberfläche und erreicht maximal 20 %. Noch einmal fünf Zentimeter weiter innen ist die Feuchtigkeit auf einen maximalen Wert von etwa 17 % begrenzt. Von diesem Punkt bis ans Ende der Schubfuge variieren die Verläufe der Holzfeuchtigkeit dann kaum mehr.

Ungefähr drei Monate nach Aufbringen des Frischbetons, Mitte August 2003, hat sich in der gesamten Schubfuge, von Punkt A nach Punkt E, eine annähernd gleichmäßige Holzfeuchtigkeit von 15 % eingestellt. Wie schon in Kapitel 5.1.1.1 festgestellt wird ungefähr Ende März 2004 die 12%-Grenze unterschritten. Bis zum Ende der Simulation nähert sich der Feuchtegehalt langsam der Ausgleichsfeuchte an.

5.1.4 Fazit / Interpretation der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen des unversiegelten Modells ist der erhöhte Feuchteintrag aus dem Beton an der Oberseite der CLT-Platte deutlich zu erkennen. Vor allem zu Simulationsbeginn, unmittelbar nach Aufbringen des Frischbetons, stellt sich mit einem Maximum von 84 % eine sehr hohe Feuchtespitze ein. Der Einfluss der Betonfeuchte begrenzt sich allerdings auf einen lokalen

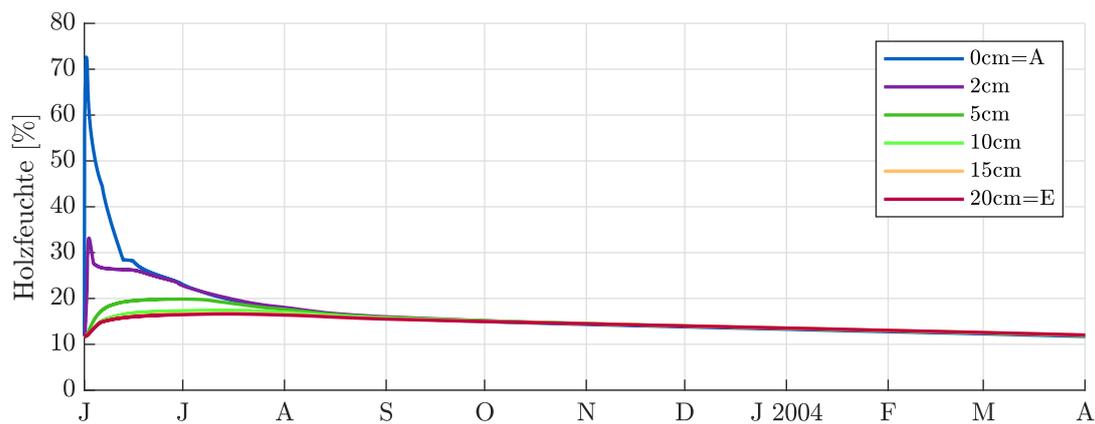


Abb. 5.8: Auswertung an gewählten Punkten entlang der Schubfuge über 10 Monate für Modell CLT+FB_0%

Bereich um die Kerne herum. Insgesamt führt der Feuchteintrag in der Fuge zwischen Holz und Beton zu einem Feuchteanstieg bis in die Lamelle 3. Der Bereich in dem die Holzfeuchtigkeit mehr als 20 % aufweist und bis über den Fasersättigungspunkt steigt beschränkt sich auf die Lamelle 1. Dies spiegelt sich auch in Abbildung 5.9 wieder. Darin wird der prozentuale Anteil des Gesamtvolumens gezeigt, der eine Holzfeuchtigkeit über einem Grenzwert von 12 % (NKL2), 20 % (NKL3) bzw. 30 % (FSP) aufweist. Es handelt sich dabei um die Ergebnisse für das Modell unter „feuchtem“ Innenklima. Nach anfänglichem Ausbreiten der Feuchtespitze im Kernenbereich zeigt sich, dass zwischen 50 % und 60 % des Modellkörpers einen Feuchtegehalt von über 12 % aufweisen. Dieser Zustand hält sich bis etwa Anfang Dezember 2003. Ab dann fällt die Feuchtigkeit nach und nach auf unter 12 % ab.

Der Grenzwert von 15 % Holzfeuchtigkeit wird bereits in weniger als 20 % des Gesamtvolumens überschritten. Das bedeutet, dass der Großteil des Feuchteanstiegs zufolge des Frischbetons im Bereich von 0-3 % liegt.

Mit maximal 7 % Volumensanteil überschreitet, auf das Gesamtvolumen betrachtet, nur mehr ein relativ kleiner Anteil den Grenzwert von 20 %. Die Überschreitung begrenzt sich auf einen kurzen Zeitraum innerhalb der ersten eineinhalb Monate. Der Anteil des Körpers, welcher einen Feuchtegehalt von 30 % übersteigt, beträgt weniger als 2 %.

Der Feuchteintrag aus dem Frischbeton führt demnach in etwas mehr als der Hälfte der CLT-Platte zu einem Anstieg über die Anfangsfeuchte von 12 %. Ein Vergleich mit Abbildung 5.5 bestätigt, dass der Feuchtegehalt in diesem Bereich zum Großteil zwischen 12 % und 15 % liegt und nur in einem sehr kleinen Bereich um die Kerne auf über 20 % bzw. 30 % Holzfeuchtigkeit ansteigt. Da sich auf das Gesamtvolumen betrachtet ein relativ geringer Feuchteanstieg ausbildet, besteht im Gesamtquerschnitt keine Gefahr von hohen feuchteinduzierten Kriechdeformationen. Die experimentellen Untersuchungen von Michelfelder [31] zeigen, dass die Kerne grundsätzlich als steifes Schubverbindungsmittel betrachtet werden kann. Nach den, in Kapitel 2.1.2.1 zusammengefassten, Untersuchungen von [16] führen jedoch die hohen Feuchtegehalte im Kernenbereich zu einer Abminderung der Verbindungsmittelsteifigkeit in der Anfangsphase, nach Aufbringen des Frischbetons. Dies kann wiederum zu erhöhten Verformungen des gesamten Bauteils führen.

Insgesamt erstreckt sich der merkbare Einfluss der Betonfeuchte, je nach Innenklimabedingungen, über neun bis zehn Monate. Danach liegt der Feuchtegehalt in der gesamten Platte unter der Anfangsfeuchtigkeit und gleicht sich über die Plattendicke aus. Ab diesem Zeitpunkt beginnt der Einfluss des Innenklimas an der Unterseite deutlicher zu werden. Je nachdem ob dieses eher „feucht“ oder eher „trocken“ ist, findet das weitere Austrocknen der Betonfeuchte

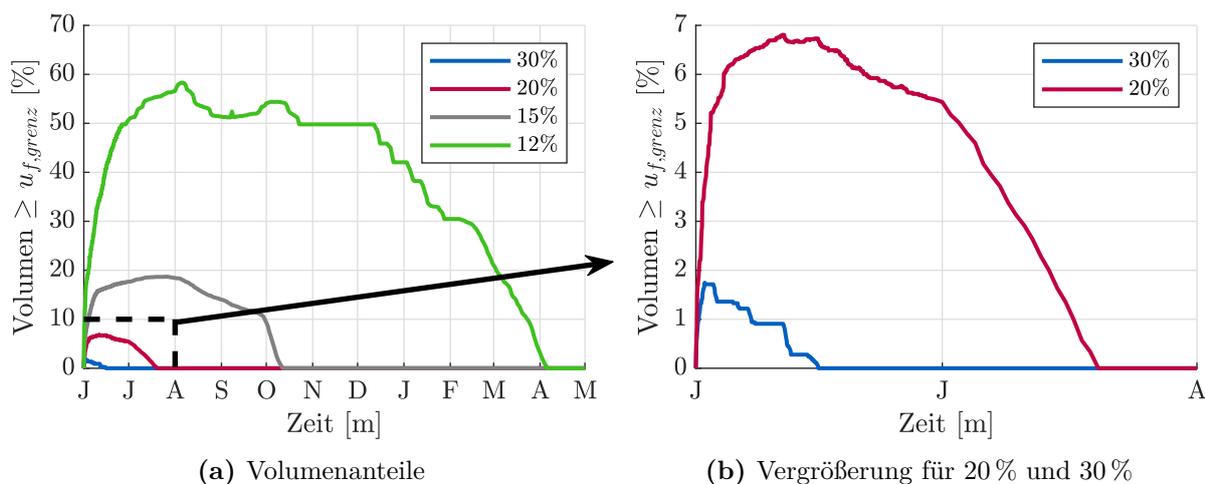


Abb. 5.9: Zeitlicher Verlauf der Flächenanteile der gesamten Platte die 12 % (NKL1), 20 % (NKL2) bzw. 30 % (FSP) Holzfeuchtigkeit überschreiten

mehr oder weniger schnell statt. Der Hauptteil der Auswirkungen des Raumklimas beschränkt sich allerdings mit Ausnahme der Sommermonate auf die Lamelle 5. Der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit an der Plattenunterseite auf die Feuchteausbreitung im oberen Plattenbereich ist demnach im Innenbereich von vernachlässigbarer Größenordnung.

5.1.4.1 Beurteilung der erhöhten Feuchtigkeit im Kervbereich

In dem Bereich der Kerne, die eine Holzfeuchtigkeit um 20 % und noch höher aufweist, kommt es zu der in Kapitel 2.1.2.1 beschriebenen feuchteinduzierten Abminderung der Holzfestigkeit. Die in Kapitel 2.3.3.3 beschriebenen Untersuchungen aus [31] zeigen, dass in der Ecke der Kerne eine Schubspannungsspitze auftritt, welche sich über die anschließende Schubfuge abbaut (siehe Abbildung 2.14). Die Tragfähigkeit einer Kervenverbindung ist daher maßgebend vom Schubwiderstand in Faserrichtung in der Schubfuge abhängig.

In Kapitel 2.1.2.1 wird das Ausmaß der Festigkeitsabminderung zufolge erhöhter Holzfeuchtigkeit beschrieben. Demnach fällt bei einem Holzfeuchtegehalt von 20 % die Schubfestigkeit in Faserrichtung $f_{v,L}$ auf 80 % der Festigkeit, die bei einer Ausgleichsfeuchte von 12 % vorhanden ist ab. Ist die vollständige Fasersättigung im Holz erreicht sinkt die Schubfestigkeit auf nur mehr 65 % des Vergleichswertes unter der Ausgleichsfeuchte ab.

Die Auswertung der Ergebnisse entlang der Schubfuge zeigt, dass sich die erhöhte Feuchtigkeit in Plattenlängsrichtung über die ersten zehn Zentimeter rasch abbaut (siehe Abbildung 5.8). Vergleicht man den Verlauf der Holzfeuchtigkeit in der Schubfuge mit dem qualitativen Verlauf der Schubspannungen in der Schubfuge in Abbildung 2.14 wird allerdings deutlich, dass der Bereich der Schubfuge mit der stärksten Feuchtebelastung auch jener ist, in dem die größten Schubspannungen wirken. Zum in dieser Arbeit angenommenen Einbauzeitpunkt ist der Großteil der Feuchtespitze in der Schubfuge schon abgebaut. Das Maximum direkt in der Kervenecke beträgt zu diesem Zeitpunkt 23 % und fällt in Plattenlängsrichtung rasch auf unter 20 %. Theoretisch ist ein Einbau allerdings schon ab dem Zeitpunkt, zu dem der Aufbeton eine gewisse Mindestdruckfestigkeit erreicht hat möglich. Erfolgt der Einbau schon zu einem früheren Zeitpunkt als in dieser Arbeit angenommen, ist die Auswirkung der Feuchtigkeit in der Schubfuge in der Anfangsphase noch größer.

5.1.4.2 Beurteilung der Berücksichtigung der Holzfeuchte in der Bauteilbemessung nach Eurocode 5

Der Eurocode 1 gibt an wie unterschiedliche Klimabedingungen in der statischen Nachweisführung berücksichtigt werden müssen. Dabei werden unter anderem Informationen zu Schneelasten [36], Windlasten [37] und Temperatureinwirkungen [38] gegeben. Auf die Beanspruchung durch Feuchtigkeit wird jedoch nicht näher eingegangen. Wie in Kapitel 2.1.2.1 beschrieben haben erhöhte Feuchtegehalte einen erheblichen Einfluss auf das Verformungsverhalten, sowie die Festigkeit und Steifigkeit von Holz. Im Eurocode 5 [39] wird dieses Materialverhalten durch Einteilung in sogenannte Nutzungsklassen (NKL) sowie durch Abminderung des Bauteilwiderstands durch Modifikationsbeiwerte berücksichtigt.

Im nachfolgenden Abschnitt wird die normative Berücksichtigung der Holzfeuchtigkeit mit den auftretenden Feuchtefeldern des in dieser Arbeit untersuchten Versuchskörpers gegenübergestellt und verglichen.

Einordnung in Nutzungsklassen

Wie in Kapitel 2.1.2.3 bereits beschrieben steht der Feuchtegehalt im Holz in direktem Zusammenhang mit dem Umgebungsklima. Die Temperatur und Feuchtigkeit im Holz passen sich den Umgebungsbedingungen an. Durch dieses feuchteabhängige Verhalten von Holz kommt es zu Volumsveränderungen im Holzkörper in Form von Quellen und Schwinden. Zusätzlich sind auch die Festigkeiten, sowie die Steifigkeiten des Holzes von der Feuchtigkeit abhängig. So wirken sich erhöhte Feuchtegehalte negativ auf die Holzeigenschaften aus (siehe Kapitel 2.1.2.1).

Um die vorliegenden Klimabedingungen bei der Bauteilbemessung zu berücksichtigen, erfolgt, nach dem nationalen Anwendungsdokument des Eurocodes 5 [35], eine Einteilung in Nutzungsklassen. Dabei wird ein Bauteil je nach Situierung im Gebäude bzw. in Abhängigkeit der vorliegenden Klimabedingungen am Einbauort einer von drei Klassen zugeordnet. Mit steigender Nutzungs-klasse nimmt auch die Feuchtebelastung des Bauteils zu. Die zugehörige Gleichgewichtsfeuchte bezieht sich dabei auf die mittlere Holzfeuchtigkeit im Bauteil. Die Nutzungsklassen und ihre Zuordnung sind in Tabelle 5.1 beschrieben.

Tab. 5.1: Zuordnung von Tragwerken zu Nutzungsklassen (NKL) nach [35]

NKL	Umgebungsklima		Gleichgewichts- feuchte der meisten Nadelhölzer	Tragwerks- und Gebäudetyp
	Temperatur	relative Luftfeuchte		
1	20°C	≤ 65 %	≤ 12 %	Innenräume von Wohn-, Schul- und Verwaltungsbauten
2	20°C	≤ 85 %	≤ 20 %	Innenräume von Nutzbauten wie Lagerhallen, Reithallen und Industriehallen sowie überdachte Konstruktionen im Freien, deren Bauteile nicht der freien Bewitterung ausgesetzt sind
3	–	≥ 85 %	≥ 20 %	Bauteile im Freien mit konstruktivem Holzschutz

Berücksichtigung der Holzfeuchte über Modifikationsbeiwert nach Eurocode 5

Um die, über die Nutzungsklassen definierte Einteilung der klimatischen Umgebungsbedingungen in der Bemessung zu berücksichtigen, wird im Eurocode 5 [35] der Modifikationsbeiwert k_{mod} eingeführt. Dieser ist in Abhängigkeit des verwendeten Holzbaustoffes, der Nutzungsklasse und der Lasteinwirkungsdauer festgelegt. In Tabelle 5.2 sind die entsprechenden Werte für CLT angeführt. Über den Modifikationsbeiwert wird der charakteristische Wert der Beanspruchbarkeit R_k zusätzlich reduziert. Die Ermittlung des Bemessungswertes der Beanspruchbarkeit R_d erfolgt somit folgendermaßen:

$$R_d = \frac{k_{mod} \cdot R_k}{\gamma_M}, \quad (5.2)$$

mit dem charakteristischen Wert der Beanspruchbarkeit R_k und dem baustoffspezifischen Teilsicherheitsbeiwert γ_M .

Tab. 5.2: Werte für k_{mod} für CLT nach [35]

Baustoff	NKL	Klasse der Lasteinwirkungsdauer				
		ständig	lange	mittel	kurz	sehr kurz
CLT	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Beurteilung der Methodik nach EC5 im Hinblick auf die vorliegende Problemstellung

Der in dieser Arbeit betrachtete HBV-Plattenausschnitt befindet sich in einem Innenraum und ist einem „feuchterem“ und einem „trockenerem“ Innenklimaverlauf ausgesetzt. In beiden Fällen liegt die Temperatur zum Großteil des Jahres mit ein paar Prozent Abweichung im Bereich von 20 °C. Die relative Luftfeuchtigkeit überschreitet einen Feuchtegehalt von 65 % maximal in Form von kurzzeitig auftretenden Spitzenwerten, nicht jedoch dauerhaft über einen längeren Zeitraum. Der Eurocode erlaubt eine Überschreitung der in Tabelle 5.1 angeführten Grenzwerte für die relative Luftfeuchtigkeit für einige Wochen im Jahr. In Abbildung 5.10 ist der Verlauf der mittleren Holzfeuchte u_{avg} in der gesamten CLT-Platte dargestellt. Zu Beginn liegt dieser über dem Grenzwert der Nutzungsklasse 1 von 12 %, mit einem Maximum bei 13,4 % am Ende des ersten Monats. Gegen Ende Oktober wandert die mittlere Holzfeuchtigkeit dauerhaft unter die 12 %-Grenze. Das Bauteil ist gemäß Eurocode 5 somit für die ersten fünf Monate der Nutzungsklasse 2 und danach der Nutzungsklasse 1 zuzuordnen.

Der Eurocode 5 bezieht sich für die Einteilung in die Nutzungsklassen auf die mittlere Holzfeuchtigkeit im Bauteil. Mit dem über die Nutzungsklassen definierten Modifikationsbeiwert k_{mod} wird der, in Kapitel 2.1.2.1 beschriebenen, feuchtebedingten Abminderung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holz Rechnung getragen. Aus den bisherigen Ergebnissen geht jedoch hervor, dass der Feuchteeintrag aus dem Frischbeton vor allem lokal im Bereich der Kerne zu hohen Feuchtespitzen führt. Diese bleiben über einen Zeitraum von etwa ein bis zwei Monaten bestehen, bis sich die Holzfeuchte in diesem Bereich langsam dem der restlichen Platte anpasst. Aus Abbildung 5.10 ist zu erkennen, dass diese erhöhte Feuchtigkeit im Kervbereich zu einer leichten Erhöhung der mittleren Feuchtigkeit in der gesamten Platte führt. Der Grenzwert der Nutzungsklasse 1 wird dadurch allerdings nur geringfügig überschritten. Es zeigt sich also, dass der erhöhte Feuchteeintrag im Kervbereich nur geringfügige Auswirkungen auf die Einordnung in die Nutzungsklassen nach Eurocode 5 hat. Dementsprechend wird unter Berücksichtigung

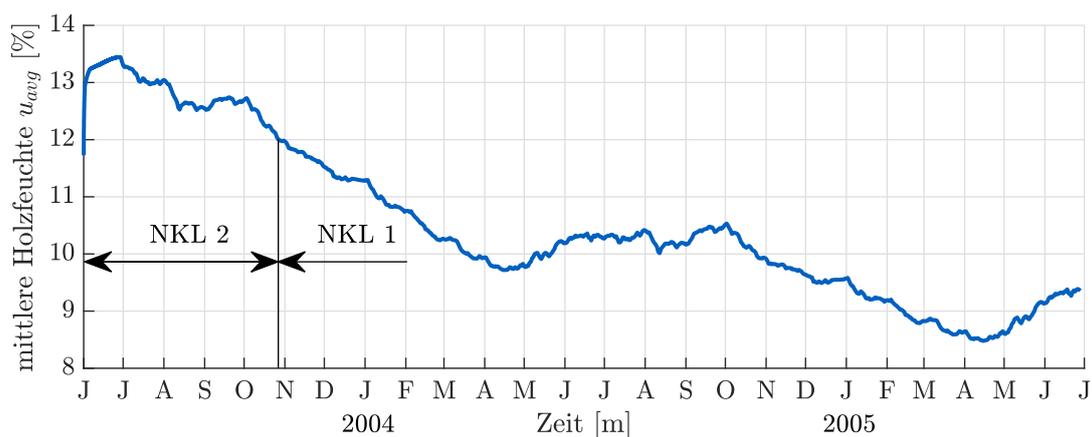


Abb. 5.10: Mittelwert der Holzfeuchtigkeit über das gesamte Volumen

der Norm auch bei der Nachweisführung die Abminderung der Festigkeit nicht durch eine Reduzierung auf der Widerstandsseite berücksichtigt. Gemäß den Erkenntnissen aus Kapitel 5.1.4.1 treten jedoch genau in diesem Bereich sowohl die höchsten Feuchtigkeiten, als auch die höchsten Schubspannungen auf. Bei Betrachtung der Simulationsergebnisse dieser Arbeit ist eine Berücksichtigung der erhöhten Feuchtigkeit beim Nachweis der Schubfuge in Form einer Abminderung der rechnerischen Schubfestigkeit in Faserrichtung eindeutig zu empfehlen.

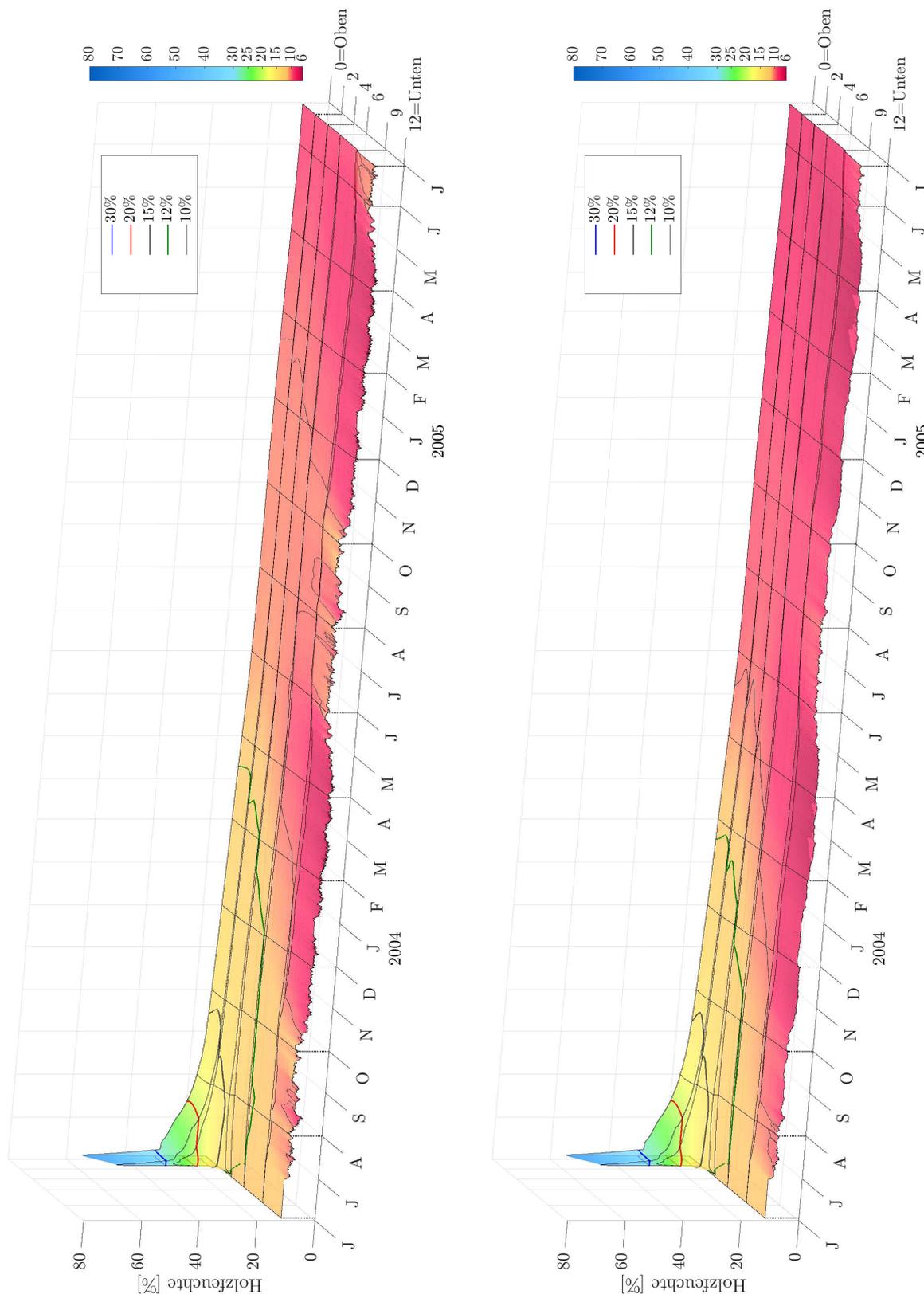
5.2 Modelle mit lokaler Versiegelung im Kervenbereich

Die bisher betrachteten Ergebnisse zeigen, dass sich zu Beginn, das heißt nach dem Aufbringen des Frischbetons, um die Kerne ein Bereich mit sehr hohen Feuchtegehalten ausbildet. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse dieser Arbeit und der Messungen aus der Versuchsreihe in [32] lässt vermuten, dass ein Großteil dieser Feuchtespitzen durch das starke Saugverhalten in Faserrichtung der Hirnholzfläche an der Kervenflanke entsteht.

Im Zuge dieser Arbeit wurden, ausgehend vom Modell CLT+FB_0%, zwei weitere Modelle erstellt, an denen die Feuchteaufnahme in der Kervenflanke zu 50 % bzw. zu 100 % reduziert ist. Bei der 50-prozentigen Versiegelung wurden dabei die Übergangskoeffizienten in der Kervenflanke soweit reduziert, dass an der Oberfläche, im Vergleich zum unversiegelten Modell, nur mehr halb so viel Feuchtigkeit aufgenommen werden kann. Bei der 100-prozentigen Versiegelung wurden die Übergangskoeffizienten an der Kervenflanke zu Null gesetzt. An den restlichen betonberührten Oberflächen ist der Feuchteintrag unbeeinträchtigt. Damit soll die Hypothese des erhöhten Feuchteintrags durch das Saugverhalten in Längsrichtung untersucht werden. Außerdem werden mögliche Vorteile durch lokale Versiegelungen an der CLT-Platte untersucht.

5.2.1 Modell CLT+FB_50% – 50 % Versiegelungsgrad

Abbildung 5.11 zeigt die Simulationsergebnisse entlang des Pfads in Abbildung 5.4 unter „feuchtem“ und „trockenem“ Innenklima. Ein Vergleich zwischen dem unversiegelten Modell und jenem mit 50 % Versiegelung an der Kervenflanke zeigt einen deutlichen Abfall des Maximalwerts der Holzfeuchtigkeit im ersten Monat. Mit etwa 55 % liegt dieser unabhängig vom Innenklima um ca. 15 % unter dem Maximalwert des unversiegelten Modells. Die Spitze fällt in der Lamelle 1 auch etwas schneller ab. So wird der Fasersättigungspunkt schon nach 7 Tagen wieder vollständig unterschritten. Der Grenzwert von 20 % wird bereits in der ersten Julihälfte und somit ebenfalls ein paar Tage früher als beim unversiegelten Modell erreicht.



(a) feuchtes Innenklima

(b) trockenes Innenklima

Abb. 5.11: Holzfeuchteverlauf über die Plattendicke für das Modell mit 50 % Versiegelung an der Kervenflanke, über den Zeitraum von Juni 2003 bis Juni 2005

Auch die Ausbreitung der Feuchtespitze in die Lamelle 2 fällt im Vergleich zum unversiegelten Modell etwas geringer aus. Es steigt nur ein geringer Teil auf über 20 % Holzfeuchtigkeit an. Der Fasersättigungspunkt wird hier im Gegensatz zum unversiegelten Modell nicht überschritten.

Nach den ersten beiden Monaten werden die Unterschiede zwischen den Verläufen der beiden Modelle jedoch sehr gering. Die 12 %-Grenze wird beim versiegelten Modell unter „feuchtem“ Innenklima Anfang März und unter „trockenem“ Innenklima Ende Jänner vollständig unterschritten. Das ist etwa ein halbes Monat früher als beim unversiegelten Modell. Von da an verhält sich die Holzfeuchtigkeit in der CLT-Platte beinahe gleich. Der Einfluss der 50 %-Versiegelung beschränkt sich also weitgehend auf die ersten zwei Monate nach Aufbringen des Frischbetons. Danach wird der Unterschied sehr gering, bis er nach etwa einem Jahr komplett verschwunden ist.

Die Interaktion an der Unterseite weist sowohl für das „feuchte“ als auch das „trockene“ Innenklima dasselbe Verhalten wie beim unversiegelten Modell auf. Der Einfluss auf die erhöhte Feuchtigkeit aufgrund der Betonfeuchte an der Oberfläche ist gering, bis kaum merkbar. Erst nach Unterschreiten der Anfangsfeuchtigkeit kommt es unter „feuchtem“ Innenklima zu einer verzögerten Austrocknung im oberen Bereich der Platte. Hier sind somit keine Unterschiede zum unversiegelten Modell zu verzeichnen.

5.2.1.1 Feuchteverlauf in der Schubfuge

In Abbildung 5.12 sind die Verläufe der Holzfeuchtigkeit an ausgewählten Punkten entlang der Schubfuge zu sehen. Die Auswertung erfolgt entlang des Pfades in Abbildung 5.7. Am Punkt A, in der Kervenecke tritt ein Feuchtemaximum von 64 % auf. Im Vergleich zum unversiegelten Modell liegt dieser Wert um etwa 8 % niedriger. Nach Erreichen des Maximums fällt die Spitze relativ rasch ab. Nachdem die Holzfeuchte den Fasersättigungspunkt erreicht, beginnt der Verlauf dann langsam abzuflachen. Zum Einbauzeitpunkt, Anfang Juli, liegt im Punkt A ein Feuchtegehalt von ca. 22 % vor.

Fünf Zentimeter weiter innen erfolgt der Feuchteanstieg, wie schon beim unversiegelten Modell, auch hier wesentlich langsamer, als direkt an der Oberfläche. Es stellt sich nach ein paar Tagen ein Maximalwert von 18,5 % Holzfeuchtigkeit ein, was um etwa 2 % unter dem unversiegelten Modell liegt. Noch weiter innen stellt sich entlang der restlichen Schubfuge innerhalb der ersten Tage ein Feuchtegehalt von 16 % ein.

Nach etwa zweieinhalb Monaten hat sich mit 15,5 % auch beim versiegelten Modell eine gleichmäßige Holzfeuchte über die gesamte Schubfuge eingestellt. Im weiteren Zeitverlauf bewegt sich der Feuchtegehalt dann langsam in Richtung Ausgleichsfeuchte.

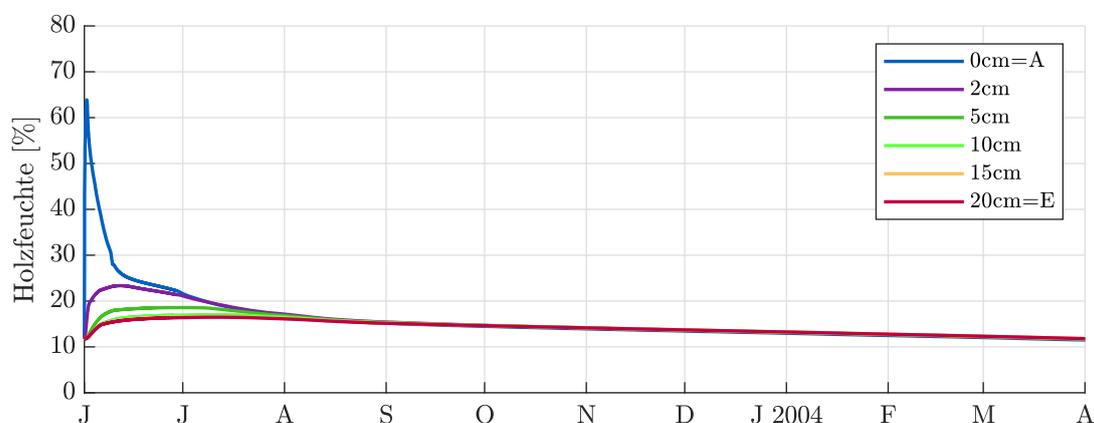


Abb. 5.12: Auswertung an gewählten Punkten entlang der Schubfuge über 10 Monate für Modell CLT+FB_50%

5.2.2 Modell CLT+FB_100% – 100 % Versiegelungsgrad

In Abbildung 5.13 sind die Ergebnisse der Holzfeuchte entlang des Auswertungspfades aus Abbildung 5.4 unter „feuchtem“ und „trockenem“ Innenklima dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine vollständige Versiegelung an der Kervenflanke einen deutlich geringeren Feuchteeintrag im Kervenbereich zur Folge hat. Die maximal auftretende Holzfeuchtigkeit beschränkt sich auf 24 %, was deutlich unterhalb der Ergebnisse der unversiegelten und der zu 50 % versiegelten Platte liegt. Insgesamt überschreitet nur ein kleiner Bereich der Lamelle 1 für den Zeitraum von knapp unter einem Monat die 20 %-Grenze. Zum angenommenen Einbauzeitpunkt liegt die Holzfeuchtigkeit der gesamten Platte unterhalb von 20 %.

Über die Lamelle 1 hinweg führt die Feuchtigkeit aus dem Beton bis in die Lamelle 3 zu einem Anstieg der Holzfeuchtigkeit über die Anfangsfeuchte von 12 %. Die erhöhte Feuchtigkeit hält sich bis etwa Anfang November. Ab dann beginnt der Feuchtegehalt bei der Lamelle 3 beginnend abzusinken. Neun Monate nach Aufbringen des nassen Betons liegt bei „feuchtem“ Innenklima der Feuchtegehalt in der gesamten Platte unter der Anfangsfeuchte von 12 %. Unter „trockener“ Beanspruchung an der Unterseite wird dieser Zustand schon eineinhalb Monate früher erreicht. Nach Erreichen der Anfangsholzfeuchte entsprechen die Feuchteverläufe wieder annähernd jenen des unversiegelten Modells aus Abbildung 5.5.

5.2.2.1 Feuchteverlauf in der Schubfuge

Auch die Auswertung der Holzfeuchte entlang der Schubfuge zeigt bei 100 % Versiegelung ein deutlich geringeres Feuchteaufkommen als bei den anderen Modellen. Der Spitzenwert liegt bei knapp über 20 % an der Oberfläche im Punkt A. Nach Erreichen des Maximalwerts fällt die Feuchtigkeit in der Kervenecke mit der Zeit langsam ab.

Schon fünf Zentimeter weiter innen gleicht sich der Feuchteverlauf dem der restlichen Fuge an. Die maximale Feuchtigkeit in der restlichen Fuge liegt bei knapp unter 17 % und hält sich ungefähr bis Ende Juli 2003. Ab dann liegt von Punkt A bis Punkt E annähernd derselbe Feuchteverlauf vor. Bis zum Ende der Simulation nähert sich die Holzfeuchte der Ausgleichsfeuchte an.

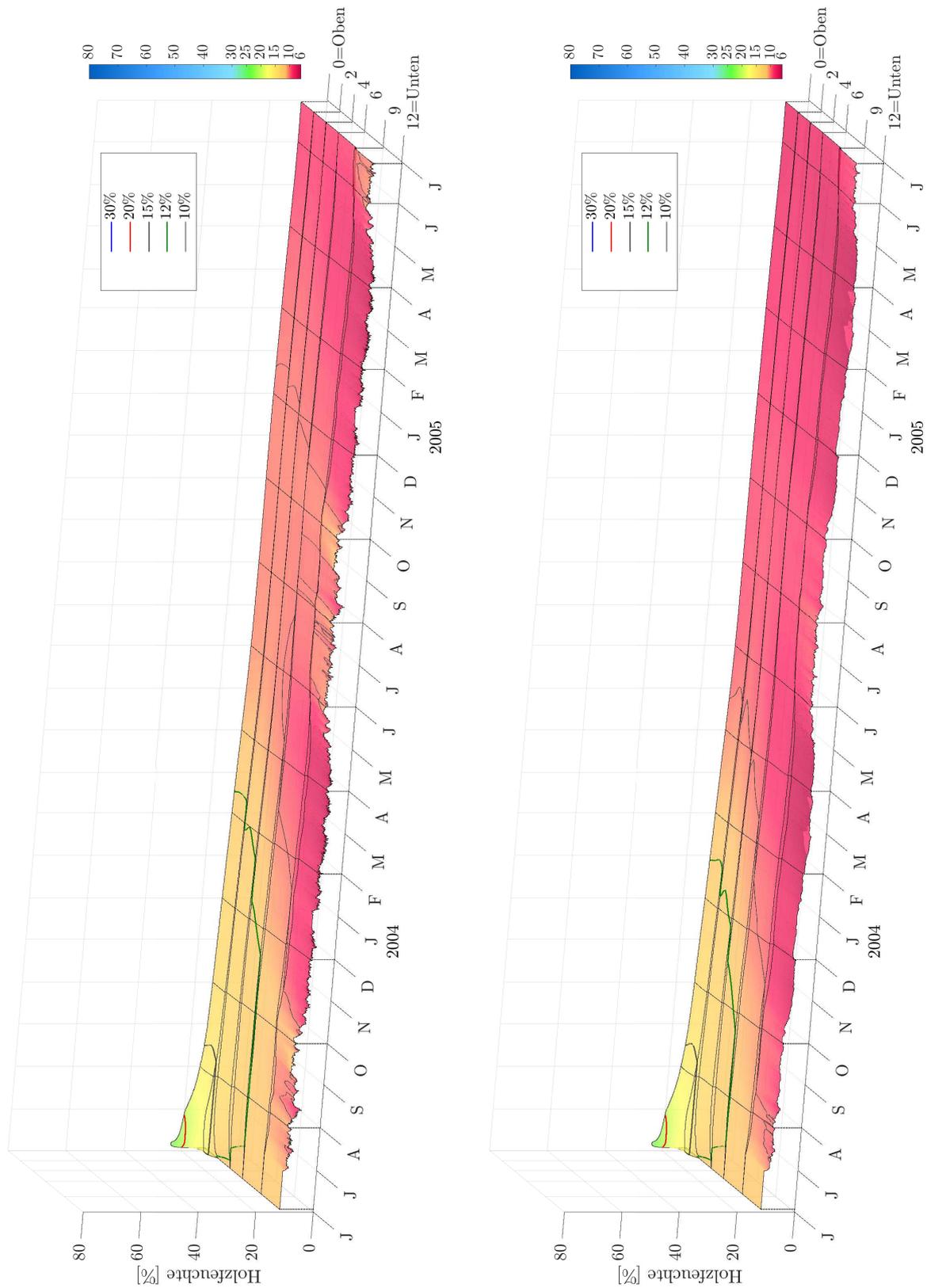
5.2.3 Fazit / Interpretation der Ergebnisse

Üblicherweise wird bei HBV-Decken das Eindringen von Feuchtigkeit aus dem Beton in den Holzkörper durch Trennfolien verhindert. Bei einer Kervenverbindung führt dies zu einem erhöhten Personalaufwand, sowie zu einer längeren Herstellungszeit. In Fachkreisen werden zur Notwendigkeit einer Trennfolie bei Kervenverbindungen gegensätzliche Standpunkte vertreten [43]. Die Untersuchungen in dieser Arbeit sollen unter anderem Aufschluss darüber geben, ob das Verlegen von Trennschichten alternativ durch Aufbringen von lokalen Versiegelungen im Hirnholzbereich der Kerve ersetzt werden kann. Dieser Arbeitsschritt kann bereits im Werk mit der Herstellung der Kerve erfolgen.

5.2.3.1 50 % Versiegelung

Aus der Auswertung des 50 % versiegelten Modells geht im Vergleich zum unversiegelten Modell ein sehr geringer Unterschied hervor. Der Verlauf der mittleren Holzfeuchte in Abbildung 5.15 liegt nur minimal unter dem des unversiegelten Modells.

Auch die in Abbildung 5.16 dargestellten Verläufe der Volumsanteile, die einen Feuchtegehalt von 12 %, 20 % bzw. 30 % übersteigen, zeigen einen geringen Unterschied zum unversiegelten Modell. Der Anteil mit mehr als 12 % Holzfeuchtigkeit hält sich etwa ein halbes Monat kürzer als ohne Versiegelung und fällt ein paar Prozent kleiner aus. Die Bereiche die einen Feuchtegehalt über



(a) feuchtes Innenklima

(b) trockenes Innenklima

Abb. 5.13: Holzfeuchteverlauf über die Plattendicke für das Modell mit 100 % Versiegelung an der Kervenflanke, über den Zeitraum von Juni 2003 bis Juni 2005

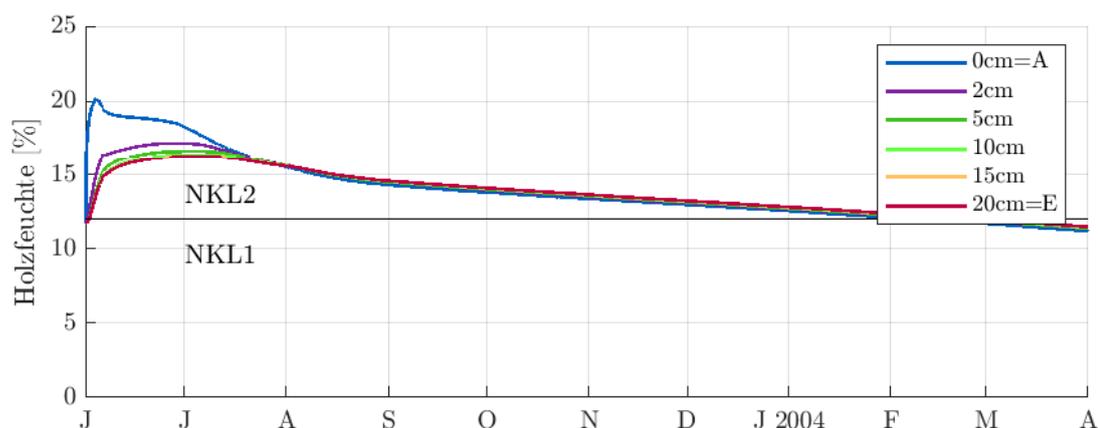


Abb. 5.14: Auswertung an gewählten Punkten entlang der Schubfuge über 10 Monate für Modell CLT+FB_100%

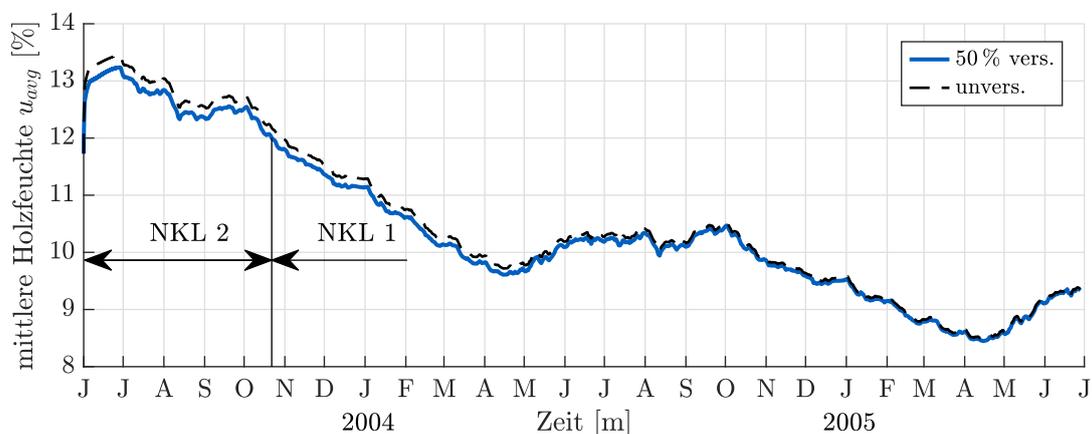


Abb. 5.15: Mittelwert der Holzfeuchtigkeit über das gesamte Volumen für Modell CLT+FB_50% im Vergleich zum unversiegelten Modell

20 % bzw. 30 % erreichen fallen um ca. ein Prozent geringer aus und halten sich im Vergleich zur unversiegelten Simulation nur ein paar Tage kürzer. Eine Versiegelung von 50 % würde demnach langfristig gesehen keinen verbessernden Einfluss auf eventuell auftretende Kriechdeformationen haben.

Der Maximalwert der Holzfeuchtigkeit in der Schubfuge, einen Zentimeter von der Kerve entfernt, tritt an der Oberseite der Platte auf und liegt etwa 15 % unterhalb der Ergebnisse am unversiegelten Modell (siehe Abbildung 5.11). In der Kervenecke, welche als Anfang der Schubfuge den kritischsten Bereich darstellt, liegt die auftretende Spitze mit 64 % hingegen nur 8 % unterhalb des Modells ohne Behinderung des Feuchteintrags (siehe Abbildung 5.12). Die Festigkeit innerhalb der ersten Zentimeter der Schubfuge ist demnach weiterhin aufgrund des erhöhten Feuchtefeldes abgemindert.

Obwohl es zu einem geringfügig niedrigeren Feuchteintrag aus dem Beton kommt, entsteht durch die Verteilung der zu Beginn auftretenden Spitze im Bereich der Kerve ein ähnliches Feuchtefeld wie es sich im unversiegelten Modell ergibt. Um einen merkbaren Verbesserungseffekt zu erreichen ist es also notwendig einen höheren Versiegelungsgrad als 50 % zu erzielen.

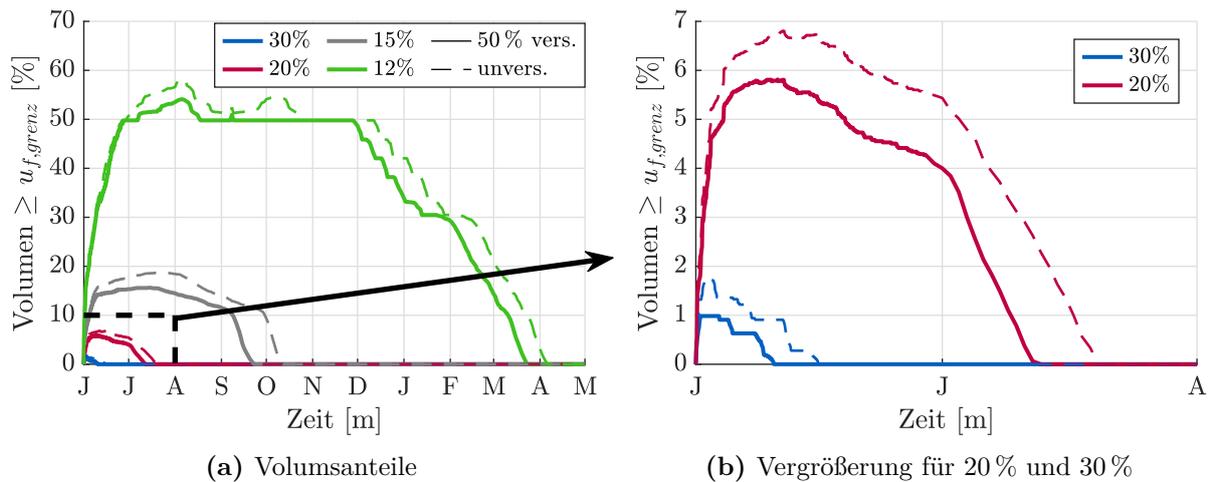


Abb. 5.16: Zeitlicher Verlauf der Volumensanteile der gesamten Platte die 12 % (NKL1), 20 % (NKL2) bzw. 30 % (FSP) Holzfeuchtigkeit überschreiten für Modell CLT+FB_50%

5.2.3.2 100 % Versiegelung

Bei einer Versiegelung von 100 % an der Kervenflanke stellt sich, im Vergleich zur unversiegelten Simulation, erwartungsgemäß eine deutlich erkennbare Abminderung des Feuchteintrags aus dem Frischbeton ein. Die Spitze zu Beginn der Feuchtesimulation überragt mit einem Maximalwert von 24 % nur mehr die 20 %-Grenze (siehe Abbildung 5.13). Das Feuchtefeld in der gesamten Platte fällt, abgesehen von der Spitze zu Beginn, auch über die Zeit etwas niedriger als bei den vorherigen Modellen aus. Dennoch erstreckt sich der Einfluss des Aufbetons, erkennbar durch einen Anstieg des Feuchtegehalts über die Ausgleichsfeuchte, bis in die Lamelle 3. Auch Abbildung 5.17 zeigt, dass trotz der starken Versiegelung etwa die Hälfte der Platte durch einen Feuchteanstieg über die Anfangsfeuchte von 12 % betroffen ist. Dieser Grenzwert wird lediglich ein Monat früher unterschritten als im Modell ohne Versiegelung.

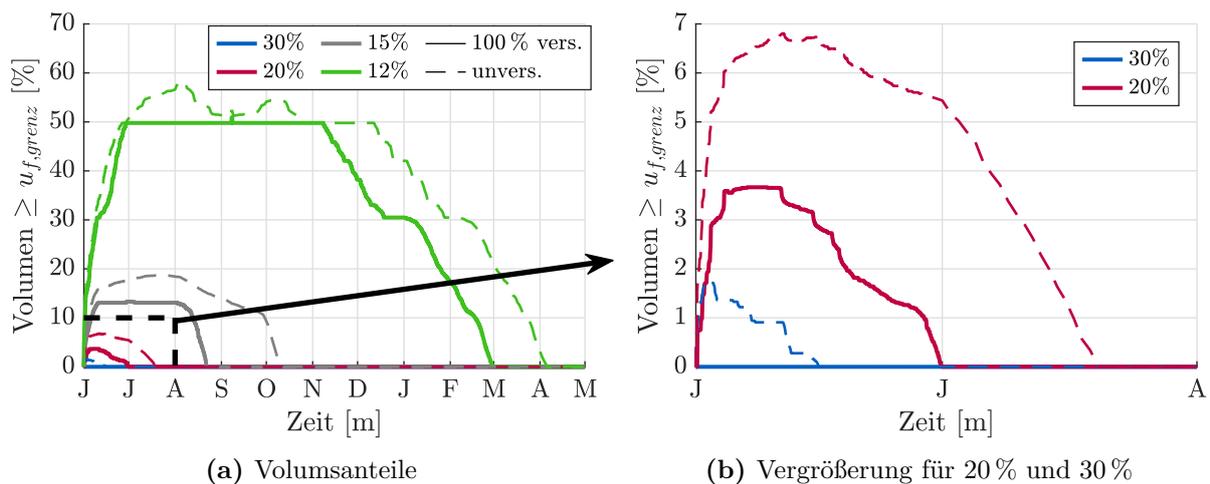


Abb. 5.17: Zeitlicher Verlauf der Volumensanteile der gesamten Platte die 12 % (NKL1), 20 % (NKL2) bzw. 30 % (FSP) Holzfeuchtigkeit überschreiten für Modell CLT+FB_100%

Die mittlere Holzfeuchtigkeit in der gesamten Platte fällt zu Beginn der Simulation trotz 100 % Versiegelung im Kervenbereich um nur 0,5 % niedriger aus, als der Verlauf ohne Versiegelung (siehe Abbildung 5.18). Dieser Vergleich verdeutlicht nochmals den geringen Einfluss der lokalen Feuchtespitzen im Kervenbereich auf die Gesamtfeuchtigkeit in der Platte.

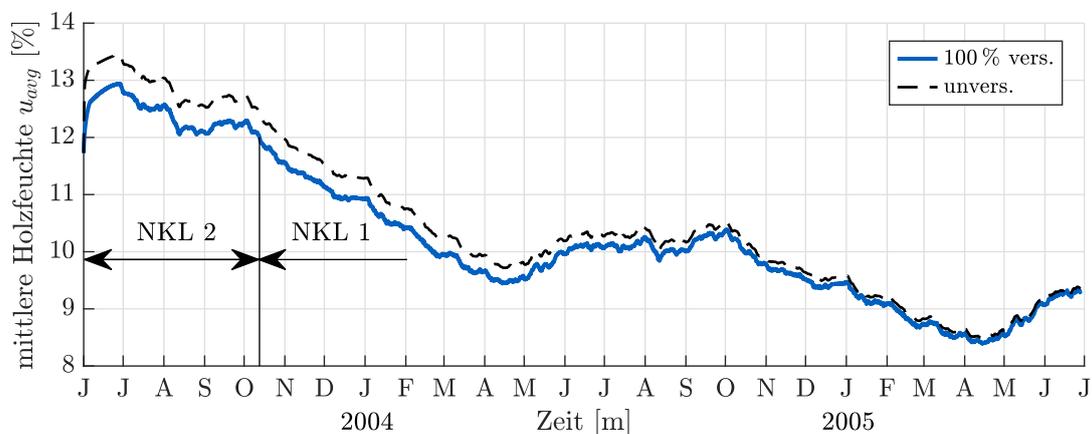


Abb. 5.18: Mittelwert der Holzfeuchtigkeit über das gesamte Volumen für Modell CLT+FB_100% im Vergleich zum unversiegelten Modell

In der Schubfuge überschreitet die Holzfeuchte nur kurz nach dem Aufbringen des Frischbetons ganz knapp die 20 %-Grenze (siehe Abbildung 5.14). Danach liegt die gesamte Schubfuge unterhalb des Grenzwert. Ausgehend von der Kervenkante in Richtung Regelbereich stellt sich relativ rasch ein gleichmäßiger Feuchtegehalt von 16 % in der Fuge ein. Nach etwa eineinhalb Monaten hat sich auch der Feuchtegehalt am Fugenanfang dem der restlichen Fuge angepasst. Betrachtet man nur den Vorholzbereich unabhängig von der gesamten Platte, würde dieser nach Eurocode 5 demnach in die Nutzungsklasse 2 fallen.

5.2.3.3 Vergleich der Versiegelungsgrade

Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem relativ hohen Versiegelungsgrad an der Kervenflanke der Feuchteeintrag aus dem Beton lokal stark minimiert werden kann. Vor allem im kritischen Vorholzbereich der Kerne liegt der Feuchtegehalt dadurch deutlich niedriger als bei den unversiegelten bzw. weniger stark versiegelten Modellen. In Abbildung 5.19 ist der Verlauf zwei Zentimeter im Platteninneren entlang der Schubfuge für alle drei Modellvarianten dargestellt. Der Vergleich macht nochmals deutlich, dass die Verwendung von Versiegelungen erst ab einem relativ hohen Versiegelungsgrad den gewünschten Effekt in der Schubfuge erzielt. Der Einbau einer dichten Trennschicht in der Fuge zwischen Beton und Holz kann demnach entfallen, sofern eine entsprechend starke Versiegelung entlang der Kervenflanke garantiert werden kann.

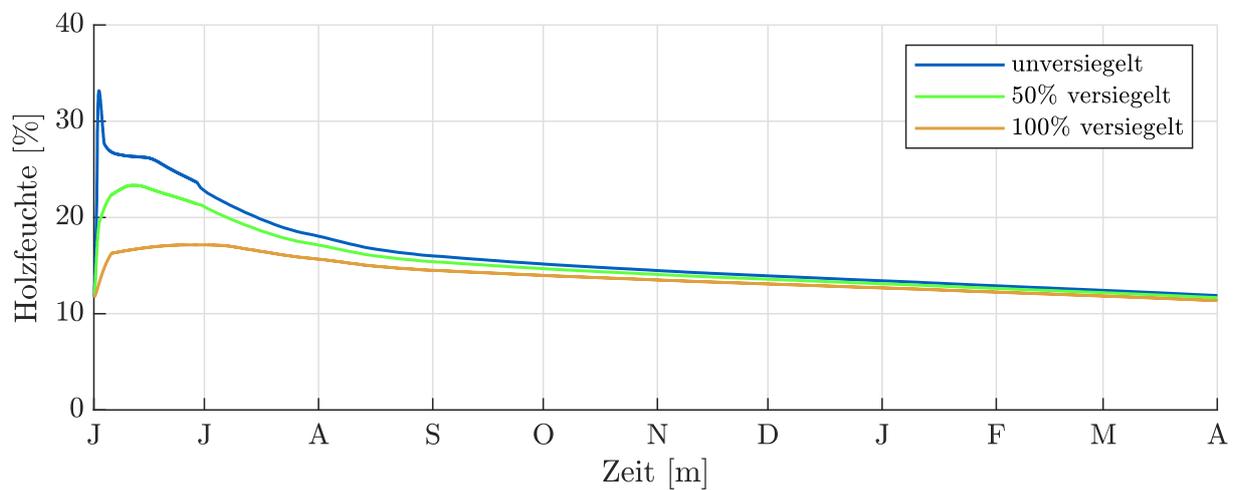


Abb. 5.19: Feuchteverlauf 2 cm im Platteninneren entlang der Schubfuge: Vergleich zwischen den drei Versiegelungsgraden

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination von Holzwerkstoffen und Beton in der Holz-Beton-Verbundbauweise (HBV) ist eine Möglichkeit um den steigenden Anforderungen des modernen, mehrgeschossigen Hochbaus gerecht zu werden. Bei der Bauweise werden die Stärken der Werkstoffe optimal ausgenutzt. Im Vergleich zum herkömmlichen Massivbau können ein geringeres Eigengewicht, bessere bauphysikalische Kennwerte (Schallschutz, Schwingungen) sowie eine, ökologisch gesehen, bessere Bauweise erzielt werden [29]. Die mechanischen Eigenschaften von Holz weisen jedoch eine starke Feuchteabhängigkeit auf. Bei der HBV-Bauweise führen daher nicht nur die Klimabelastungen sondern auch das Aufbringen von feuchtem Beton auf die Holzoberfläche zu Veränderungen des Kurz- und Langzeitverhaltens des Bauteils. Da vor allem Langzeitversuche in diesem Bereich technisch aufwendig und enorm zeitintensiv sind, wurde in dieser Arbeit mit einem auf der Finiten-Elemente-Methode (FEM) basierten Simulationstool der Feuchteeintrag aus dem Beton in einen Brettsperrholz (CLT)-Plattenstreifen im Kervenbereich berechnet. Die Ausbreitung der Feuchtigkeit im Holz wurde im Anschluss unter realen Innenklimabelastungen an der Plattenunterseite über 24 Monate simuliert. Es wurde untersucht, ob sich über den Simulationszeitraum kritische Feuchtezustände im Holz einstellen und welche Auswirkungen dadurch entstehen. Außerdem wurde bewertet, ob der praxisübliche Einbau einer Trennschicht in der Werkstoffuge notwendig ist bzw. ob eine Reduktion des Feuchteeintrags durch eine lokale Versiegelung an der Kervenflanke eine Alternative dazu darstellen kann. Im Folgenden werden die Vorgehensweise der Modellbildung sowie die Ergebnisse zusammengefasst.

Nachbildung des Feuchteeintrags aus dem Beton: Um den Feuchteeintrag aus dem Frischbeton in der Simulation nachbilden zu können, wurden die im Modell angesetzten Übergangskoeffizienten von freiem Wasser und Wasserdampf in der Fuge zwischen Beton und Holz anhand der Versuchsergebnisse in [32] kalibriert. Der Vergleich der Holzfeuchteverläufe in den obersten drei Lamellen über den Versuchszeitraum von 28 Tagen konnte sehr gut abgebildet werden. Die anfängliche Spitze von knapp 75 % Holzfeuchtigkeit, welche im Versuch nach etwa 12 Stunden gemessen wurde, konnte in der Simulation nur zu zwei Drittel erreicht werden. Bereits nach drei Tagen bilden die Simulationsergebnisse die Messergebnisse jedoch sehr gut nach. Im Anschluss an die 28 Tage nach Aufbringen des Frischbetons wurde der modellierte Plattenausschnitt an der Unterseite mit realen Innenklimaverläufen beansprucht. Die Entwicklung des Feuchtefelds wurde über 24 Monate simuliert.

Einfluss der Betonfeuchte: Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die erhöhte Holzfeuchtigkeit, welche durch den Feuchteeintrag aus dem Frischbeton entsteht, auf einen lokalen Bereich beschränkt. Der Bereich in dem Holzfeuchtegehalte von 20 % und mehr erreicht werden bildet sich direkt in der Umgebung der Kerne aus und reicht nur knapp über die erste Lamelle hinaus. Der Grenzwert wird in lediglich 7 % des Gesamtvolumens überschritten. Insgesamt führt die Betonfeuchte in etwa 50 % des Modellkörpers zu einer Erhöhung über die Anfangsfeuchte von 12 %. Im Großteil davon stellt sich ein Feuchtegehalt zwischen 12 % und 15 % ein. Der Einfluss der

Betonfeuchtigkeit reicht aber nicht tiefer als in die dritte Lamelle. Die unteren beiden Brettlagen sind daher unbeeinflusst von dem erhöhten Feuchtezustand an der Oberseite. Je nach Innenklimabeanspruchung hält sich der erhöhte Feuchtegehalt über neun bis zehn Monate. Danach beginnt der CLT-Körper langsam abzutrocknen. Die Holzfeuchtigkeit sinkt in Richtung einer Gleichgewichtsfeuchte zwischen 8 % und 9 % ab.

Einfluss des Innenklimas: An der Unterseite der CLT-Platte wurden für alle Modelle zwei verschiedene Innenklimaverläufe angesetzt. Aus Innenklimamessungen von unterschiedlichen Wohnzimmern wurden der Verlauf mit den höchsten auftretenden relativen Luftfeuchtigkeiten und den stärksten Schwankungen ebendieser, sowie der Verlauf mit der geringsten relativen Luftfeuchtigkeit ausgewählt. Die beiden Extreme sollten als Grenzwerte der möglichen auftretenden Belastungen dienen.

Aus den Ergebnissen der Simulationen ist zu erkennen, dass sich der Einfluss des Innenklimas relativ lange auf die untersten beiden Lamellen beschränkt. Gleich zu Beginn sinkt der Feuchtegehalt in der untersten Lamelle, ausgehend von der Anfangsfeuchtigkeit von etwa 12 %, ab und übersteigt diesen nicht mehr. Diese Austrocknung reicht jedoch nur bis in die zweite Lamelle von unten. Erst nachdem die aus dem Frischbeton eingedrungene Feuchtigkeit vollständig abgebaut ist, kommt es auch in den darüber liegenden Lamellen langsam zu einer Austrocknung in Richtung Gleichgewichtsfeuchte. Der Großteil der dem Innenklima geschuldeten Holzfeuchteschwankungen beschränkt sich dennoch auf die untersten beiden Lamellen.

Beurteilung kritischer Feuchtezustände: Die kritischen Feuchtezustände in Holz, die sich aus den angesetzten Feuchtebeanspruchungen ergeben, beschränken sich wie bereits beschrieben ausschließlich auf die unmittelbare Umgebung der Kerne. Doch gerade in diesem Bereich treten aufgrund der Schubverzahnung große Schubspannungen und Flächenpressungen auf. Im ersten Monat der Beanspruchung treten über die ersten fünf Zentimeter der Schubfuge Feuchtigkeiten über dem Fasersättigungspunkt auf. Es kommt daher zur maximal möglichen, feuchteinduzierten Reduktion der Festigkeitseigenschaften. Die Schubfestigkeit in der Schubfuge sinkt demnach laut Gerhards [16] auf bis zu 65 % des Ausgangswertes bei 12 % Holzfeuchtigkeit ab. Zum in dieser Arbeit angenommenen Zeitpunkt des Einbaus auf der Baustelle, ist der Großteil der erhöhten Feuchtigkeit bereits abgebaut. Das Maximum liegt zu diesem Zeitpunkt bei 24 %. Wird der Bauteil jedoch schon relativ bald nach Aufbringen des Frischbetons belastet, kann es zu einer drastischen Absenkung der Tragfähigkeit der Kervenverbindung kommen.

Zusätzlich zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse wurde die normative Berücksichtigung der lokalen Feuchtespitzen nach Eurocode 5 [39] diskutiert. Die vorhandene Holzfeuchtigkeit wird darin für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) durch den Abminderungsfaktor k_{mod} berücksichtigt. Dieser ergibt sich in Abhängigkeit der Belastungsdauer sowie der Nutzungsklasse. Die Einteilung in Nutzungsklassen wiederum erfolgt nach den Umgebungsklimabedingungen. Der maßgebende Holzfeuchtegehalt für die Einordnung bezieht sich dabei auf die mittlere Holzfeuchtigkeit im gesamten Bauteil. Die auftretenden Spitzen in den betrachteten Modellkörpern beschränken sich, wie bereits erwähnt, auf einen sehr kleinen Bereich. Die mittlere Holzfeuchtigkeit liegt daher, mit Ausnahme des ersten Monats nach dem Einbau, durchgehend unter 12 %. Die HBV-Platte wäre demnach der Nutzungsklasse 1 zuzuordnen, welche keine feuchteinduzierte Abminderung der Holzeigenschaften berücksichtigt. Nach Eurocode 5 kann es also vorkommen, dass lokal auftretende Feuchtespitzen vernachlässigt werden. Diese könnten allerdings in einem relativ kritischen Bereich des Querschnitts liegen und sollten somit auf jeden Fall in der Bemessung berücksichtigt werden.

Verbesserung durch Versiegelung: Um eine mögliche Alternative zum bisher üblichen Einbau von Trennfolien zwischen Beton und Holz zu untersuchen, wurden zwei weitere Modelle mit einer lokalen Versiegelung an der Kervenflanke betrachtet. Durch die Versiegelung wird die Aufnahme von Feuchtigkeit an der Oberfläche behindert. Für die Simulationen wurde die Kervenflanke einmal zu 50 % und einmal zu 100 % versiegelt.

Im Vergleich zur unversiegelten Platte zeigt die 50 % versiegelte Platte nur wenig Verbesserung. Die innerhalb der ersten zwölf Stunden maximal auftretende Feuchtigkeit wird um etwa 15 % reduziert. Im Bereich der Schubfuge liegt das Holzfeuchtemaximum in dieser Zeit hingegen nur 8 % unter den Ergebnissen der unbehandelten Platte. Durch den Feuchteintrag aus dem Beton kommt es weiterhin in etwa der Hälfte des Modellkörpers zu einem Anstieg der Holzfeuchtigkeit über die Anfangsfeuchte. Der Großteil der Holzfeuchtigkeit liegt wie schon beim unversiegelten Modell zwischen 12 % und 15 %. Die Betonfeuchte ist im versiegelten Modell lediglich ein halbes Monat früher entwichen.

Deutlich merkbarer wirkt sich eine Versiegelung von 100 % aus. In diesem Modell findet kein Feuchteintrag über die Kervenflanke statt. Die 20 %-Grenze wird nur mehr mit einem Maximalwert der Holzfeuchtigkeit von 24 % überschritten. Auch in der Schubfuge wird die Grenze von 20 % nur für einen kurzen Zeitraum von ein paar Stunden überschritten. Danach liegt die Holzfeuchtigkeit dauerhaft darunter und ist gleichmäßig über die Fuge verteilt.

Aus den Ergebnissen geht somit hervor, dass ein relativ hoher Versiegelungsgrad erforderlich ist um den Feuchteintrag aus dem Beton merkbar zu minimieren. Gelingt dies kann die Holzfeuchtigkeit in einem unkritischen Bereich gehalten werden. Der Einbau einer Trennfolie wäre damit nicht mehr notwendig.

Ausblick: Über die Feuchteinteraktion zwischen Beton und Holz liegen in der Literatur bisher nur wenige Versuchsmessungen vor. Eine fundierte modelltechnische Beschreibung des Zusammenspiels der beiden Werkstoffe ist nicht bekannt. Durch genauere Kenntnisse des Feuchteverhaltens in der Fuge zwischen Beton und Holz wäre eine Verbesserung der Abbildung der Feuchteaufnahme im Holz möglich. In dieser Arbeit wurde die Feuchteinteraktion lediglich an den Ergebnissen aus [32] kalibriert. Um die Vorhersagegenauigkeit weiter zu erhöhen, könnten die gewählten Parameter mit weiteren Versuchsmessungen verglichen werden.

Aufbauend auf den berechneten Feuchtefeldern können weiterführende Spannungsberechnungen unter zusätzlichen, realen Belastungssituationen durchgeführt werden. Dadurch wäre eine Vertiefung der Aussagen bezüglich des Einflusses der abgeminderten Festigkeit und Steifigkeit im Holz möglich.



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

Literaturverzeichnis

- [1] L. Ahlgren. *Moisture fixation in porous building materials*. Techn. Ber. Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, 1972.
- [2] F. Antretter, zweiter Autor und dritter Autor. „Interior climate in German living spaces and impact of interior linings on moisture performance“. 2010.
- [3] M. Autengruber, M. Lukacevic und J. Füssl. *Numerical moisture transport model for wood including free water transport*. 2020.
- [4] R. Beddoe und R. Springenschmid. „Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 94.4 (Apr. 1999), S. 158–166. DOI: 10.1002/best.199900470.
- [5] H. J. Blaß und C. Sandhaas. *Ingenieurholzbau - Grundlagen der Bemessung*. Karlsruher Institut für Technologie, 22. Juli 2016. 658 S. ISBN: 3731505126.
- [6] F. Colling. *Holzbau*. Vieweg+Teubner, 2008. DOI: 10.1007/978-3-8348-9551-6.
- [7] *DIN EN 14080: Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen*. 2013.
- [8] M. Dunky und P. Niemz. *Holzwerkstoffe und Leime*. Springer Berlin Heidelberg, 2002. DOI: 10.1007/978-3-642-55938-9.
- [9] S. V. Dvinskikh, M. Henriksson, A. L. Mendicino, S. Fortino und T. Toratti. „NMR imaging study and multi-Fickian numerical simulation of moisture transfer in Norway spruce samples“. In: *Engineering Structures* 33.11 (Nov. 2011), S. 3079–3086. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.04.011.
- [10] L. Eisenhut. *Geklebter Verbund aus Holz und hochfestem Beton*. Kassel University Press, 25. Jan. 2016. ISBN: 3862199940.
- [11] J. Eitelberger. „A multiscale material description for wood below the fiber saturation point with particular emphasis on wood-water interactions“. Diss. Technische Universität Wien, 2011.
- [12] E. T. Englund, L. G. Thygesen, S. Svensson und C. A. S. Hill. „A critical discussion of the physics of wood–water interactions“. In: *Wood Science and Technology* 47.1 (Okt. 2012), S. 141–161. DOI: 10.1007/s00226-012-0514-7.
- [13] H. L. Frandsen und S. Svensson. „Implementation of sorption hysteresis in multi-Fickian moisture transport“. In: *Holzforschung* 61.6 (Jan. 2007). DOI: 10.1515/hf.2007.113.
- [14] H. L. Frandsen, S. Svensson und L. Damkilde. „A hysteresis model suitable for numerical simulation of moisture content in wood“. In: *Holzforschung* 61.2 (März 2007), S. 175–181. DOI: 10.1515/hf.2007.031.
- [15] T. Gereke, T. Schnider, A. Hurst und P. Niemz. „Identification of moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels from beech wood (*Fagus sylvatica* L.)“ In: *Wood Science and Technology* 43.3-4 (Sep. 2008), S. 301–315. DOI: 10.1007/s00226-008-0218-1.
- [16] C. C. Gerhards. „Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects.“ In: *Wood and Fiber Science*. 14. Ser. 1 (1982), S. 4–36.

- [17] A. J. Hailwood und S. Horrobin. „Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model“. In: *Transactions of the Faraday Society* 42 (1946), B084. DOI: 10.1039/tf946420b084.
- [18] U. Hestermann und L. Rongen. *Frick/Knöll Baukonstruktionslehre1*. Vieweg+Teubner, 2010. DOI: 10.1007/978-3-8348-9386-4.
- [19] K. Holschemacher und F. Dehn. „Innovative Betone für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen“. In: *Bautechnik* 81.11 (Nov. 2004), S. 874–879. DOI: 10.1002/bate.200490206.
- [20] K. Holschemacher, R. Selle, J. Schmidt und H. Kieslich. „Holz-Beton-Verbund“. In: *Lebensdauer und Instandsetzung – Brandschutz* (2013), S. 243–287.
- [21] T. Huckle und S. Schneider. *Numerische Methoden*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. DOI: 10.1007/3-540-30318-9.
- [22] F. Kollmann. „Über die Sorption von Holz und ihre exakte Bestimmung“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 17.5 (Mai 1959), S. 165–171. DOI: 10.1007/bf02608808.
- [23] K. Krabbenhoft und L. Damkilde. „A model for non-fickian moisture transfer in wood“. In: *Materials and Structures* 37.9 (Nov. 2004), S. 615–622. DOI: 10.1007/bf02483291.
- [24] U. Kuhlmann, J. Schänzlin und B. Michelfelder. „Berechnung von Holz-Beton-Verbunddecken“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 99.4 (Apr. 2004), S. 262–271. DOI: 10.1002/best.200490067.
- [25] S. Loebus und S. Winter. „Zweiachsige Tragwirkung bei HolzBeton-Verbundkonstruktionen – Entwicklung von Bemessungsverfahren und Konstruktionsdetails für zweiachsige Lastabtragung bei der HolzBeton-Verbundbauweise“. Abschlussbericht. Fraunhofer IRB Verlag, 2017.
- [26] G. C. O. Lohmeyer, Hrsg. *Stahlbetonbau*. Vieweg + Teubner Verlag, 2004. DOI: 10.1007/978-3-322-96816-6.
- [27] H. A. Mang und G. Hofstetter. *Festigkeitslehre*. Springer Berlin Heidelberg, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-57564-2.
- [28] D. Mannes, J.-A. Schmidt, P. Niemz und T. Volkmer. „Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart auf den kapillaren Wassertransport in Holz parallel zur Faserrichtung“. In: *Bauphysik* 34.2 (März 2012), S. 61–65.
- [29] P. Mestek, H. Kreuzinger und S. Winter. „Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen. Teilprojekt 15 des HTO-Verbundforschungsvorhabens "Holzbau der Zukunft"“. Abschlussbericht. TU München, 2008.
- [30] P. Mestek, N. Werther und S. Winter. „Bauen mit Brettsperrholz, Tragende Elemente für Wand, Decke und Dach“. de. In: *Informationsdienst Holz* (2010).
- [31] B. C. Michelfelder. „Trag- und Verformungsverhalten von Kernen bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken“. Dissertation. Institut für Konstruktion und Entwurf, 2006.
- [32] G. Muller. „Feuchteinteraktionsverhalten von Brettsperrholz und Beton im Verbund“. Diplomarbeit. Technische Universität München, 2. Mai 2016.
- [33] H. S. Müller und V. Kvitsel. „Kriechen und Schwinden von Beton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 97.1 (Jan. 2002), S. 8–19. DOI: 10.1002/best.200200020.
- [34] H. Neuhaus. *Ingenieurholzbau. Grundlagen - Bemessung - Nachweise - Beispiele*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. DOI: 10.1007/978-3-658-14178-3.
- [35] *ÖNORM B 1995-1-1, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 2015.

- [36] ÖNORM EN 1991-1-3, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten*. 2010.
- [37] ÖNORM EN 1991-1-4, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*. 2010.
- [38] ÖNORM EN 1991-1-5, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen*. 2010.
- [39] ÖNORM EN 1995-1-1, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 2010.
- [40] P. Perré und I. W. Turner. „A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42.24 (Dez. 1999), S. 4501–4521. DOI: 10.1016/s0017-9310(99)00098-8.
- [41] S. Reichel. „Modellierung und Simulation hygro-mechanisch beanspruchter Strukturen aus Holz im Kurz- und Langzeitbereich“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2015.
- [42] J. Schänzlin. *Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken*. de. 2003. DOI: 10.18419/opus-177.
- [43] F. Schönborn, M. Flach und J. Feix. „Bemessungsregeln und Ausführungshinweise für Schubkerven im Holz-Beton-Verbundbau“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106.6 (Juni 2011), S. 385–393. DOI: 10.1002/best.201100013.
- [44] J. F. Siau. *Transport Processes in Wood*. Springer Berlin Heidelberg, 1984. DOI: 10.1007/978-3-642-69213-0.
- [45] W. Sonderegger, A. Martiensen, C. Nitsche, T. Ozyhar, M. Kaliske und P. Niemz. „Investigations on the physical and mechanical behaviour of sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.)“. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 71.1 (Okt. 2012), S. 91–99. DOI: 10.1007/s00107-012-0641-8.
- [46] G. A. Spolek und O. A. Plumb. „Capillary pressure in softwoods“. In: *Wood Science and Technology* 15.3 (Sep. 1981), S. 189–199. DOI: 10.1007/bf00353471.
- [47] Y. S. Touloukian, S. C. Saxena und P. Hestermans. *Thermophysical Properties of Matter - the TPRC Data Series. Volume 11. Viscosity*. Techn. Ber. THERMOPHYSICAL und ELECTRONIC PROPERTIES INFORMATION ANALYSIS CENTER LAFAYETTE IN, 1975.
- [48] I. W. Turner. „A two-dimensional orthotropic model for simulating wood drying processes“. In: *Applied Mathematical Modelling* 20.1 (Jan. 1996), S. 60–81. DOI: 10.1016/0307-904x(95)00106-t.
- [49] T. Volkmer, J.-A. Schmidt, K. Kranitz und P. Niemz. „Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen“. In: *Bauphysik* 34.2 (März 2012), S. 55–60. DOI: 10.1002/bapi.201200006.
- [50] U. Wiens und C. Alfes. „Feuchtetransport in Bauteilen aus wasserundurchlässigem Beton: Grundlagen und Praxisbetrachtungen“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102.6 (Juni 2007), S. 380–387. DOI: 10.1002/best.200700548.
- [51] S. Winter, H. Kreuzinger und P. Mestek. „Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen“. In: *Holzbau der Zukunft, Teilprojekt 15* (2008).
- [52] B. Wittchen, E. Josten und T. Reiche. *Holzfachkunde*. Vieweg+Teubner, 2006. DOI: 10.1007/978-3-8351-9060-3.

- [53] O. C. Zienkiewicz und R. L. Taylor. *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN: 9780750664318.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Anatomische Hauptrichtungen von Holz	15
2.2	Änderung der Schubfestigkeit parallel zur Faser über den hygroskopischen Bereich aus [16]	18
2.3	Wasserabgabe und -aufnahme der Holzzelle [52]	20
2.4	Darstellung des Feuchtetransports in der Holzzelle aus Krabbenhoft und Damkilde [23]	21
2.5	Interaktion zwischen Wasserdampf, gebundenem Wasser und freiem Wasser	22
2.6	Sorptionsisotherme mit Hystereseeffekt	27
2.7	Hysteresekurven und „scanning curves“ für Adsorption und Desorption aus Eitelberger [11]	29
	a Adsorption	29
	b Desorption	29
2.8	Unterschiedliches Tragverhalten eines Verbundquerschnitts	35
2.9	HBV-Decke mit Kerven als Verbindungsmittel	35
2.10	Kerve mit stiftförmigem Verbindungsmittel aus [31]	35
2.11	Versuchsanordnung und Messergebnisse aus [20]	36
	a Versuchsanordnung	36
	b Messergebnisse wagrecht	36
	c Messergebnisse senkrecht	36
2.12	Feuchteverlauf im Holz aus [42]	37
2.13	Messergebnisse des Langzeitverhaltens aus [42]	37
	a Langzeitdeformationen zufolge Befeuchtung	37
	b Deformationen zufolge Betonschwinden	37
2.14	Qualitativer Schubspannungsverlauf im Vorholz einer Kerve	39
4.1	Schnitt durch den Versuchskörper mit Kerve aus [32]	46
4.2	„1D“-Modell – Markierung der Messpunkte am FE-Netz und Situierung in der CLT-Platte	47
4.3	Vergleich von Versuch und Simulation – radiale Richtung (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)	48
4.4	„2D“-Modell – Markierung der Messpunkte	49
4.5	Vergleich von Versuch und Simulation – „2D“-Modell (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)	49
4.6	„Feuchtes“ Innenklima: Jahresgang von 1. Dezember 2002 bis 31. Dezember 2003	51
	a relative Luftfeuchtigkeit	51
	b Temperatur	51
4.7	„Trockenes“ Innenklima: Jahresgang von 1. Dezember 2002 bis 31. Dezember 2003	51
	a relative Luftfeuchtigkeit	51
	b Temperatur	51
4.8	Vergleich der Auswirkung unterschiedlicher Mittelwerte auf die Simulationsergebnisse	52
	a Verlauf 10min-Mittel	52
	b Simulation 10min-Mittel	52

c	Verlauf 1h-Mittel	52
d	Simulation 1h-Mittel	52
e	Verlauf 6h-Mittel	52
f	Simulation 6h-Mittel	52
g	Verlauf Tagesmittel	52
h	Simulation Tagesmittel	52
4.9	Modellierter Plattenausschnitt	54
4.10	FE-Netz des CLT-Plattenmodells	54
4.11	FE-Netz des CLT-Plattenmodells	55
4.12	Auswirkung der Kleberschicht auf den Feuchtetransport – ohne freies Wasser (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)	56
4.13	Auswirkung der Kleberschicht auf den Feuchtetransport – mit freiem Wasser (L1 = Lamelle 1, L2 = Lamelle 2, L3 = Lamelle 3)	57
4.14	Verläufe der Übergangskoeffizienten k_{c_v} und k_{c_f} in der Fuge zwischen Beton und Holz über die ersten 28 Tage	58
a	Oberseite	58
b	Kervenflanke	58
5.1	Ergebnisse der Freiheitsgrade aus der Feuchtesimulation nach 28 Tagen für das Modell CLT+FT_0%	61
a	NT11: c_b [g m^{-3}]	61
b	NT12: c_v [g m^{-3}] $\cdot 10^{-4}$	61
c	NT13: c_w [g m^{-3}]	61
d	NT14: T [K]	61
5.2	Ergebniss der Holzfeuchtigkeit u in [%] aus der Feuchtesimulation nach 28 Tagen für das Modell CLT+FT_0%	62
5.3	Ergebnisse der Holzfeuchtigkeit u in [%] über die ersten 28 Tage	63
a	0h	63
b	12h	63
c	5d	63
d	10d	63
e	15d	63
f	20d	63
g	25d	63
h	28d	63
5.4	Betrachteter Pfad zur Auswertung der Feuchte über die Zeit	64
5.5	Holzfeuchteverlauf über die Plattendicke für das Modell ohne Versiegelung über den Zeitraum von Juni 2003 bis Juni 2005	65
a	feuchtes Innenklima	65
b	trockenes Innenklima	65
5.6	Holzfeuchteverlauf über die Plattendicke für das Modell mit Fertigteil, über den Zeitraum von Juni 2003 bis Juni 2005	68
a	feuchtes Innenklima	68
b	trockenes Innenklima	68
5.7	Pfad zur Ergebnissauswertung in der Schubfuge	69
5.8	Auswertung an gewählten Punkten entlang der Schubfuge über 10 Monate für Modell CLT+FB_0%	70

5.9	Zeitlicher Verlauf der Flächenanteile der gesamten Platte die 12 % (NKL1), 20 % (NKL2) bzw. 30 % (FSP) Holzfeuchtigkeit überschreiten	71
a	Volumenanteile	71
b	Vergrößerung für 20 % und 30 %	71
5.10	Mittelwert der Holzfeuchtigkeit über das gesamte Volumen	74
5.11	Holzfeuchteverlauf über die Plattendicke für das Modell mit 50 % Versiegelung an der Kervenflanke, über den Zeitraum von Juni 2003 bis Juni 2005	75
a	feuchtes Innenklima	75
b	trockenes Innenklima	75
5.12	Auswertung an gewählten Punkten entlang der Schubfuge über 10 Monate für Modell CLT+FB_50%	76
5.13	Holzfeuchteverlauf über die Plattendicke für das Modell mit 100 % Versiegelung an der Kervenflanke, über den Zeitraum von Juni 2003 bis Juni 2005	78
a	feuchtes Innenklima	78
b	trockenes Innenklima	78
5.14	Auswertung an gewählten Punkten entlang der Schubfuge über 10 Monate für Modell CLT+FB_100%	79
5.15	Mittelwert der Holzfeuchtigkeit über das gesamte Volumen für Modell CLT+FB_50% im Vergleich zum unversiegelten Modell	79
5.16	Zeitlicher Verlauf der Volumsanteile der gesamten Platte die 12 % (NKL1), 20 % (NKL2) bzw. 30 % (FSP) Holzfeuchtigkeit überschreiten für Modell CLT+FB_50%	80
a	Volumsanteile	80
b	Vergrößerung für 20 % und 30 %	80
5.17	Zeitlicher Verlauf der Volumsanteile der gesamten Platte die 12 % (NKL1), 20 % (NKL2) bzw. 30 % (FSP) Holzfeuchtigkeit überschreiten für Modell CLT+FB_100%	80
a	Volumsanteile	80
b	Vergrößerung für 20 % und 30 %	80
5.18	Mittelwert der Holzfeuchtigkeit über das gesamte Volumen für Modell CLT+FB_100% im Vergleich zum unversiegelten Modell	81
5.19	Feuchteverlauf 2 cm im Platteninneren entlang der Schubfuge: Vergleich zwischen den drei Versiegelungsgraden	82



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

Tabellenverzeichnis

2.1	Diagonaleinträge von \mathbf{K}_w und \mathbf{K}_r nach [40]	25
2.2	Formfaktoren der Sorptionsisotherme nach [14]	27
2.3	Hilfswerte für die Reaktionsfunktion H_c	28
2.4	Hilfswerte für die Reaktionsfunktion H_{wv}	30
4.1	Verwendete Modelle	53
4.2	Elementabmessungen des FE-Netzes	55
5.1	Zuordnung von Tragwerken zu Nutzungsklassen (NKL) nach [35]	72
5.2	Werte für k_{mod} für CLT nach [35]	73