



Langzeituntersuchung zur Feuchte

Langzeituntersuchung zu den Auswirkungen wechselnder Feuchtegradienten in blockverleimten Brettschichtholzträgern

Forschungsbericht

Schlussbericht

Bericht Nr. 2851.DHB

Auftrag Nr. BAFU Gesuch 2013.06

Klassifizierung Öffentlich

Datum 16. Juni 2016

Auftraggeber Bundesamt für Umwelt BAFU
Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung
3003 Bern

Adresse der Forschungsstelle Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel
www.ahb.bfh.ch

Verfasser Bettina Franke, Andreas Müller, Steffen Franke,
Noëlie Magnière

Projektverantwortlicher Andreas Müller

Institutsleiter Andreas Müller

Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

ISBN 978-3-9523787-7-9

© by Bern University of Applied Sciences

2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced in any form or by any means, electronical, mechanical, photocopying, recording, scanning or otherwise, without permission of the publisher.

Published by

Bern University of Applied Sciences

Institute for Timber Construction, Structures and Architecture

Solothurnstrasse 102

2500 Biel 6

Switzerland

Abstract

Die Auswirkungen des hygroskopischen Materialverhaltens von Holz auf den Tragquerschnitt aus Brettschichtholz wurden im Forschungsvorhaben untersucht. Hierfür wurden in einem ersten Schritt die klimatischen Beanspruchungen für unterschiedliche Gebäudetypen (z. B. Produktions-, Verkaufs- und Lagerhallen, Eisstadien, Reithallen oder Schwimmbäder) und für Brückenkonstruktionen recherchiert und bewertet. Das Klima hier bestehend aus Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte wurde jeweils am Objekt direkt durch installierte Messtechnik erfasst. Für die Brückenkonstruktionen wurde ergänzend zu lokal aufgezeichneten Messdaten zum Klima auch das Makroklima von einer nächstgelegenen Wetterstation mit ausgewertet. Anhand der gewonnenen Daten konnte die zu erwartende Streuung von Temperatur und Luftfeuchte je Gebäudetyp und respektive die rechnerisch zu erwartende Ausgleichsholzfeuchte an der Oberfläche bestimmt werden. Mit diesen Ergebnissen konnte eine Empfehlung für die Zuordnung zu den Feuchteklassen der SIA 265:2012 für den Nachweis der Tragsicherheit erfolgen.

Im Weiteren wurden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Querschnitten zur zeitlichen Erfassung der Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt für einen Auffeuchtungsprozess durchgeführt. Die Versuchsreihen gliedern sich in die drei Materialachsen, in denen der Feuchtetransport zugelassen wurde. Abschliessend wurde ein grossformatiger Prüfkörper aus blockverleimten Brettschichtholz installiert, wo

der Holzfeuchtetransport in radialer und tangentialer Richtung gemessen wird.

Die gewonnenen Messdaten zeigen die zeitliche Entwicklung der Holzfeuchte über den Querschnitt und die Differenzen in den drei Materialachsen. Für die radiale und tangentiale Materialrichtung liegt nach einer einjährigen massiven Auffeuchtung mit 20°C und 65 % rel. Luftfeuchte immer noch ein Feuchtegradient über den Querschnitt von 200 mm Breite vor. Dies zeigt, dass eine Klassifizierung von einer beanspruchten und ruhigen Zone über den Querschnitt möglich ist. Für die Definition der Grösse der beanspruchten Zone sind noch weiterführende Untersuchungen notwendig. Es konnten zusätzlich erste Ergebnisse über das Dehnungsverhalten vom Holz während der Auffeuchtung für die Beurteilung der internen Spannungen gewonnen werden.

Abschliessend wurden erste numerische Simulationen zur Abbildung des Auffeuchtungsprozesses im Holz durchgeführt. Die erreichten Ergebnisse konnten anhand von publizierten Versuchsergebnissen und eigenen Langzeitmessungen an Holzbrücken erfolgreich validiert werden. Hiermit steht ein numerisches Simulationsmodell zu Abschätzung der zu erwartenden Holzfeuchte über den Tragquerschnitt zur Verfügung, was für die Praxis aber auch für weiterführende Untersuchungen zur Abschätzung der Querschnittsabhängigkeit der beanspruchten Zone dienen kann.

Keywords Holzfeuchte, Brettschichtholz, Langzeitmessung, Eigenspannungen

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	7
1 Ausgangslage	9
2 Projektbeteiligte	10
3 Vorgehensweise	10
4 Forschungsarbeit und -ergebnisse	11
4.1 Ausgleichsfeuchte in Holz und die Reaktion	11
4.2 Berücksichtigung der Holzfeuchte in Standards/Normung	12
4.3 Klimasituationen für Holzkonstruktionen	13
4.3.1 Überdachte Konstruktionen, Innenraumklimasituationen	13
4.3.2 Brückenkonstruktionen	15
4.3.3 Diskussion der Klimasituation	16
4.4 Laborversuche	18
4.4.1 Materialachsen orientierende Versuche	18
4.4.2 Blockprüförper	20
4.4.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	22
4.4.3.1 Materialachsen orientierte Versuchsreihen 200/200/200 mm	22
4.4.3.2 Materialachsen orientierte Versuchsreihen 200/200/800 mm	23
4.4.3.3 Blockprüförper 800/800/600 mm	26
4.4.4 Diskussion der Ergebnisse	28
4.5 Numerische Simulation der Auffeuchtung von Holz	30
4.5.1 Exponentielles kinetisches Modell	30
4.5.2 Anwendung des numerischen Modells der Software WUFI®	30
4.5.3 Validierung mit Ergebnissen aus der Literatur	33
4.5.4 Anwendungsbeispiel Brücke Horen	35
5 Zusammenfassung Schlussfolgerungen	38
5.1 Analyse des Klimas an und in Bauwerken	38
5.2 Experimentelle und numerische Untersuchungen	39
5.3 Empfehlungen für die Praxis zusammengefasst	40
6 Danksagung	40
7 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	41
8 Verzeichnisse	41
8.1 Literaturverzeichnis	41
8.2 Tabellenverzeichnis	42
8.3 Abbildungsverzeichnis	42

Anhang A: Klimasituationen	45
A.1 Gebäudetypen und Datenquellen für Innenklima	45
A.2 Auswertung des Innenklimas nach Gebäudetyp	46
A.3 Klima an Brücken	48
A.3.1 Eckdaten zu den Brücken und genutzten Wetterstationen	48
A.3.2 Analyse des gleitenden Durchschnitts über 10 Tage	49
A.4 Vergleich Wetterstation lokale Messung an Brücke	50
A.4.1 Brücke Horen	50
A.4.2 Brücke Bubenei	51
A.4.3 Brücke Luthern	52
A.4.4 Brücke Muothatal	53
A.4.5 Brücke Obermatt	54
A.4.6 Brücke Schachenhaus	55
Anhang B: Experimentelle Untersuchungen	56
B.1 Messpositionen und Messgrößen blockverleimter Brettschichtholzkörper	56
B.2 Messergebnisse	57
B.2.1 Klimatisierung Prüfserien	57
B.2.2 Ergebnisse Darrproben	57
B.2.3 Entwicklung Holzfeuchte je Messtiefe und Materialrichtung, 200/200/200 mm	59
B.2.4 Entwicklung Holzfeuchte je Messtiefe und Materialrichtung, 200/200/800 mm	60
B.2.5 Entwicklung Holzfeuchte je Messtiefe und Materialrichtung, 600/600/800 mm	61
B.2.6 Vergleich 200/200/200 mm und 200/200/800 mm	62
Anhang C: Numerische Simulation / WUFI	63
C.1 Materialkenngrößen WUFI	63
C.2 Anwendungsbeispiel Brücke Horen	64
C.2.1 Messstellen der Brücke Horen	64
C.2.2 Numerisches Simulationsergebnis für Brücke Horen	64

Nomenklatur

L	Longitudinale Materialachse
R	Radiale Materialachse
T	Tangentielle Materialachse

		Einheit
LF	Luftfeuchte	[%]
LT	Lufttemperatur	[°C]
u	Holzfeuchte in Massenprozent	M%

E	Elastizitätsmodul	[N/mm ²]
σ	Spannung	[N/mm ²]
f	Festigkeit	[N/mm ²]
α	Quell-/Schwindmass	[%/M%]

1 Ausgangslage

Der Werkstoff Holz und seine Leistungsfähigkeit sind durch vielseitig weitspannende Konstruktionen, wie Schwimmbädern und Eistadien, aber auch für Brücken für den Fussgänger- und Radfahrerverkehr wie auch für den Strassenverkehr bekannt. Die historisch bekannten Vollholzquerschnitte werden hier durch die Brettschichtholzträger, Hybridquerschnitte und blockverleimte Brettschichtholzträger abgelöst. Gegenüber Holz sind, in Konkurrenz zu den anderen Konstruktionsmaterialien wie Beton, Stahlbeton und Stahl, immer noch Hemmnisse bei den Planern vorhanden, die die Anzahl der Projekte beschränkt. Die Akzeptanz von Holz bei Planern und Ausführenden erhöht sich durch qualitativ abgesicherte und fundierte Bemessungs- und Planungsgrundlagen. Für den Bereich des Tragwiderstandes und der Gebrauchstauglichkeit sind grundlegende Richtlinien in der SIA 265:2012 und der SN EN 1995:2010 (EC 5) dem Planer gegeben. Demgegenüber stehen in der Planungspraxis gegenwärtig keine ausreichenden Kenntnisse über das Feuchte-, Dimensionsänderungs- sowie Dehnungs- und Spannungsverhalten für die immer grösser werdenden Querschnitte infolge der angestrebten Spannweiten zur Verfügung.

Der jahreszeitliche Klimawechsel führt zu einem Wechsel in der Lufttemperatur und Luftfeuchte. Bauteile aus Holz passen sich diesem wechselnden Klima durch das hygrokopische Materialverhalten an. In zeitlicher Reihenfolge ändert sich die Holzfeuchte an den Aussenseiten der Querschnitte zuerst und es entsteht ein inhomogener Verlauf der Feuchte über die Querschnittsfläche. Eine Änderung der Holzfeuchte führt zu einem inhomogenen Spannungsverlauf über den Querschnitt und ruft Zwangsspannungen hervor die zu tragfähigkeitsbeeinträchtigten Rissen führen können, Winter et al. (2012).

Der Fokus liegt auf grossformatige Brettschichtholzquerschnitten oder blockverleimten Brettschicht-hölzern im Anwendungsbereich von Brückenkonstruktionen. Die Haupttragelemente von Brücken sind in der Regel durch konstruktive Massnahmen, wie geschlossenen Deckbelag oder hybriden Brückenquerschnitt (Holz-Beton Verbund) bereits wirksam vor Meteowasser/Schlagregen geschützt, siehe Abb. 1, Abb. 2. Dennoch treten Holzfeuchteänderungen auf und resultieren in Spannungsunterschieden, Franke et al. (2012).



Abb. 1: Überführung in Horen mit blockverleimten Brettschichtholzträgern



Abb. 2: Holz-Beton Verbundbrücke bei Bulle

Im Rahmen des Projektes ist es das Ziel, die Auswirkungen von wechselnden klimatischen Bedingungen auf das Langzeittragverhalten von Holz zu beurteilen. Für die Einschätzung der Auswirkung und die spätere Erarbeitung von Empfehlungen für Planer und Ausführende sollen für verschiedene Klimasituationen die resultierenden Ausgleichsfeuchten im Holz erfasst werden. Hierzu sind zunächst typische Klimasituationen von Bauwerken mit verschiedenen Nutzungsprofilen, z. B. Eissporthallen, Schwimmbädern oder Brückentragwerken auszuwerten. Für die Messung der Ausgleichsfeuchte ist ein Prüfprogramm geplant, in dem verschiedene Querschnitte, mit geeigneter Messtechnik präpariert, in Klimakammern typischen Auffeuchtung ausgesetzt werden.

Die innerhalb der Auswertung der Prüfergebnisse aus experimentellen Versuchsreihen gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Erarbeitung von Empfehlungen für die Praxis dienen. Ziel ist, für den planenden Ingenieur zu den vorhandenen normativen Feuchteklassen Aussagen über das Spannungs-Dehnungsverhalten und den damit eventuell auftretenden Rissbildern bereitzustellen.

2 Projektbeteiligte

Das Forschungsprojekt wurde von der Berner Fachhochschule, dem Institut Holzbau, Tragwerke und Architektur, lanciert und primär durchgeführt. Die Förderung erfolgt durch das Bundesamt für Umwelt, den Wald- und Holzforschungsfonds. Die Ziele des Forschungsvorhabens sind äusserst praxisrelevant und wurden deshalb durch die nachfolgenden genannte Wirtschaftspartner und öffentlichen Organisationen unterstützt und beraten.

Bundes Amt für Umwelt (BAFU), Wald- und Holzforschungsfonds, Bern, Herr Werner Riegger

Roth Holzleimbau + Stahlbau AG, Burgdorf, Herr Franz Lenherr

Makiol + Wiederkehr, Beinwil am See, Herr Kurt von Felten

Kantonales Tiefbauamt Bern, Herr Martin Schneider, Herr Fritz Stalder

3 Vorgehensweise

Die Realisierung der geschilderten Ziele und Forschungsfragen wurde in einen Forschungszeitraum von 30 Monaten umgesetzt. Die Projektlaufzeit resultiert aus den repräsentativen Messzeiträumen zur Erfassung der Auswirkungen von klimatischen Änderungen. Das Forschungsprojekt gliederte sich insgesamt in vier Arbeitspakte:

AP1: Klimasituationen und resultierende Messergebnisse

- Erfassung und Auswertung typischer Klimasituationen von Bauwerken mit verschiedenen Nutzungsprofilen, z. B. Sport- und Reithallen, Eissporthallen, Schwimmbädern oder Brückentragwerken

AP2: Optimierung der Messtechnik

(separates Forschungsgesuch und Förderung durch Berner Fachhochschule)

AP3: Messung von Feuchtegradienten und den resultierenden Spannungen

- Stufenweises Prüfprogramm, beginnend beim Brettschichtholzquerschnitt bis zum block-verleimten Brettschichtholzblock
- Präparation der Prüfkörper mit Messtechnik und Kalibrierung
- Abbildung realitätsnäher und extremer Klimasituationen im Labor zur Gewinnung der Feuchtegradienten und des resultierenden Dehnungsverhaltens

AP4: Erarbeitung von Empfehlungen für die Praxis anhand der Bewertung der Messergebnisse

- Vergleich und Auswertung der Messergebnisse von den Prüfkörpern im Labor und von In-situ Messungen an ausgewählten Brücken
- Bewertung der Auswirkung von wechselnden Feuchtegradienten innerhalb verschiedener Querschnittsgrößen
- Wissenstransfer der gewonnenen Erkenntnisse für das Fachpublikum

Das im Forschungsvorhaben aufgeführte Arbeitspaket 2 wird über ein separates Forschungsvorhaben, „Entwicklung und Einsatz optimierter Fiber-Bragg-Grating Sensoren zur Langzeitüberwachung von Holzbauteilen“, was von der Berner Fachhochschule (BFH) gefördert wird, abgedeckt. Das Forschungsvorhaben ist interdisziplinär zwischen den Departementen Technik und Informatik wie Architektur, Holz und Bau. Die Inhalte und Ergebnisse werden in diesem Forschungsbericht nicht dargelegt.

4 Forschungsarbeit und -ergebnisse

4.1 Ausgleichsfeuchte in Holz und die Reaktion

Das hygrokopische Materialverhalten von Holz respektive die resultierende Holzfeuchte hängen primär von der umgebenden Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit ab. Die Änderung des Holzfeuchtegehaltes in Abhängigkeit des Umgebungsklimas ruft im Querschnittsinneren Spannungen hervor, die zu Rissen im Querschnitt führen können. Der schematische Ablauf bei einer Auffeuchtung von 12 M% auf 18 M% ist in Abb. 3 für einen Holzquerschnitt dargestellt. Der sich einstellende Feuchtegradient ruft durch das Quellverhalten vom Holz Druckspannungen in den Randzonen des Querschnittes hervor. Im Querschnittsinneren entstehen demgegenüber Querzugspannungen infolge des verzögerten Feuchteanstieges. Die Querzugfestigkeit von Holz ist sehr gering und geht aufgrund von natürlichen Defekten gegen Null, weshalb frühzeitig die Gefahr der Rissbildung im Querschnittsinneren besteht.

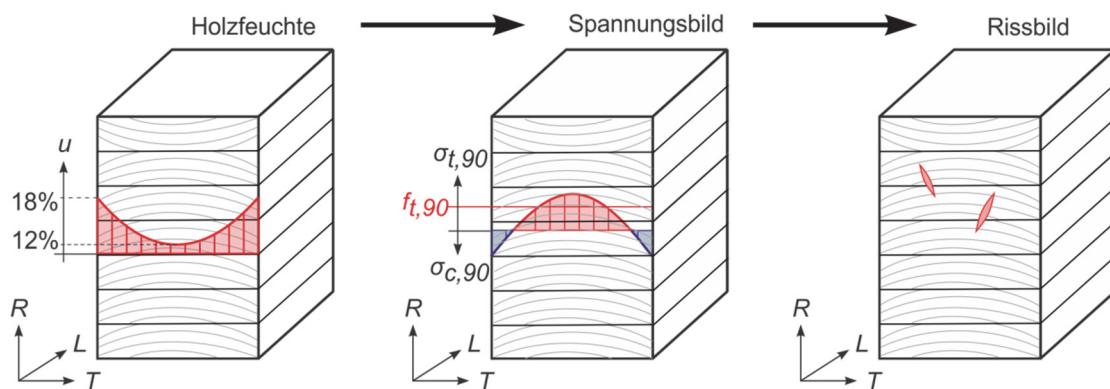


Abb. 3: Auffeuchtung im Holz mit korrespondierender Spannungsverteilung sowie dem möglichen Rissbild

Für die Abschätzung der Ausgleichsfeuchte im Holz können die Sorptionsisothermen nach Keylwerth & Noack (1964) genutzt werden oder es kann eine analytische Berechnung anhand des Models von Simpson (1973) durchgeführt werden.

$$U_{EMC} = \frac{1800}{M_p} \left(\frac{K_1 \varphi}{(1-K_1 \varphi)} + \frac{K_2 K_1 \varphi + 2 K_3 K_2 K_1^2 \varphi^2}{1 + K_2 K_1 \varphi + K_3 K_2 K_1^2 \varphi^2} \right) \quad (1)$$

Hierin:

$$M_p = 349 + 1.29t + 1.35 \cdot 10^{-2}t^2$$

$$K_1 = 0.805 + 7.36 \cdot 10^{-4}t - 2.73 \cdot 10^{-6}t^2$$

$$K_2 = 6.27 - 9.38 \cdot 10^{-3}t - 3.03 \cdot 10^{-4}t^2$$

$$K_3 = 1.91 + 4.07 \cdot 10^{-2}t - 2.93 \cdot 10^{-6}t^2$$

Wobei t die Temperatur in °C und φ die relative Luftfeuchtigkeit in [% / 100] ist.

Die Grösse der tatsächlichen Spannungen die im Querschnittsinneren hervorgerufen werden ist demgegenüber nicht eindeutig. Die Arbeit von Angst (2012) gibt einen sehr guten orientierenden Überblick zur Entstehung von Spannungen im Querschnittsinneren infolge von Feuchteänderungen und deren numerischen Abbildung. Die Differenzierung über den Querschnitt, insbesondere für Blockverleimte Brettschichtholzquerschnitte ist noch nicht erfolgt.

4.2 Berücksichtigung der Holzfeuchte in Standards/Normung

Die Änderung der Holzfeuchte ruft nicht nur innere Spannungen im Querschnitt hervor sondern beeinflusst auch die physikalischen Eigenschaften von Holz. Aus diesem Grund wird für den Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eine Eingruppierung in Feuchteklassen nach SIA 265:2012 vorgenommen. Entsprechend der Feuchtekasse erfolgt eine Reduzierung der Materialkenngrößen. Die Normung unterscheidet drei Feuchteklassen, wo jeweils die Einstufung über die mittlere Holzfeuchte im Bauteil erfolgt, s. Tabelle 1. Im Europäischen Raum variieren die Grenzwerte für die Feuchteklassen wie auch die Festigkeits- und Steifigkeitsreduktion. Tabelle 2 gibt die Holzfeuchte für Bauteile nach der Lage und Charakteristik an und weist die Feuchtekasse wie auch die Reduktionsfaktoren nach SIA 265:2012 zu. Hierbei ist vom planenden Ingenieur zu beachten, dass die angegebenen Werte nur für die klimatischen Bedingungen des Mittelandes gelten. „Für Jura und Voralpen sind die Werte etwas höher, für die Alpentäler etwas tiefer anzusetzen. Lokalklimatische Besonderheiten sind zu berücksichtigen.“, SIA 265:2012. Dies erfordert gerade für spezielle Bauten und Brückenkonstruktionen vom planenden Ingenieur eine individuelle Beurteilung des zukünftig auftretenden Klimas, welches nicht immer ohne weiteres möglich ist. Fehleinschätzungen im positiven wie negativen Sinne rufen deutliche Unterschiede in den Reduktionsfaktoren für die Materialeigenschaften hervor, was direkt die Nachweise der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit beeinflusst. Im Forschungsvorhaben werden demzufolge verschiedene Gebäudetypen und Brückenkonstruktionen, für die Messdaten zum Klima vorliegen, ausgewertet und beurteilt.

Tabelle 1: Mittlere Holzfeuchten entsprechend der Feuchteklassen nach SIA 265:2012, EN 1995-1-1:2004 und den Nationales Anwenderdokument für Frankreich und Deutschland

Feuchtekasse		SIA 265:2012	EN1995-1-1:2004	NA Frankreich 2007	NA Deutschland 2010
1	Vor der Witterung geschützt	$\leq 12 \text{ M\%}$	$\leq 12 \text{ M\%}$	12 bis 20 M%	5 bis 15 M%
2	Teilweise vor der Witterung geschützt oder direkt bewittert	12 bis 20 M%	12 bis 20 M%	12 bis 20 M%	10 bis 20 M%
3	Feucht oder unter Wasser	$> 20 \text{ M\%}$	$> 20 \text{ M\%}$	12 bis 20 M%	12 bis 24 M%

Tabelle 2: Zuordnung der Feuchtekasse zur durchschnittlichen Holzfeuchte von Bauteilen nach SIA 265:2012

Lage der Bauteile	Durchschnittliche Holzfeuchte	Feuchtekasse	Festigkeitsreduktion ¹⁾	Steifigkeitsreduktion ¹⁾
Vor der Witterung geschützte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in gut belüfteten, im Winter gut beheizten Räumen - in gut belüfteten, im Winter schwach beheizten Räumen - in gut belüfteten, unbeheizten Räumen 	$9\% \pm 3\%$ $12\% \pm 3\%$ $15\% \pm 3\%$	1 1 oder 2 2	1.0 1.0 oder 0.8 0.8	1.0 1.0 oder 0.9 0.9
Vor der Witterung teilweise geschützte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in offenen, überdachten Konstruktionen - kleine Querschnitte (z.B. Fassadentäfer) <ul style="list-style-type: none"> o stark strahlungsabsorbierend o wenig strahlungsabsorbierend - mittlere Querschnitte (z.B. Balkenteile unter Dach) <ul style="list-style-type: none"> o stark strahlungsabsorbierend o wenig strahlungsabsorbierend 	$17\% \pm 5\%$ $15\% \pm 5\%$ $17\% \pm 4\%$ $13\% \pm 4\%$ $16\% \pm 4\%$	2 oder 3 1 oder 2 2 oder 3 1 oder 2 2	0.8 oder 0.6 1.0 oder 0.8 0.8 oder 0.6 1.0 oder 0.8 0.8	0.9 oder 0.75 1.0 oder 0.9 0.9 oder 0.75 1.0 oder 0.9 0.9
Direkt bewitterte Bauteile mit grösseren Querschnitt <ul style="list-style-type: none"> - durchschnittlich - äussere Zone des Querschnitts 	$18\% \pm 6\%$ $20\% \pm 8\%$	2 oder 3 2 oder 3	0.8 oder 0.6 0.8 oder 0.6	0.9 oder 0.75 0.9 oder 0.75
Feuchte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in feuchten, ungenügend durchlüften Räumen - Bauteile unter Wasser (Süsswasser) 	$> 24\%$ über Fasersättigung	3 3	0.6 0.6	0.75 0.75

¹⁾ für Voll- und Brettschichtholz

4.3 Klimasituationen für Holzkonstruktionen

4.3.1 Überdachte Konstruktionen, Innenraumklimasituationen

Je nach Gebäudenutzung ergeben sich unterschiedliche Raumklimas. Die Situationen in Schwimmbädern, Reithallen, Eisstadien und Lager-/Verkaufshallen zeigen ein gleichwertiges Nutzungsprofil. Für die Klimaanalyse und Untersuchung zur Gruppierung wurden zusätzlich zu eigenen Messungen die Ergebnisse von der TU München aus dem Forschungsvorhaben „Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen“ genutzt, Winter et al. (2012). Die TU München untersuchte zahlreiche Objekte und erfasste hier neben den klimatischen Wechseln auch die Holzfeuchte an markanten Punkten und Querschnittstiefen über mindestens ein Jahr. Ferner wurden Forschungsarbeiten von Cruz (2006) und Jorge (2013) zu Schwimmhallen, Dachgeschossen und Sporthallen herangezogen. Es konnten insgesamt 24 Objekte ausgewertet werden. In Tabelle 3 sind die betrachteten Gebäudetypen und der jeweilige Datenquelle zusammengefasst. Die ausführlichen Kenndaten zu jedem Objekt sind im Anhang A.1 enthalten.

Abb. 4 zeigt exemplarisch den erfassten Verlauf der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit sowie die rechnerisch resultierende Ausgleichsfeuchte an der Oberfläche des Holzes für das Eisstadion in Aarau der Schweiz. Der tendenzielle Trend der einzelnen Messdaten bzw. rechnerischen Ergebnisse ist mit einer gemittelten Kurve über 10 Tage verdeutlicht. Eine Absenkung der Luftfeuchte ab März 2014 führt erkennbar zur Reduzierung der rechnerischen Holzfeuchte an der Oberfläche. Tabelle 4 zeigt den Mittelwert, das Minimum und Maximum für die Lufttemperatur, Luftfeuchte und die theoretisch rechnerische Ausgleichsfeuchte im Holz für das Eisstadion in Aarau. Weiterhin wird die Variation der Werte für einen Messzeitraum von 6 Monaten angegeben. Bereits hier tritt infolge des Klimawechsels eine theoretische Änderung der Holzfeuchte von 18 M% an der Oberfläche auf. In der Regel wird im Holzquerschnitt nicht dieses hohe Feuchtegefälle in der Praxis erreicht, da die extremen Klimata überwiegend kurzzeitig sind und nicht direkt zeitlich aufeinander folgen.

Tabelle 3: Zusammenstellung der berücksichtigten Gebäudetypen

Gebäudetyp	Anzahl	Datenursprung
Eisstadion	5	Berner Fachhochschule, Gamper et al. (2013)
Schwimmhalle	4	Gamper et al. (2013), Jorge (2013)
Reithalle	3	Gamper et al. (2013)
Warenhaus	3	Gamper et al. (2013)
Produktionshalle	2	Gamper et al. (2013)
Dachstühle in Holz	2	Cruz (2006)
Sporthallen, Multifunktionshallen	5	Gamper et al. (2013), Jorge (2013), Cruz (2006)

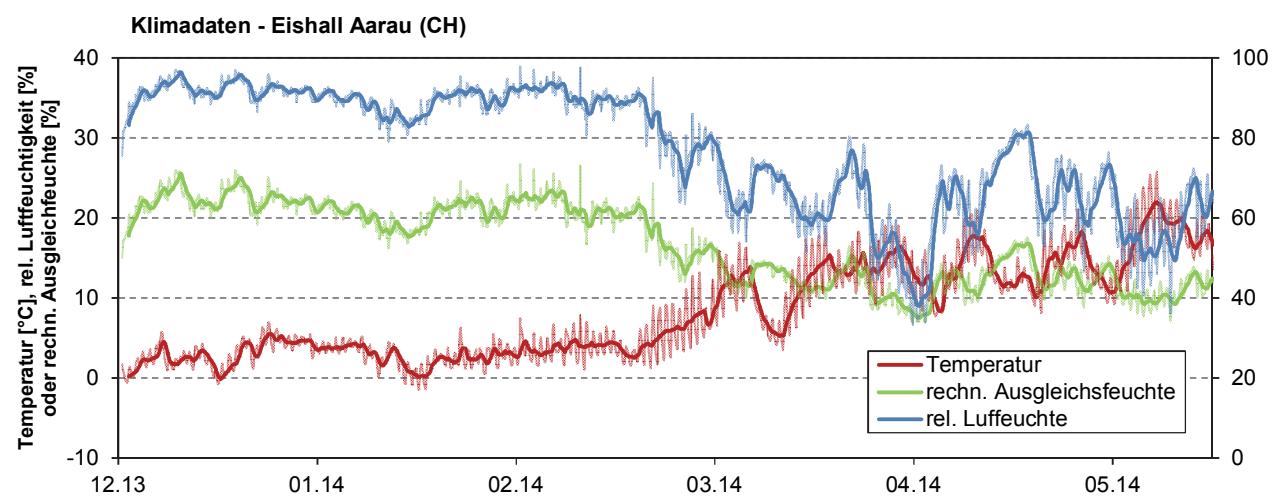


Abb. 4: Klimasituation für das Eisstadion in Aarau, Schweiz

Tabelle 4: Kenngrößen des Klimas im Eisstadion Aarau

	Mittelwert	Minimum	Maximum	Variation
Temperatur [°C]	8.2	-0.1	22.0	22.1
Relative Luftfeuchte [%]	77.1	38.0	96.4	58.4
Ausgleichsfeuchte im Holz [M%]	16.8	7.5	25.5	18.0

Jedes Gebäude von Tabelle 3 wurde entsprechend dem Eisstadion in Aarau ausgewertet. Die Zusammenfassung der Daten für die Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit ist in Abb. 5 dargestellt und im Anhang A.2 enthalten. Anhand der vorliegenden Klimadaten wurden die rechnerische Ausgleichsfeuchte an der Oberfläche vom Holz bestimmt, s. Abb. 6 und Anhang A.2.

Der in Abb. 6 enthaltene Vergleich der rechnerischen Ausgleichsfeuchte mit den Kriterien der Feuchteklassen nach SIA 265:2012 zeigt eine relativ gute Gruppierung der Gebäudetypen in eine Feuchtekasse. Die Feuchtekasse der SIA 265:2012 enthält die mittlere Holzfeuchte als Grenzwert. Eine mögliche Variation der Holzfeuchte über die Zeit ist in der SIA 265:2012 nicht dargelegt. Den analysierten Mittelwerten für diverse Bauwerke wurde die Variation (Amplitude von Minimum zu Maximum) über alle Objekte über einen Messintervall von mind. 3 Monaten gegenübergestellt, s. Abb. 6. Die Mittelwerte je Gebäudetyp weisen eine unterschiedliche Variation auf, dies begründet sich durch z. B. geschlossene/offene Eishallen, klimatisiert/nicht klimatisiert und die Art der Nutzung bei Produktionshallen unter anderem. Es kristallisiert sich deutlich heraus, dass für Eisstadien und Brückenbauwerke eine zeitliche Variation zu berücksichtigen ist. Eine globale Eingruppierung dieser Objekte in eine Feuchtekasse ist nicht einfach möglich ist. Innerhalb dieser Kategorien sollte eine individuelle Bewertung und Zuordnung zur Feuchtekasse erfolgen.

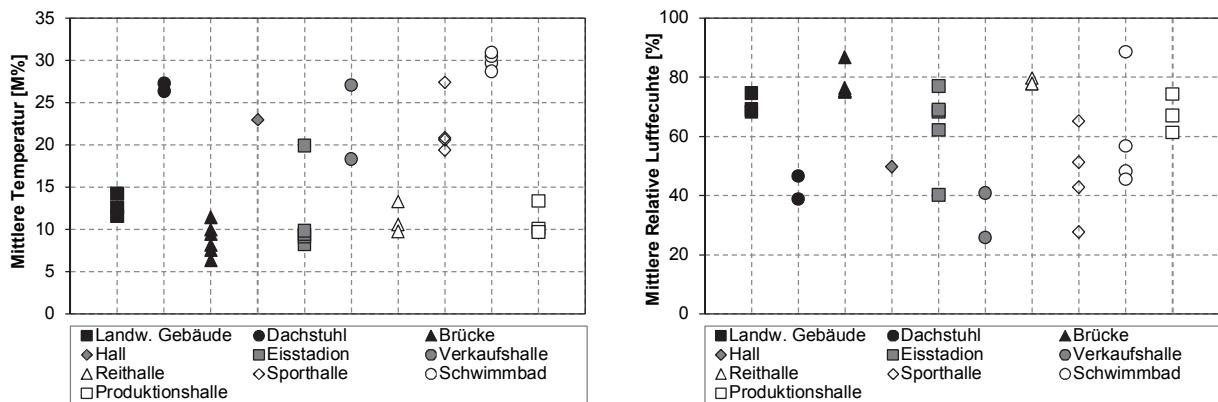


Abb. 5: Zusammenstellung der Mittelwert für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit je nach Gebäudetyp

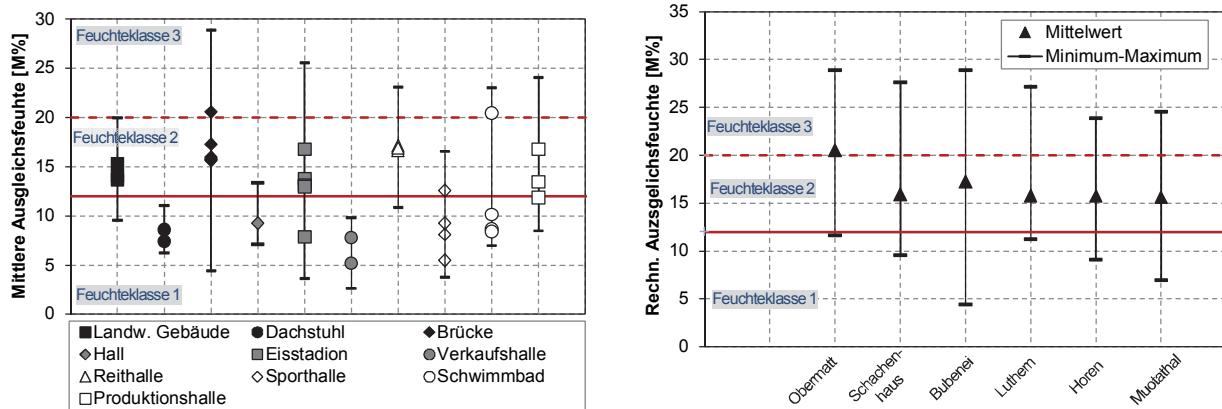


Abb. 6: Gegenüberstellung der mittleren rechn. Ausgleichfeuchte zu den Feuchteklassen nach SIA 265:2012

4.3.2 Brückenkonstruktionen

Für die Bewertung von frei dem Klima ausgesetzten Holzkonstruktionen sind die von der Berner Fachhochschule, des Institut Holzbau, Tragwerke und Architektur, überwachten Brücken ausgewertet wurden. Insgesamt konnten sechs Brücken, die in unterschiedlichen Regionen der Schweiz liegen, ausgewertet werden, s. Abb. 7 und Franke et al. (2012). In Abb. 9 ist für die Obermattbrücke im Emmental (Abb. 8) exemplarisch der Verlauf der Lufttemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und der rechnerischen Ausgleichsfeuchte an der Oberfläche vom Holz dargestellt. Die rechnerische Ausgleichsfeuchte ist hier für jeden Messzeitpunkt bestimmt wurden, eine zeitliche Verzögerung infolge des Feuchtetransportes im Holz und der Dauer der Einwirkung des Klimas wurde nicht berücksichtigt. Bei konstantem Klima würde die rechnerische Ausgleichsfeuchte der Holzfeuchte im Querschnitt entsprechen.

Zusätzlich zu den gemessenen Daten direkt an der Brücke sind die Kurven für die Wetterstation Langnau mit der Brückenmessung verglichen wurden. Die Daten von Schweizer Wetterstationen sind relativ flächendeckend in der Schweiz über das Internetportal www.meteoswiss.admin.ch verfügbar. In Tabelle 5 ist für die Obermattbrücke die statistische Auswertung der Lufttemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und der Ausgleichsfeuchte den Daten basierend auf der nächstgelegenen Wetterstation gegenübergestellt. Die Differenzen in den Messdaten resultieren auch in einer Differenz in der rechnerischen Ausgleichsfeuchte. Die aus den Mittelwert/Minimum/Maximum resultierende Ausgleichsfeuchte im Holz stellt sich über die Lebensdauer der Brücke im Querschnittsinneren ein. Kurz nach der Errichtung der Brücke ruft diese Ausgleichsfeuchte den kritischen Feuchtegradienten am Querschnittsrand hervor, wenn man ausgehend von Produktion die 12 M% im Holz annimmt und keine Vorkonditionierung erfolgte.

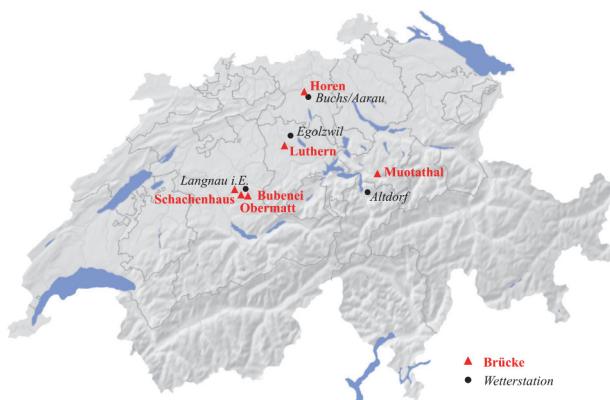


Abb. 7: Lage der überwachten Brücken



Abb. 8: Ansicht Obermattbrücke im Emmental, Balkenbrücke mit Spannweite 32 m und Nutzlast 40 Tonnen

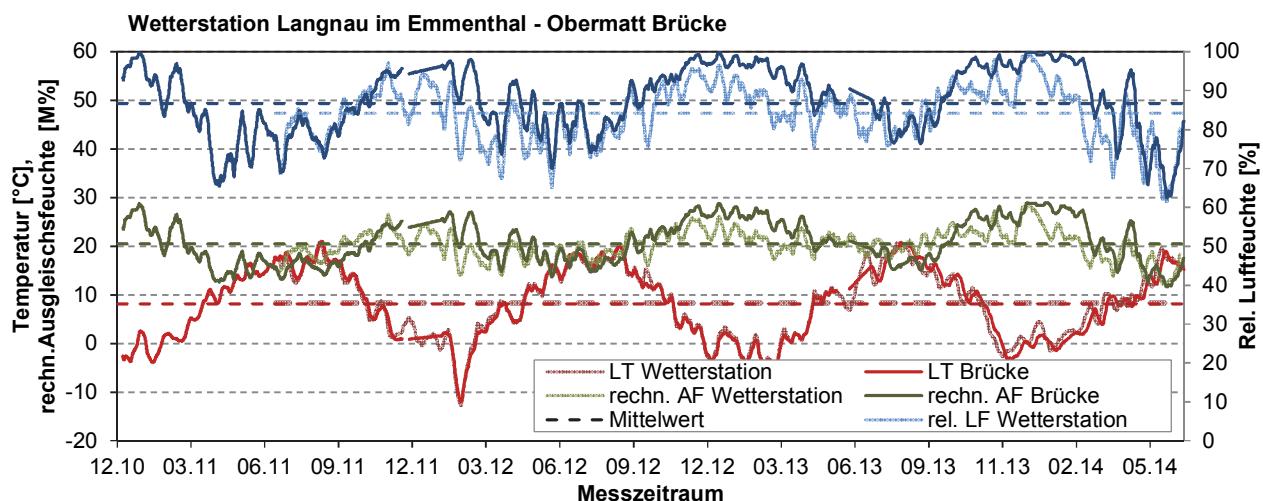


Abb. 9: Klimasituation für die Obermattbrücke, Vergleich Brückenmessung und Wetterstation

Die Differenz der gemessenen und aus den Klimadaten einer Wetterstation bestimmten rechnerischen Ausgleichsholzfeuchte erreicht für die Brücken bereits 6 M%, s. Tabelle 5. Die zeitliche Variation der Holzfeuchte über mind. 12 Monate liegt im gleichen Trend. Zu beachten ist, dass der Vergleich mit der Wetterstation immer für den direkt gemessenen Zeitraum an der Brücke erfolgte und somit für eine gleiche Wetterstation sich unterschiedliche Mittelwerte ergeben können, vgl. Langnau. Die Auswertung verdeutlicht, dass die lokalen Effekte bezogen auf dem Standort einer Brücke und die Art der Überführung nicht vernachlässigt werden dürfen. Einflüsse auf das lokale Klima infolge steter Beschatzung, Flora und Wind sind nicht zu vernachlässigen. Positiv ist, dass überwiegend die gemessenen Holzfeuchten geringer als die resultierenden von der Wetterstation sind.

Tabelle 5: Obermattbrücke; Vergleich lokale Brückenmessung zur globalen Wetterstation

Obermattbrücke	Mittelwert		Minimum		Maximum		Variation	
	Brücke	Meteo	Brücke	Meteo	Brücke	Meteo	Brücke	Meteo
Temperatur [°C]	8.0	8.3	-18.1	-19.1	25.3	31.7	43.4	50.8
Relative Luftfeuchte [%]	86.8	84.1	34.5	21.8	99.9	100.0	65.4	78.2
Ausgleichsfeuchte im Holz [M%]	20.6	20.3	6.9	4.7	29.0	29.1	22.1	24.3

Tabelle 6: Rechnerische Ausgleichsfeuchte für Brücken; Vergleich lokale Brückenmessung zur globalen Wetterstation

Brückenstandort / Swiss Meteostation	Messzeitraum	Mittelwert		Variation	
		Brücke	Wetterstation	Brücke	Wetterstation
Mouthatal / Altdorf	15 Monate	15.6	15.9	24.3	25.6
Horen / Buchs	12 Monate	15.6	17.5	23.3	23.6
Luthern / Egolzwil	14 Monate	15.7	20.5	20.2	22.9
Bubenei / Langnau	25 Monate	17.2	24.7	26.6	18.1
Obermatt / Langnau	45 Monate	20.6	20.3	22.1	24.3
Schachenhausen / Langnau	23 Monate	15.9	20.5	21.3	24.3

4.3.3 Diskussion der Klimasituation

Jedes Klima wird primär durch die Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit definiert. Sekundär sind die Einflüsse infolge Wind und Sonneneinstrahlung wie die umgebende Umwelt bei offenen Bauwerken zu berücksichtigen. Für jedes Wertepaar aus Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit kann mit Hilfe des Simpson Models die rechnerische Ausgleichsfeuchte von Holz an der Oberfläche bestimmt werden. Für mehrere Gebäudetypen konnte anhand des gemessenen zeitlichen Verlaufs der rechnerischen Ausgleichsfeuchte als Mittelwert und Variation um den Mittelwert (Amplitude von Minimum zu Maximum) beurteilt werden. Es wurde hierbei versucht immer mindestens 1 Jahr auszuwerten (in Abhängigkeit der Messdaten), so dass alle jahreszeitlichen Zustände abgebildet sind. In der rein rechnerischen Bestimmung der Ausgleichsfeuchte im Holz ist zu beachten, dass keine Unterscheidung zwischen der Auffeuchtung- und Abtrocknungsphase erfolgt. Je nach Klimasituation kann ein Delta von 1-2 M% auftreten.

Die Analyse der Innenklimas und der Klimasituationen an Holzbrücken diente zum einem als Ausgangsbasis für die Ableitung relevanter Klimaszenarien für die labortechnischen Untersuchungen und zum anderen zur Beurteilung von Gebäudetyp/Konstruktion in Bezug auf die klimatische Beanspruchung. Die erhaltenen Ergebnisse/Erfahrungen zeigen, dass für geschützte Bauteile die dem Klima ausgesetzt sind die Feuchteklass 2 zutreffend ist, s. Anpassung in Tabelle 7. Für die geschlossenen Bauten konzentrieren sich die Gebäudetypen relativ gut und eine Empfehlung der Zuordnung zu den Feuchteklassen nach SIA 265:2012 ist möglich, s. Tabelle 7. Wobei bei Eisstadien die grösste Variation der Messewerte festgestellt wurde und hier besonders die Randbedingungen infolge des späteren Nutzungsprofils (Ganzjahres- oder saisonal Betrieb) beachtet werden müssen. Die Änderung des Raumklimas respektive die Auswirkungen auf die Holzfeuchte infolge der fehlenden Abstrahlungs-

wärme durch eine aktive Eisfläche und der Nutzungsprofile der Halle (Training, Wettkampf, öffentliche Veranstaltung) sind nicht zu unterschätzen.

Für Brückenkonstruktionen im Speziellen war es das Ziel, den Unterschied zwischen den lokalen Mikroklima an der Brücke und den globalen Makroklima einer Schweizer Wetterstation zu bewerten. Die Auswertung in Tabelle 5 für alle betrachteten Brücken weist Differenzen auf. Der planende Ingenieur kann zunächst auf die Daten einer verfügbaren Schweizer Wetterstation zurückgreifen, muss aber die lokalen Effekte auf das Mikroklima an der Brücke berücksichtigen.

Das lokale Mikroklima an der Brücke wird unter anderem durch die Geländeform, den Bewuchs, die Funktion (Fluss-, Tal oder Strassenquerung) sowie die Windbeanspruchung charakterisiert. Den Effekt der lokalen Einflüsse auf das Mikroklima einer Brücke wird im Bericht von Finger und Meili (2002) bereits angemerkt. Anhand der überwachten Brücken kann eine erste Orientierung zur Abschätzung der Zusatzeffekt wie folgt gegeben werden:

- für Brücken über Verkehrswege sind keine Zusatzeffekte zu berücksichtigen
- für Brücken über Gewässer empfiehlt es sich eine Erhöhung von ca. 2 M% zu berücksichtigen
- für spezielle Standorte (Täler, Bergregion) empfiehlt sich eine Prognose mit Simulationsprogrammen

Ein weiterer wichtiger Punkt zur Abschätzung der Beanspruchung infolge des Klimawechsels ist die Art Weise wie die Bauteile geschützt sind. Die in der SIA 265:2012, s. Tabelle 2, verwendete Begrifflichkeit direkt bewitterte Bauteile ist zu prüfen. In der Praxis für Brücken werden die Tragelemente in der Regel konstruktiv geschützt und wären somit nur dem Klima direkt ausgesetzt aber nicht der Witterung. Der vom Ingenieur angestrebte stete konstruktive Ausschluss der nicht geschützten Wetterbeanspruchung wirkt sich zusätzlich positiv auf die Feuchtebeanspruchung respektive die Eingruppierung in die Feuchteklassen aus.

Tabelle 7: Anpassung der Feuchteklassen und Zuordnung der Gebäudetypen zu Feuchteklassen, in Anlehnung an SIA 265:2012

Lage der Bauteile	Durchschnittliche Holzfeuchte	Feuchte-klasse [*]	Gebäudetyp [*]
Vor der Witterung geschützte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in gut belüfteten, im Winter gut beheizten Räumen - in gut belüfteten, im Winter schwach beheizten Räumen - in gut belüfteten, unbeheizten Räumen 	9% ± 3% 12% ± 3% 15% ± 3%	1 1 oder 2 2	Dachstuhl Halle Verkaufshalle Produktionshalle Sporthalle
Vor der Witterung teilweise geschützte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in offenen, überdachten Konstruktionen - kleine Querschnitte (z.B. Fassadentäfer) <ul style="list-style-type: none"> o stark strahlungsabsorbierend o wenig strahlungsabsorbierend - mittlere Querschnitte (z.B. Balkenteile unter Dach) <ul style="list-style-type: none"> o stark strahlungsabsorbierend o wenig strahlungsabsorbierend 	17% ± 5% 15% ± 5% 17% ± 4% 13% ± 4% 16% ± 4%	2 2 2 2	Landwirtschaftliches Gebäude Brücke Schwimmhalle
Direkt bewitterte Bauteile mit grösseren Querschnitt <ul style="list-style-type: none"> - durchschnittlich - äussere Zone des Querschnitts 	18% ± 6% 20% ± 8%	2 oder 3 2 oder 3	
Feuchte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in feuchten, ungenügend durchlüften Räumen - Bauteile unter Wasser (Süsswasser) 	> 24% über Fasersättigung	3 3	

^{*} Empfehlung anhand Forschungsergebnisse

4.4 Laborversuche

4.4.1 Materialachsen orientierende Versuche

Zur Bewertung des materialachsenspezifischen Holzfeuchteverhaltens wurden Versuchsreihen durchgeführt, wo sich jeweils der Feuchtetransport in nur einer Materialachse konzentrierte. Ziel war es, die zeitliche Entwicklung des Holzfeuchtegehaltes über die Querschnittstiefen zu erfassen. Die Verwendung von Brettschichtholz als Versuchsmaterial ermöglicht auch erste orientierende Ergebnisse zu den Auswirkungen von Klebefugen. Die Versuchsergebnisse dienen auch zur Validierung von analytischen oder numerischen Simulationsmodellen für die Abbildung des hygrokopischen Verhaltens von Holz (z.B. Model von Hill (2010)). Anhand der Messdaten kann für jede Materialachse der Diffusionswiderstand für die Anwendung in numerischen Simulationen erarbeitet werden. Die Versuchsreihen gliedern sich in zwei Abmessungen für die jeweilige Materialachse, s. Tabelle 8.

Der Zuschnitt der Prüfkörper erfolgte aus einem Brettschichtholzträger, s. Abb. 10. Der Brettschichtholzträger wurde bei der Roth AG, Burgdorf unter den üblichen Produktionsbedingungen nach SIA 14080:2013 hergestellt. Die Lamellen hatten eine Dicke von 40 mm, die Normalrohdichte betrug im Mittel 443 kg/m³. Die Lamellen wurden nicht keilgezinkt. Die Verklebung der Lamellen erfolgte mit einem Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF) Klebstoff (Kauramin® Leim 683/ Kauramin® Härter 686).

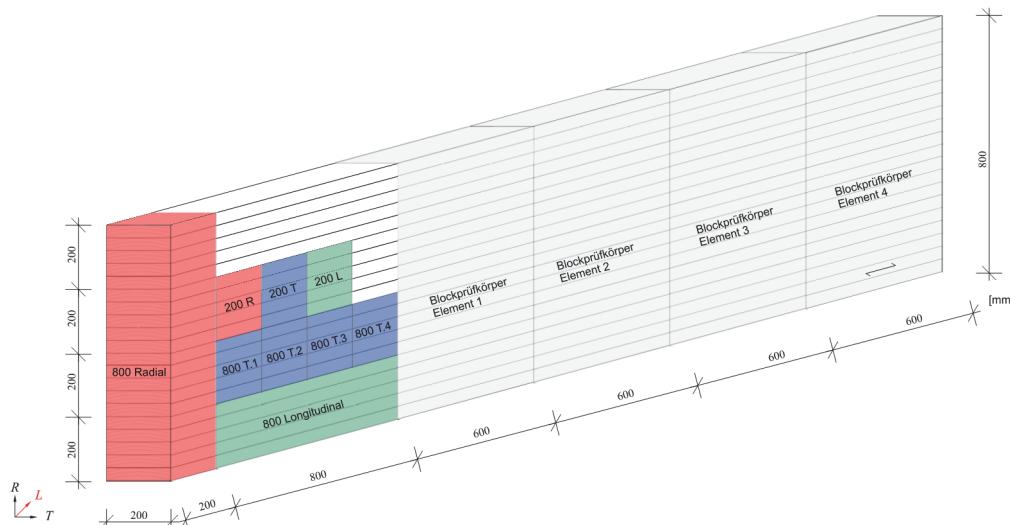


Abb. 10: Zuschnittsplan für die Prüfserien

In den Versuchen wurde sich auf die Auffeuchtungsphase konzentriert, da dies in der Praxis die kritischere Situation ist. Der Feuchtegradient infolge einer Auffeuchtung ruft im Querschnittsinneren Querzugsspannungen hervor die zu einer nicht sichtbaren Rissbildung führen können. Vor der Auffeuchtungsphase wurden die Prüfkörper im Normalklima bei 20°C und 65 % rel. Luftfeuchte bis zum Gleichgewicht von 12 M% konditioniert. Anschliessend erfolgt die Auffeuchtung der Prüfkörper bei einem konstant gesetzten Klima von 20°C und 95 % relative Luftfeuchte. Hierfür wurde der Klimaprüfschranke WK11-1500-40 der FA Weiss genutzt. In diesem Klima ist eine rechnerisch Ausgleichsfeuchte von 24 M% zu erwarten.

Tabelle 8: Kenngrössen für Materialachsen orientierte Versuche

Materialachse	Probengrösse [mm]	Messgrösse	Messtiefen [mm]	Messzeitraum
Radiale Richtung	200/200/200	Holzfeuchte	25/45/70/100	12 Monate
	200/200/800	Holzfeuchte Dehnung	25/45/70/100/200/300/400 25/45/70/100/200/300/400	6 Monate
Tangentielle Richtung	200/200/200	Holzfeuchte	25/45/70/100	12 Monate
	200/200/800	Holzfeuchte Dehnung	25/45/70/100/200/300/400 25/45/70/100/200/300/400	6 Monate
Longitudinale Richtung	200/200/200	Holzfeuchte	25/45/70/100	12 Monate
	200/200/800	Holzfeuchte Dehnung	25/45/70/100/200/300/400 25/45/70/100/200/300/400	6 Monate

Für die Erfassung der Holzfeuchteänderung wurde die elektrische Widerstandsmessverfahren angewandt. Als Messsonden wurden isolierte Edelstahlschrauben in vorgebohrte Löcher in den Querschnitt eingedreht. Für die Dehnungsmessung der Prüfkörperserie 200/200/800 mm wurden Dehnungsmessstreifen mit einer Messlänge von 20 mm appliziert. Die Messsonden wie auch Dehnungsmessstreifen sind mit ansteigendem Messstufenabstand implementiert, s. Abb. 12. Als Datenlogger für die Holzfeuchte wurde das Gigamodul in Verbindung mit dem Thermofox von der Firma Scanntronik Mugrauer GmbH verwendet. Für die Erfassung der Dehnungen wurde ein QuantumX mit Datalogger eingesetzt.

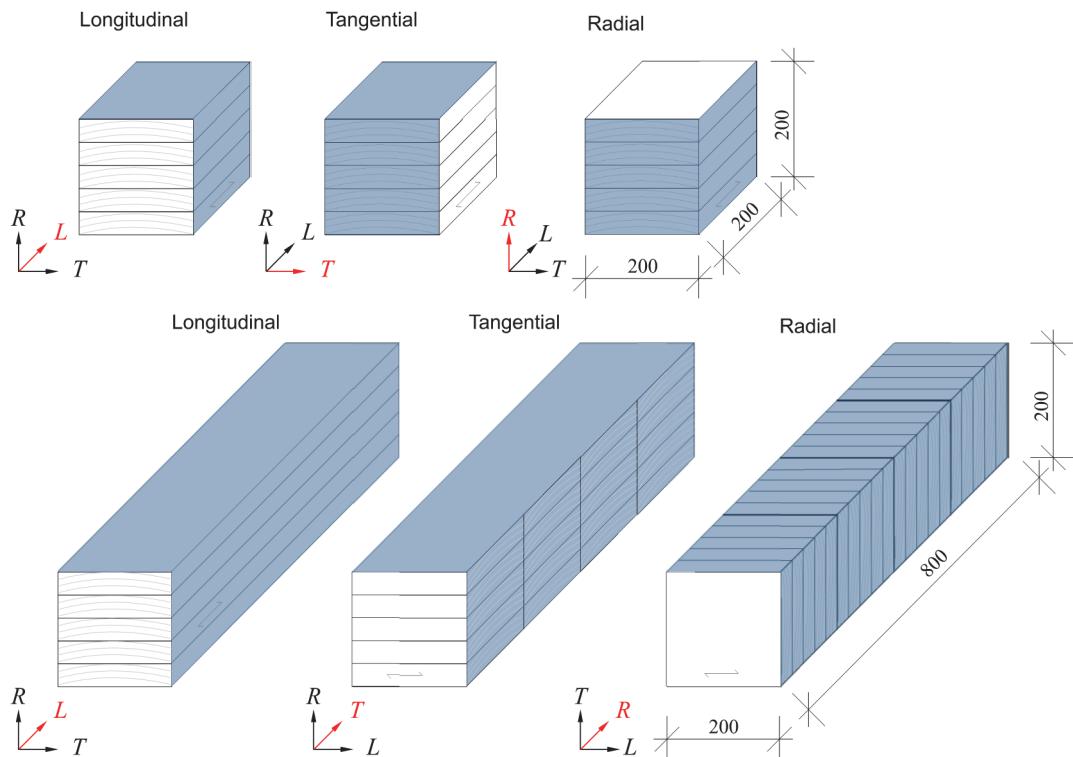


Abb. 11: Skizze zu den Prüfkörpern 200/200/200 mm und 200/200/800 mm, blau gekennzeichnete Oberflächen isoliert gegen Holzfeuchte transport

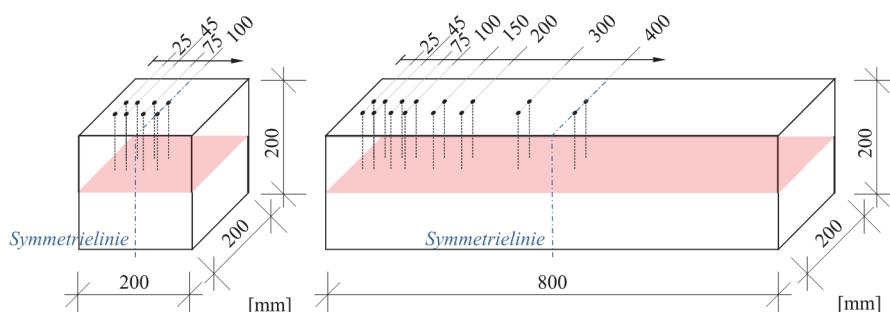


Abb. 12: Anordnung der Messsonden in den Prüfkörpern, 200/200/200 mm und 200/200/800 mm

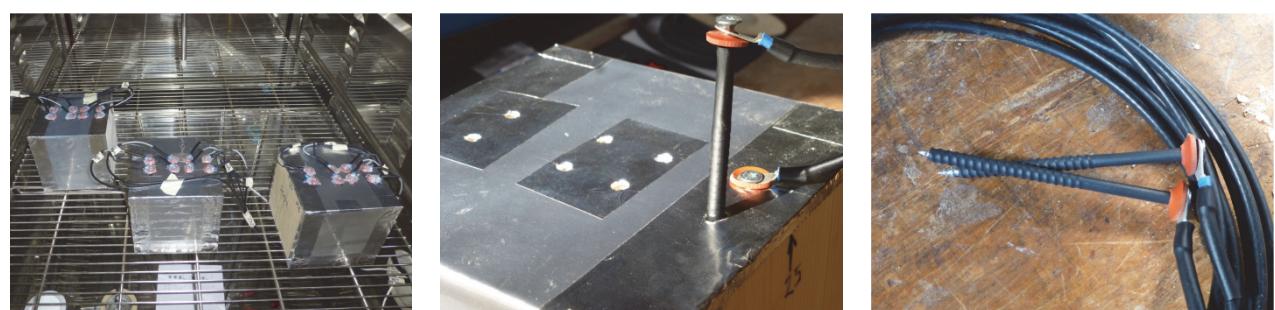


Abb. 13: Vorbereitung der Prüfkörper und Klimatisierung

4.4.2 Blockprüfkörper

Für die Betrachtung von grossformatigen Querschnitten wurde ein blockverleimter Brettschichtholzquerschnitt aus vier Segmenten à 200/800/600 mm hergestellt. Ziel ist es, die zeitliche Entwicklung der Holzfeuchte über den Querschnitt für die Auffeuchtung zu erfassen. Der Feuchttetransport in longitudinaler Richtung wurde gesperrt, so dass der Prüfkörper einem Mittelelement eines Tragträgers entspricht. Der Blockprüfkörper wurde mit Messsonden für die Holzfeuchte, Holztemperatur und Dehnungserfassung ausgestattet. Die Messsonden orientieren sich an den radialen und tangentialen Materialachsen sowie diagonal (tangential/radial) dazu, siehe Abb. 14. In Tabelle 14 im Anhang B.1 sind die jeweiligen Messpositionen mit Messgrößen zusammengefasst.

Der Prüfkörper wurde aus dem gleichen Brettschichtholzträger (s. Abb. 10) wie die Materialachsen orientierenden Prüfkörper hergestellt. Der Brettschichtholzträger wurde bei der Roth AG, Burgdorf unter den üblichen Produktionsbedingungen nach SIA 14080:2013 hergestellt. Die Lamellen hatten eine Dicke von 40 mm, die Normalrohdichte betrug im Mittel 443 kg/m³. Die Lamellen wurden nicht keilgezinkt. Für die Verklebung wurde Kauramin® Leim 683 flüssig mit Kauramin® Härter 686 flüssig angewandt.

Die Messsonden wurden zum Teil vor der Verklebung der Brettschichtholzabschnitte zum blockverleimten Brettschichtholzquerschnitt eingebracht. Für die Messung der Holzfeuchte wurde die Methode der elektrischen Widerstandsmessung gewählt, als Messmitteln wurden Teflon isolierte Messnadeln der Firma Gann Mess- u. Regeltechnik GmbH installiert. Für die Messung der Holztemperatur wurden Temperatursensoren der Firma Scantronik Mugrauer GmbH verwendet. Für die Dehnungsmessung im Holz wurden Dehnmessstreifen mit einer Messlänge von 20 mm mit tangentialer Orientierung geklebt. Die Datenerfassung und -speicherung erfolgt über die Logger Gigamodul und Thermofox der Firma Scantronik Mugrauer GmbH und ein QuantumX mit Datalogger.

Die klimatische Beanspruchung des Blockprüfkkörpers entspricht einer Auffeuchtung bei einem konstanten Klima von 20°C und 85 % relativer Luftfeuchte. Der Prüfkörper ist bis jetzt über einen Zeitraum von 5 Monaten in einer Klimakammer an der Berner Fachhochschule konditioniert. Die Klimakammer kontrolliert und steuert das definierte Klima automatisch. Der Arbeitsbereich der Klimakammer liegt im Temperaturbereich Warmseite bei 10°C bis 40°C bei 20 % bis 90 % relativer Feuchte und Kaltseite von -20°C bis 40°C bei 50 % bis 90 % relativer Feuchte. Vor dem Versuchsstart wurden die einzelnen Querschnitte, wie auch der blockverleimte Prüfkörper im Normalklima bei 20°C und 65 % rel. Luftfeuchte bis zu einer Ausgleichsfeuchte von ca. 12.8 M% (bestimmt aus kleinformatigen Darrproben) gelagert.

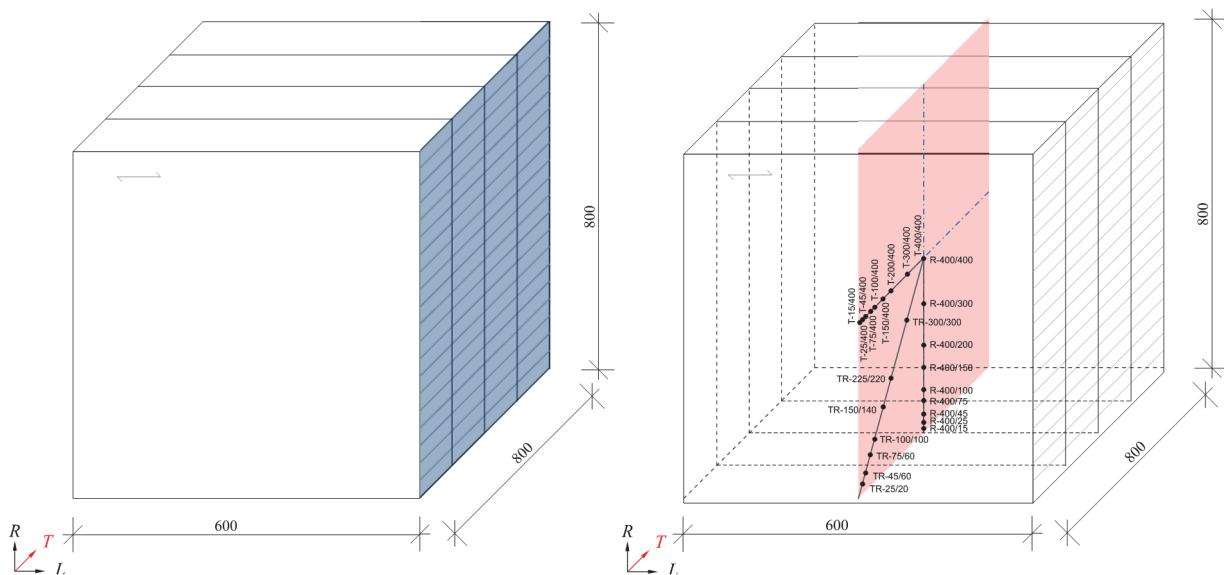


Abb. 14: Geometrie und Messpunktorientierung für den Blockprüfkörper

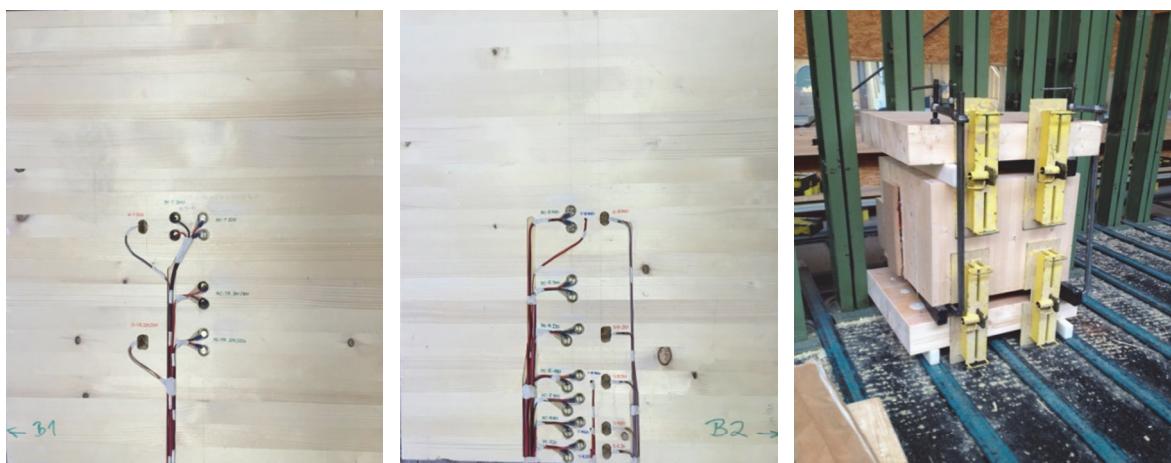


Abb. 15: Ansichten des Blockprüförpers während der Installation der Messtechnik und der Herstellung

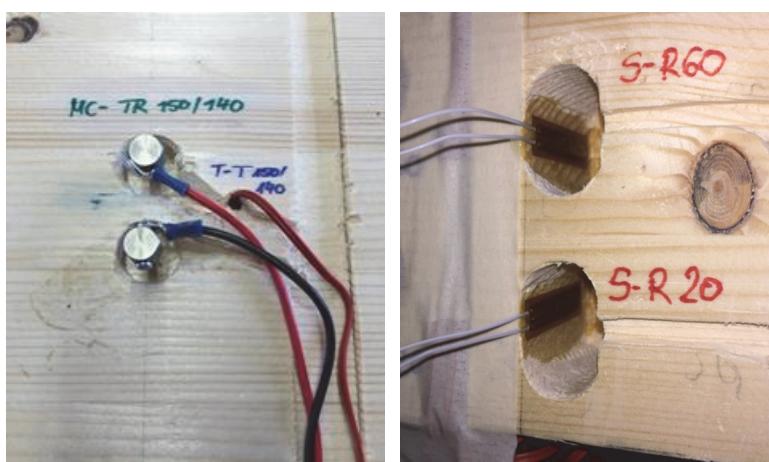


Abb. 16: Messnadelpaar zur Erfassung der Holzfeuchte resp. Elektr. Widerstandes (links) und applizierte innenliegende Dehnungsmessstreifen (rechts)

4.4.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

4.4.3.1 Materialachsen orientierte Versuchsreihen 200/200/200 mm

Der Verlauf der Holzfeuchte ist getrennt nach den Materialachsen über den Messzeitraum in Abb. 17 dargestellt. Die Diagramme enthalten jeweils eine Kurve für die Messsonden in 25 mm, 45 mm, 70 mm und 100 mm. In longitudinaler Richtung nähern sich die Kurven relativ zeitig einem Plateau an, während in radialer und tangentialer Richtung auch nach über 12 Monaten noch eine stete Zunahme zu verzeichnen ist. Zu beachten ist, dass der Anstieg der Holzfeuchte bei ca. 19 M% stagniert. Die rechnerische Ausgleichsfeuchte wäre bei 24 M% für ein konstantes Klima von 20°C/95% relativ Luftfeuchte. Die abschliessend durchgeführten Darrproben nach Beendigung der Konditionierung führt zu einer aktuellen Holzfeuchte von ca. 24 M%, s. Anhang B.2.2. Der festgestellte Kalibrierungsfaktor von 3.3 - 4.9 M% (s. Anhang B.2.2.) wird nicht auf die Ergebniskurven angewandt. Zu Beginn der Messung bestätigte sich die zu erwartende Holzfeuchte von 12 M% und somit wird von einem linear ansteigenden Fehler in der Messmethode ausgegangen und eine konstante Kalibrierung wäre nicht korrekt. Ursache hierfür kann die abschliessend festgestellte Korrosion der eingesetzten Edelstahlschrauben sein. Weiterführende experimentelle Untersuchungen sind hierzu geplant.

Innerhalb der Durchführung der Versuchsreihen ist ein einwöchiger Ausfall der Klimaanlage nach 12 Monaten aufgetreten. Die Klimakammer war defekt und die Luftfeuchtigkeit konnte nicht kontrolliert

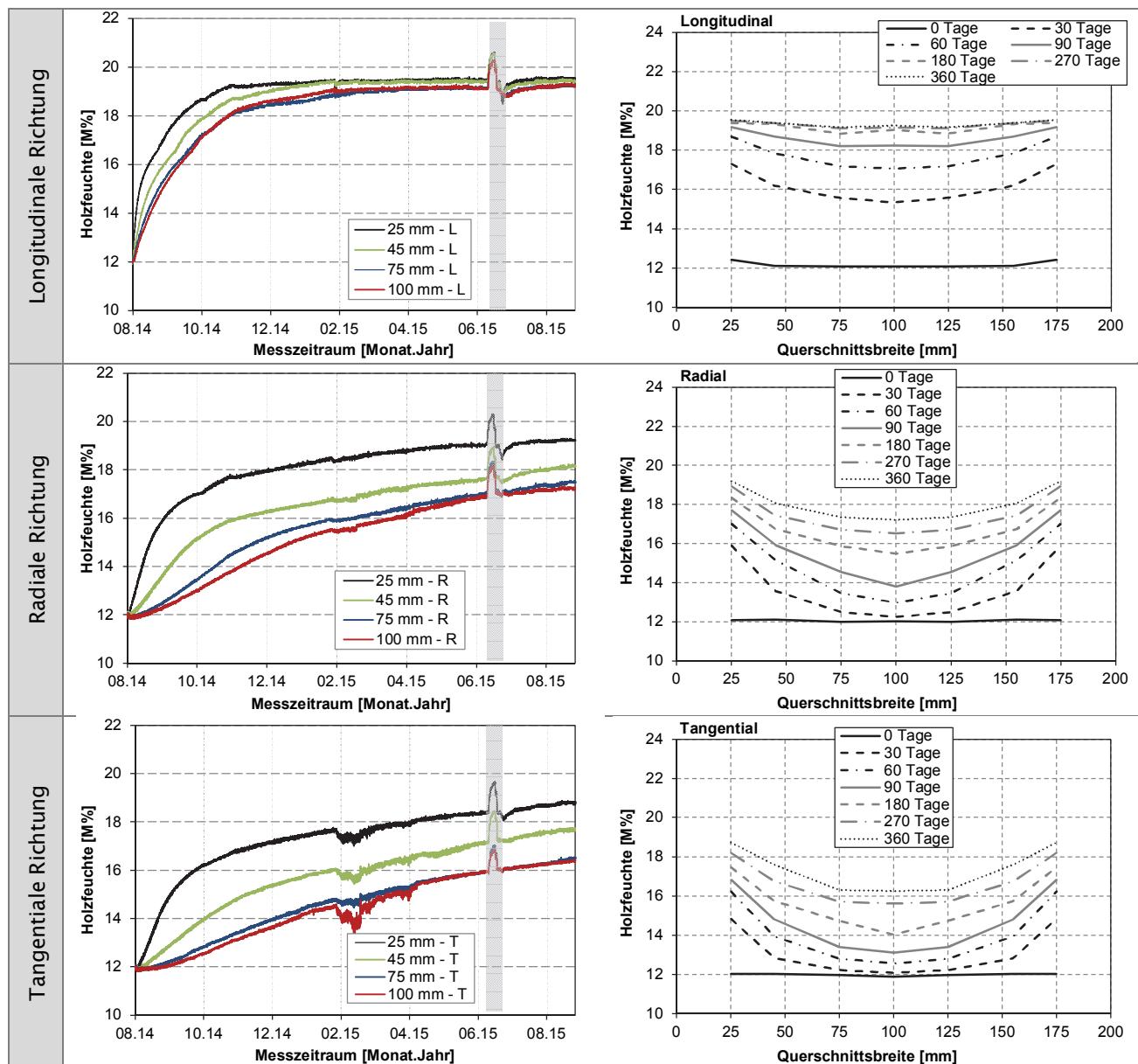


Abb. 17: Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum und den Querschnitt zu gewählten Zeiträumen

auf 95 % gehalten werden. Die Messdaten sind in den Diagrammen enthalten und grausattiert. In der wissenschaftlichen Auswertung ist dieser Zeitraum vernachlässigt.

Der Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt zeigt den sich ausbildenden Feuchtegradienten von der Oberfläche zum Querschnittsinneren sehr deutlich. Die Messdaten wurden hier zur Veranschaulichung an der Symmetrieachse gespiegelt. Die Gradienten sind verschieden für die Materialachsen. Die zeitliche Entwicklung bestätigt die bekannte schnellere Diffusion in longitudinaler Richtung als in radialer und tangentialer Richtung. Beachtenswert ist, dass sich über den gemessenen Zeitraum von 12 Monaten noch kein konstantes Niveau über den Querschnitt in radialer und tangentialer Richtung eingestellt hat. Das Verhältnis zwischen der zeitlichen Zunahme und der Entwicklung über den Querschnitt ist in Abb. 18 dreidimensional dargestellt. Die Grafik verdeutlicht den zeitlich unterschiedlichen Prozess des Holzfeuchteanstieges in den Materialachsen.

Der zeitliche Versatz innerhalb der Auffeuchtung für die verschiedenen Materialachsen und den vier Tiefen der Messsonden ist in Abb. 19/ Anhang B.2.3 dargestellt. In allen vier Messtiefen ist die zeitliche Reihenfolge gleich. Es bestätigt sich, dass sich in longitudinaler Richtung die Holzfeuchte deutlich schneller als in radialer und tangentialer Richtung erhöht. Die oberflächennahen Messsonden nähern sich für jede Materialachse einem Plateau an, während die Kurven für die tieferen Messsonden noch stetig ansteigen.

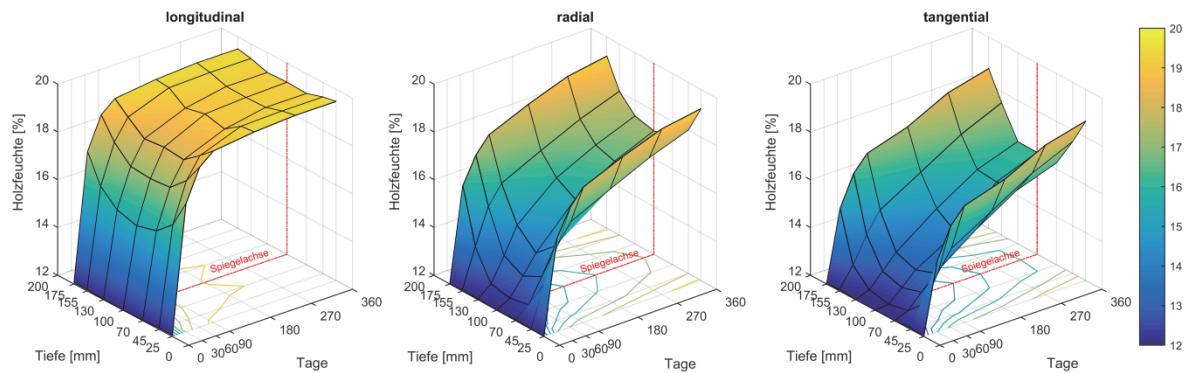


Abb. 18: Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt und die Zeit

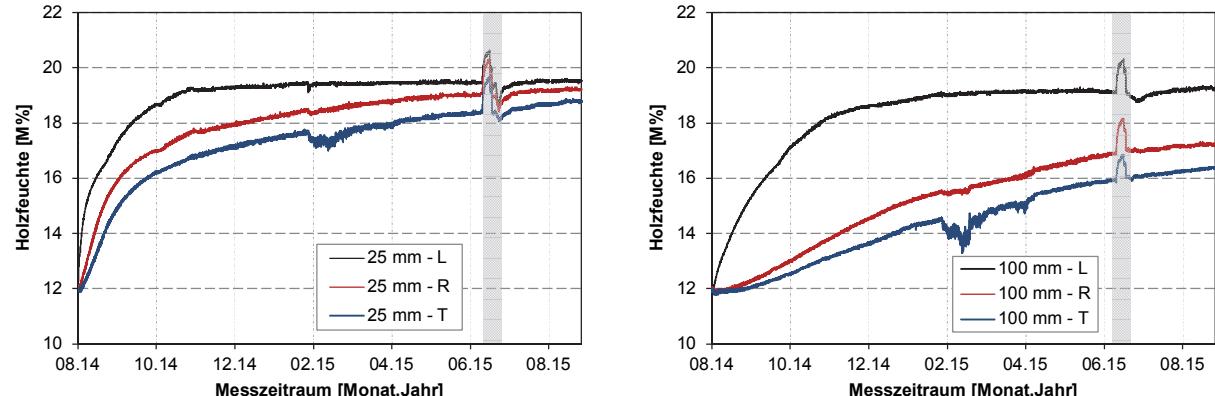


Abb. 19: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe

4.4.3.2 Materialachsen orientierte Versuchsreihen 200/200/800 mm

Innerhalb der Durchführung der Versuchsreihen ist ebenfalls ein einwöchiger Ausfall der Klimaanlage nach 5 Monaten aufgetreten. Die Klimakammer war defekt und die Luftfeuchtigkeit konnte nicht kontrolliert auf 95 % gehalten werden. Die Messdaten sind in den Diagrammen enthalten und grausattiert. In der wissenschaftlichen Auswertung ist dieser Zeitraum vernachlässigt. Weiterhin ist für den Prüfkörper in Tangentialer Richtung ein Ausfall des Datenloggers aufgetreten, die fehlenden Messdaten sind gestrichelt angenommen wurden. Die Messergebnisse für den Prüfkörper in Radialer Richtung zeigen ein unerklärbares hohes Messrauschen und können aus diesem Grund nicht wissenschaftlich ausgewertet werden. Eine Fehlersuche zeigte keine technischen Mängel.

In Abb. 20 ist getrennt nach Materialachse der Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum dargestellt. Die Diagramme enthalten jeweils eine Kurve für die Messsonden in 25 mm, 45 mm, 70 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 300 mm und 400 mm. In longitudinaler und tangentialer Richtung ist nach 10 Monaten noch ein Anstieg der Holzfeuchte zu verzeichnen. Die am Prüfkörper in radialer Richtung durchgeführte Darrproben nach Beendigung der Konditionierung führen zu einer Holzfeuchte von 24 M%, s. Anhang B.2.2. Der festgestellte Kalibrierungsfaktor von 3.3 M% wird ebenfalls nicht auf die Ergebniskurven angewandt, aufgrund der nicht bekannten Fehlerkurve in Abhängigkeit der Holzfeuchte.

Die Entwicklung der Holzfeuchte über den Querschnitt zeigt den sich ausbildenden Feuchtegradienten von der Oberfläche zum Querschnittsinneren sehr deutlich. Die Messdaten wurden hier zur Veranschaulichung an der Symmetrieachse gespiegelt. Das Verhältnis zwischen der zeitlichen Zunahme und der Entwicklung über den Querschnitt ist in Abb. 21 dreidimensional dargestellt. Die Grafik verdeutlicht den zeitlich unterschiedlichen Prozess des Holzfeuchteanstieges in den Materialachsen. Der zeitliche Versatz innerhalb der Auffeuchtung für die verschiedenen Materialachsen und den vier Tiefen der Messsonden ist in Abb. 19/ Anhang B.2.4 dargestellt. In allen Messtiefen ist die zeitliche Reihenfolge gleich. In longitudinaler Richtung erhöht sich die Holzfeuchte schneller als in tangentialer Richtung.

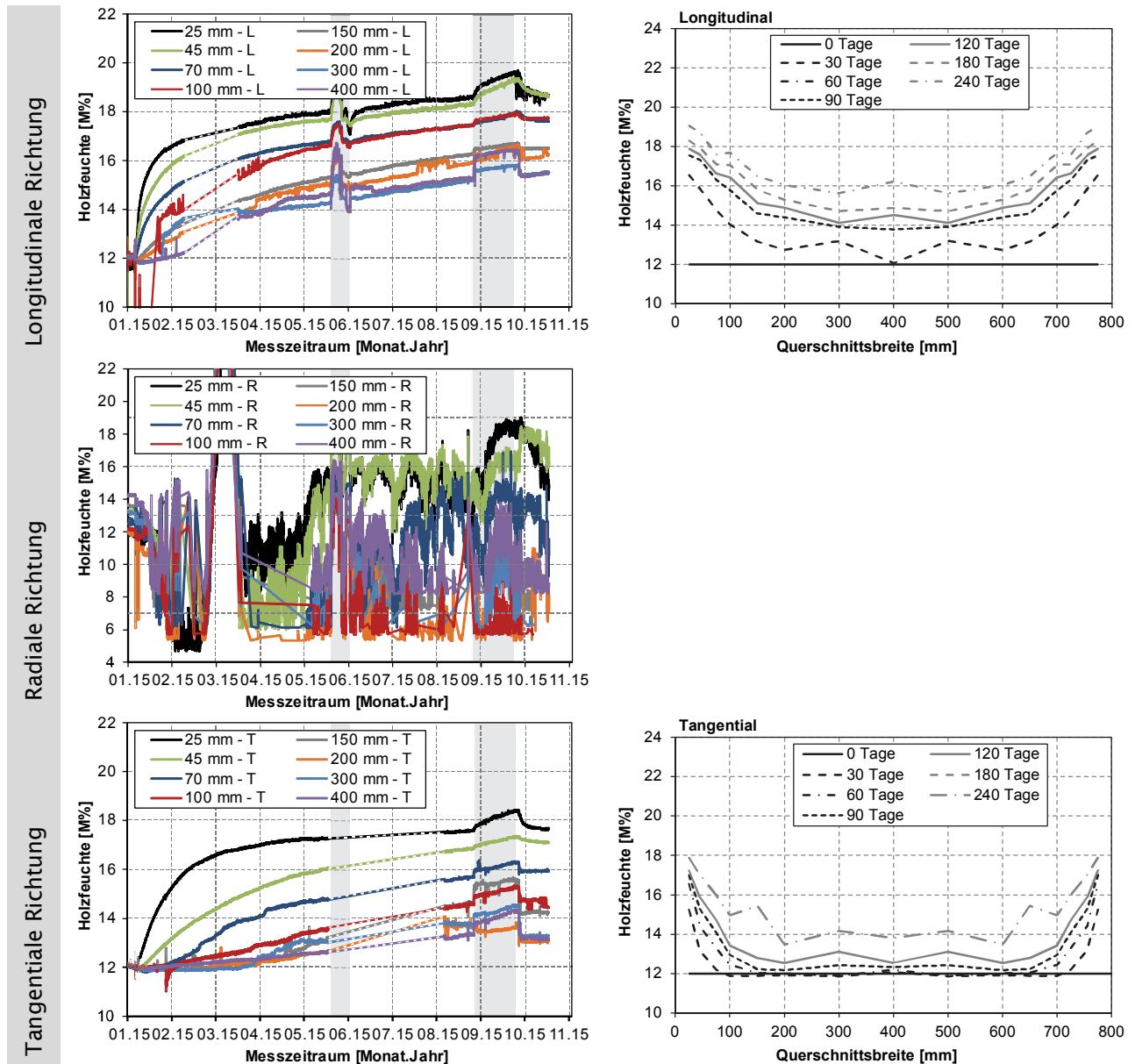


Abb. 20: Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum und den Querschnitt zu gewählten Zeiträumen

Die gemessenen Dehnungen in den Messtiefen 70 mm, 100 mm und 150 mm je Materialachse sind in Abb. 23 dargestellt. Die Stafflung der Dehnungsgrosse folgt der Messtiefe für alle drei Materialrichtungen. Aufgrund der relativen tiefen Messposition ist immer noch ein Anstieg der Dehnungen zu verzeichnen, was auch dem vorhandenen Anstieg der noch vorliegenden Holzfeuchte entspricht. In longitudinaler Richtung kann von einem Ausfall der Dehnungsmessstreifen in einer Messtiefe von 100 mm und 150 mm ausgegangen werden. Die Ursache kann ein Aufreissen des Holzquerschnittes oder aber auch ein Abreissen des Messkabels sein. Zusätzlich zu der Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Dehnungen sind auch die rechnerisch korrespondierenden Dehnungen aus der gemessenen Materialfeuchte an dieser Messstelle dargestellt. Der Berechnung liegen die materialachsenspezifischen Quell- und Schwindmasse zugrunde (Longitudinal 0.00625 %/M%; Radial 0.11 %/M% und Tangential 0.22 %/M%). Tendenziell entspricht der rechnerische Kurvenverlauf der gemessenen Dehnung.

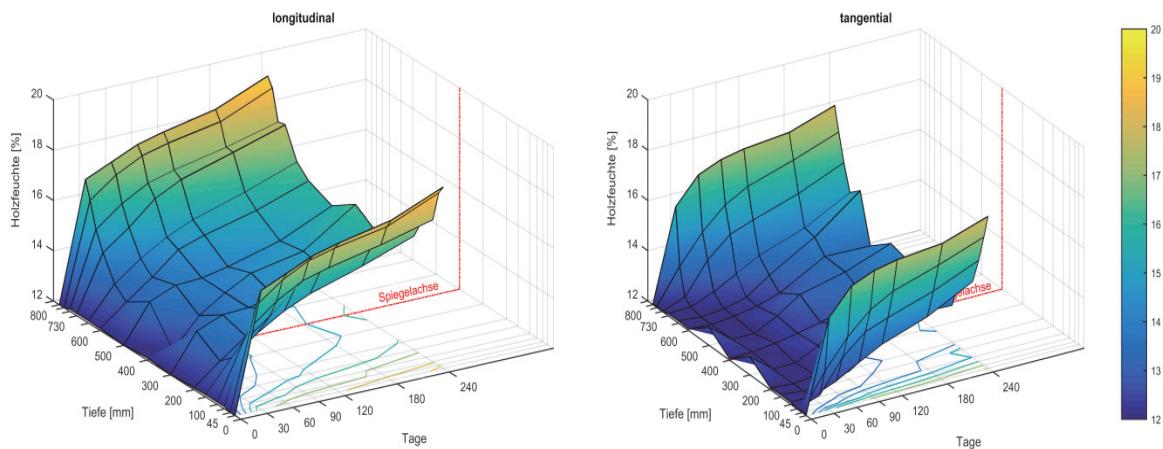


Abb. 21: Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt und die Zeit

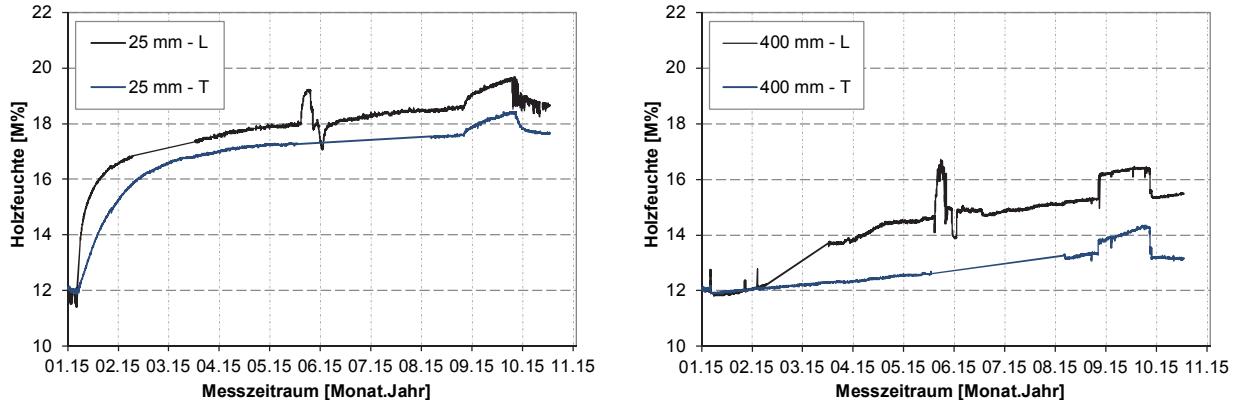


Abb. 22: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den Materialachsen für die Messtiefe 25 mm und 400 mm

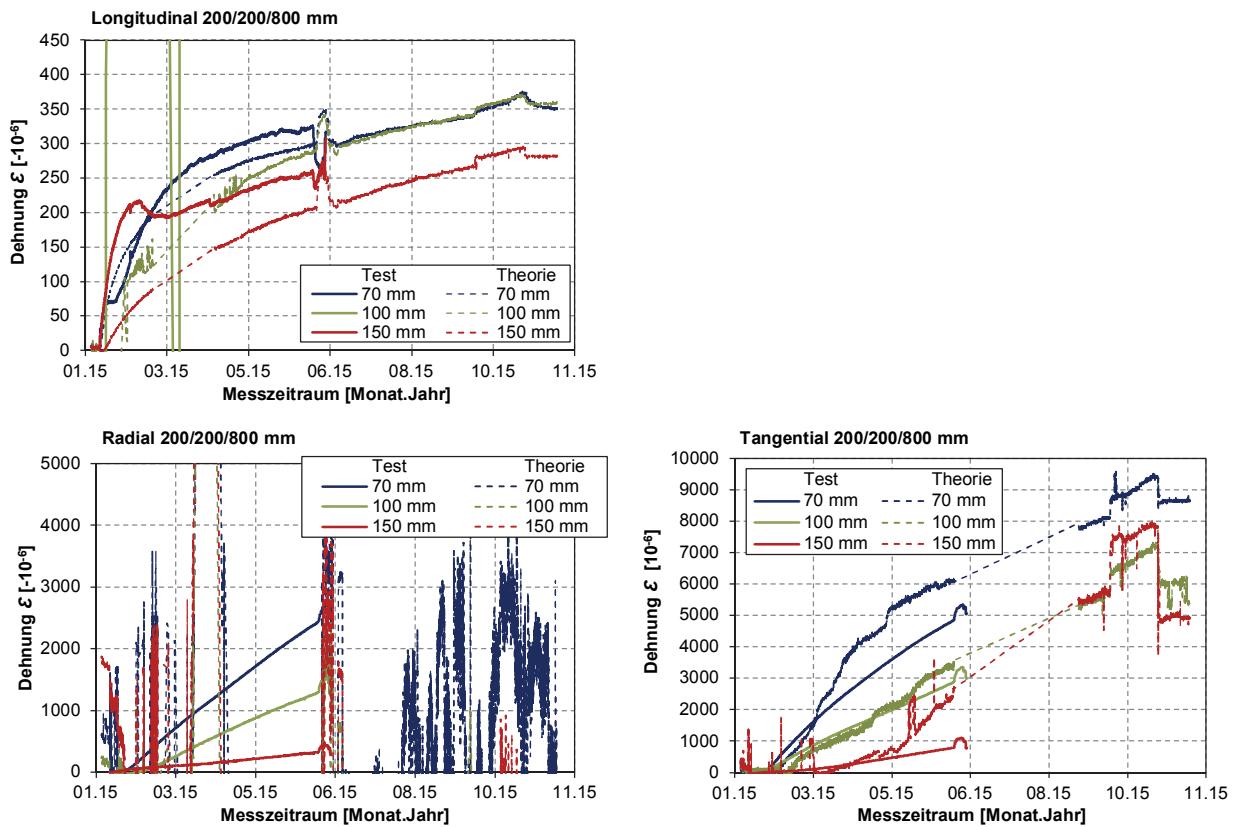


Abb. 23: Dehnungsentwicklung getrennt nach den Materialachsen

4.4.3.3 Blockprüfkörper 800/800/600 mm

Innerhalb der Durchführung des Versuchs ist ein Ausfall der Klimaanlage für 4 Tage aufgetreten. Ein Sensor zur Regelung war defekt und die Luftfeuchtigkeit konnte nicht kontrolliert auf 85 % gehalten werden. Die Messdaten sind in den Diagrammen enthalten und grauschiattiert. In der wissenschaftlichen Auswertung ist dieser Zeitraum vernachlässigt. Weiterhin ist partieller Ausfall des Datenloggers aufgetreten.

In Abb. 24 ist getrennt nach Materialachse der Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum dargestellt. Die Diagramme enthalten zum Einem die Messergebnisse je Messsonde und eine erarbeitete Verteilung über den Querschnitt in radialer und tangentialer Richtung. Die Ergebnisse sind hier selektiert wurden. Die Ergebnisse weisen mitunter unerklärliche Messfehler auf und wurden deshalb nicht berücksichtigt. Zur Nachvollziehbarkeit sind die vollständigen Diagramme im Anhang B.2.5 aufgeführt.

In der Entwicklung der Holzfeuchte über den Querschnitt zeichnet sich ein entwickelnder Feuchtegradient von der Oberfläche zum Querschnittsinneren ab. Die Messdaten wurden hier zur Veranschaulichung an der Symmetrieachse gespiegelt und fehlerhafte Messgrößen (negative Holzfeuchte) eliminiert. Der Vergleich des Feuchtetransportes in den drei Messachsen und gleicher Messtiefe zeigt, je Oberflächennaher desto schneller, s. Abb. 19. Die Überlagerung des Holzfeuchtetransportes aus tangentialer und radialer Richtung ist ebenfalls erkennbar.

Aufgrund des noch gemässigten Verhaltens des Holzes bezogen auf den ausgesetzten Auffeuchtungsprozess, erfolgt zu diesem Zeitpunkt noch keine Darlegung der Dehnungssensoren.

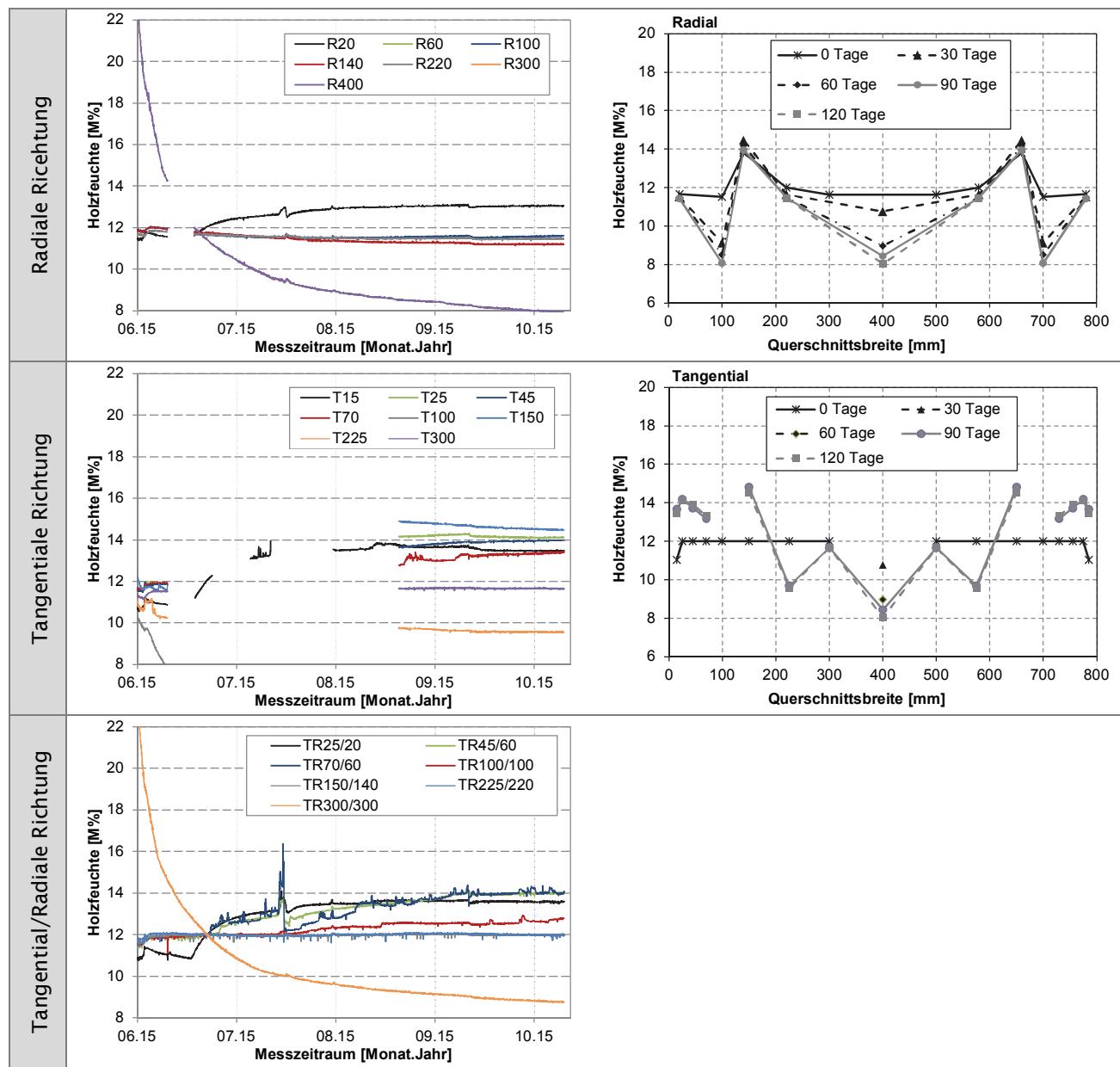


Abb. 24: Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum und den Querschnitt zu gewählten Zeiträumen

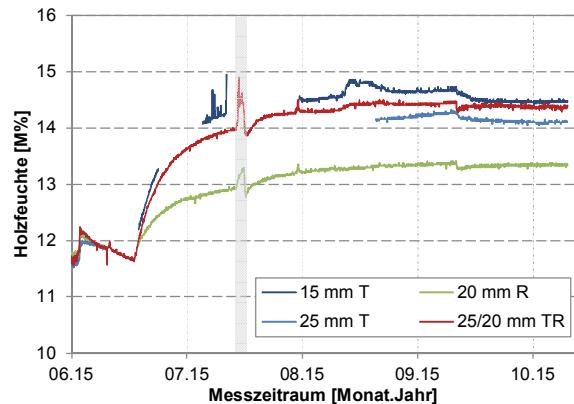


Abb. 25: Holzfeuchte Entwicklung in den drei Messrichtungen

4.4.4 Diskussion der Ergebnisse

Die erreichten Messergebnisse zur Holzfeuchte geben einen sehr guten Überblick zur Entwicklung der Holzfeuchte in den Materialachsen und über den Querschnitt. Sie zeigen aber auch, dass die Messmethode zu Messfehlern und Ausfällen führen kann. Das aufgetretene Messrauschen und mitunter paradoxe Messwerte konnten nicht erklärt werden, trotz gleich verwendeter Ausgangsmaterialien und intensiver Fehlersuche. Die abschliessend festgestellte Korrosion an den Edelstahlschrauben beeinflusst ebenfalls die Messergebnisse, da der Zeitpunkt der Korrosion unbekannt ist.

Der Vergleich der Messdaten der kleinformatigen Prüfkörper über die Zeit bestätigt tendenziell ein gleiches Materialverhalten bei unterschiedlicher Prüfkörperlänge, s. Abb. 26 und Anhang B.2.6. Das vorhandene Delta in longitudinaler Richtung ist zu prüfen. Die Übereinstimmung zu Beginn könnte für praxisnahe Aussagen ausreichend sein, da für Brücken ja mit einem Klimawechsel innerhalb einer Woche bzw. Monat zu rechnen ist.

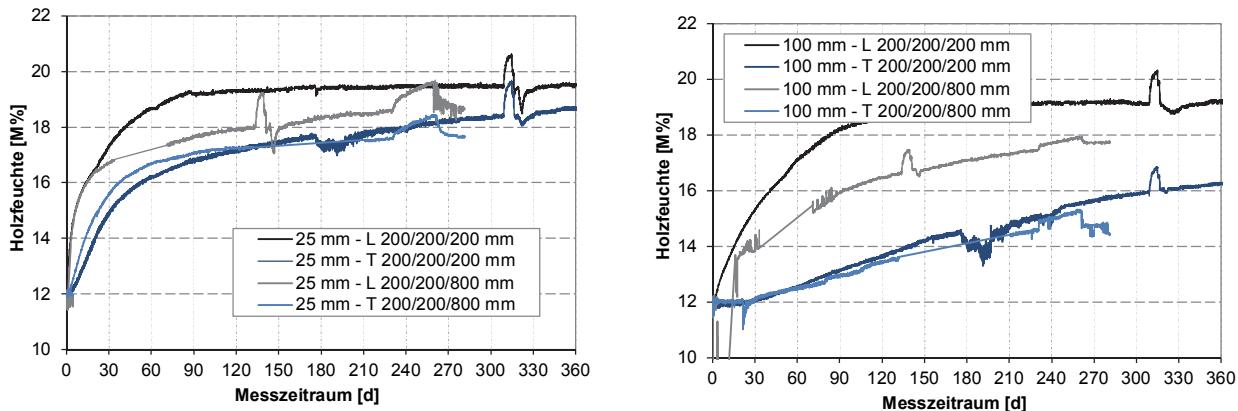


Abb. 26: Zeitlicher Holzfeuchteanstieg für konstante Messtiefe für beide Prüfkörperlängen 200 mm und 800 mm

Die Auswertung der Feuchtegradienten in radialer und tangentialer Richtung lässt eine Abgrenzung zwischen einer ruhigen und beanspruchten Querschnittszone erkennen. In Abb. 27 und Abb. 28 sind die gemessenen Querschnittsverläufe der Holzfeuchte in tangentialer und radialer Richtung mit dem graduellen Anstieg bis zur Oberfläche des Prüfkörpers theoretisch ergänzt. Die rechnerische Ausgleichsfeuchte von 24 M% ergibt sich aus dem Prüfklima von 20°C und 95 % relative Luftfeuchte, gemäss Simpson (1973). Die erhaltenen Differenzen unterteilen sich in gemessen und abgeschätzt und sind in radialer und tangentialer Richtung ungefähr gleich gross, s. Abb. 29 - Abb. 31. Die Diagramme enthalten die Differenz der Holzfeuchte zum Querschnittsinneren. Die hier angewandten Ergebnisse beziehen sich auf eine einjährige Auffeuchtungsphase. In der Praxis finden an Brückentragwerken mitunter tägliche Klimawechsel oder in Eisstadien z. B. ein halbjährlicher Klimawechsel zwischen Winter- und Sommersaison statt. Dieser dynamische Einfluss des Klimas ist in weiterführenden experimentellen Untersuchungen zu verifizieren.

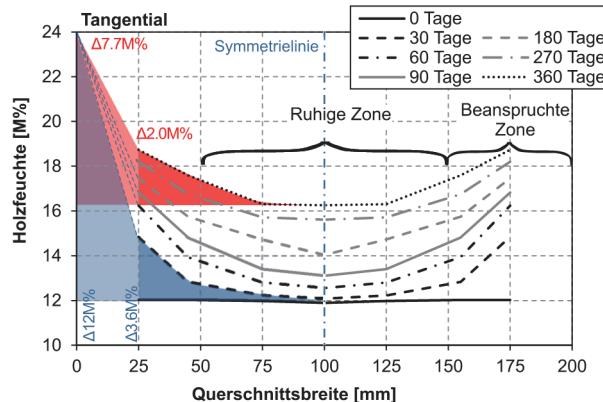


Abb. 27: Theoretische Analyse der beanspruchten Zone im Querschnitt, Tangentiale Richtung, 200/200/200 mm

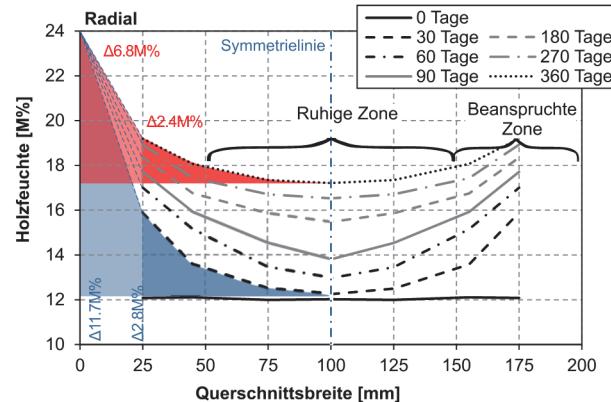


Abb. 28: Theoretische Analyse der beanspruchten Zone im Querschnitt; Radiale Richtung, 200/200/200 mm

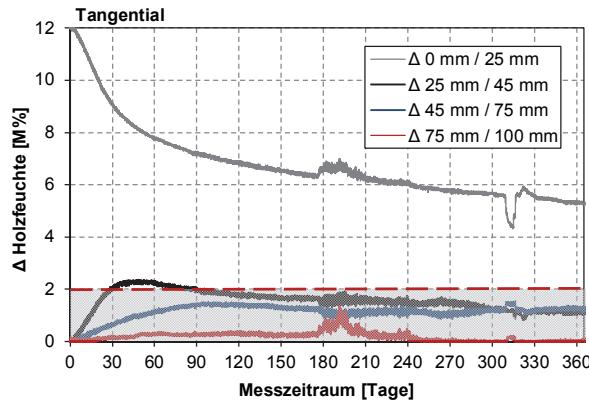


Abb. 29: Differenz der Holzfeuchte mit zunehmender Querschnittstiefe, Tangentiale Richtung, 200/200/200 mm

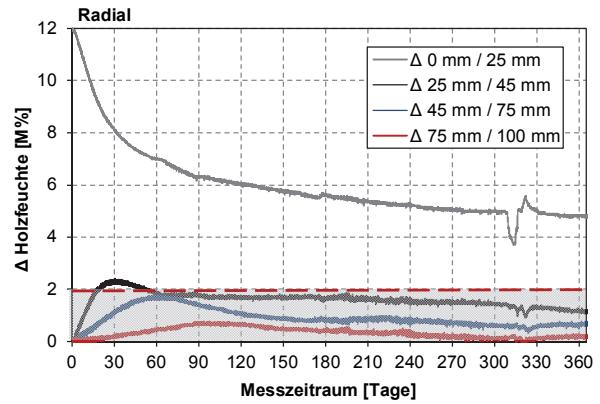


Abb. 30: Differenz der Holzfeuchte mit zunehmender Querschnittstiefe, Radiale Richtung, 200/200/200 mm

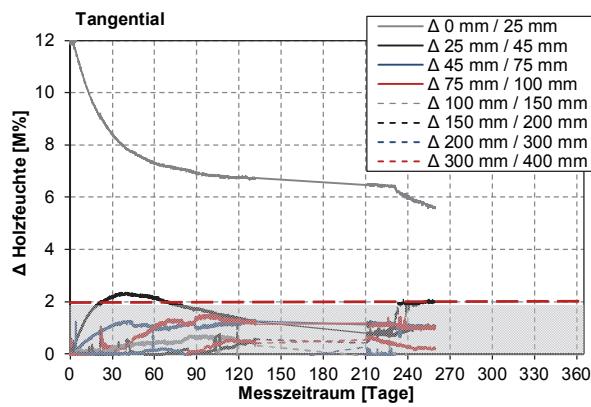


Abb. 31: Differenz der Holzfeuchte mit zunehmender Querschnittstiefe, Tangentiale Richtung, 200/200/800 mm

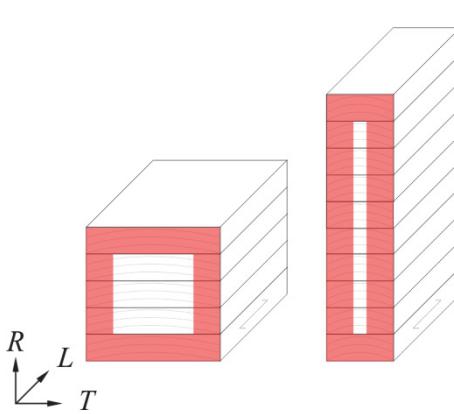


Abb. 32: Prinzipielle Darstellung von beanspruchter Zone für unterschiedliche Tragquerschnitte

Für die Abgrenzung der beanspruchten Zone kann man die Gefahr des Aufreissens über die Spannungs-/Dehnungsbeziehung theoretisch abschätzen. Hierfür wurden die Materialkenngrößen im Bruchzustand und des Quell-/und Schwindmasses für Fichte verwendet, Grosser & Zimmer 1989.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\alpha_{L/R/T} \cdot \Delta u}{l} \quad (2)$$

$$\Delta u \geq \frac{f_{t,L/R/T}}{E \cdot \alpha_{L/R/T}} \quad (3)$$

Die Ergebnisse in Tabelle 9 ergeben einen sehr kleinen Grenzwert von 1.5 M%. Unter Aufweitung auf der Grenze auf 3 M% in Anlehnung an die zulässigen durchschnittlichen Holzfeuchten lt. SIA 265:2012 ergibt sich eine Beanspruchungszone von ca. 40 mm Breite. Messergebnisse der TU München an Innenbauteilen ergeben eine vergleichbare Grösse bei gleicher Grenze von ca. 3 M%, Dietsch et al. (2014). Vor der generellen Anwendung dieser Beanspruchungszone in der Praxis, ist zu prüfen ob sie Grössenunabhängig ist. Für schlanke Querschnitte kann eine schnellere Überlagerung der Zonen infolge der beidseitigen Auffeuchtung erfolgen, anstatt für gedrungene Querschnitte, s. Abb. 32.

Tabelle 9: Grenzwerte der Holzfeuchte für die Gefahr des Aufreissens des Querschnitts

Materialrichtung	Quell-/Schwindmass für Fichte	E [N/mm ²]	f _t [N/mm ²]	Grenzwert Holzfeuchte
Longitudinal	$\alpha_L = 0.01 \% / M\%$	10'000	80.0	> 80 M%
Radial	$\alpha_R = 0.19 \% / M\%$	800	2.7	> 1.8 M%
Tangential	$\alpha_T = 0.39 \% / M\%$	450	2.7	> 1.5 M%

4.5 Numerische Simulation der Auffeuchtung von Holz

4.5.1 Exponentielles kinetisches Modell

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden orientierende analytische und numerische Simulationen zur Entwicklung der Holzfeuchte über den Querschnitt durchgeführt. Die Diffusion kann über das Fick'sche Gesetz im Allgemeinen beschrieben werden. Ein anderes einfacheres kinetisches Sorptionsmodel für kleine fehlerfreie Proben ist u.a. das Hill Model et al. (2010). In einem ersten Schritt wurden die Messdaten mit Hilfe dieses parallel exponentiellen kinetischen Ansatzes (PEK-Modell) beschrieben. Das Modell wurde für Naturfasern, regenerierte Zellulosefasern und mikrokristalline Zellulose aufgestellt. Ein Anwendung für den Werkstoff Holz ist bis dato nicht bekannt. Das PEK-Modell ist wie folgt beschrieben:

$$MC = MC_0 + MC_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{t_1}\right)} \right] + MC_2 \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{t_2}\right)} \right] \quad (4)$$

Wo MC die Holzfeuchte der Probe bei einer Einwirkungsdauer t und einer konstanten relativen Feuchte ist. MC_0 die Holzfeuchte der Probe zum Zeitpunkt Null ist. Die kinetische Sorptionskurve berücksichtigt über die Terme MC_1 und MC_2 einen schnellen und eine verzögerten Prozess der Holzfeuchtbildung anhand der charakteristischen Zeiten von t_1 und t_2 .

Die erhaltenen Parameter sind leider nur für den konkret im Versuch betrachteten Auffeuchtungsprozess gültig und können nicht für unterschiedliche Beanspruchungen appliziert werden. Ferner unterscheiden sich die bestimmten Parameter für jede Materialachse und Tiefe deutlich, so dass diese rein empirisch erarbeiteten Beziehungen nicht praxisrelevant sind, s. Tabelle 10.

Tabelle 10: Resultierende Parameter getrennt nach Materialachse (L, R, T) und Messtiefe (25, 45, 70, 100 mm)

Parameter	L25	L45	L70	L100	R25	R45	R70	R100	T25	T45	T70	T100
MC_0	2.035	0.693	0.252	0.008	0	0	0	0	1.938	0	0	0
t_1	44.97	0.012	0.005	0.549	0.034	0.034	0.007	0.010	1026	1337	0.022	0.016
MC_2	5.407	6.669	6.617	7.233	6.062	5.363	4.924	3.905	3.578	3.484	2.527	1.841
t_2	751.7	948	1041	1176	751.3	1752	3121	3214	1015	1339	2444	2161
R^2	0.998	0.996	0.998	0.999	0.993	0.985	0.928	0.884	0.991	0.903	0.860	0.767
MC	19.44	19.36	18.87	19.24	18.06	17.36	16.92	15.91	17.52	15.48	14.53	13.84

4.5.2 Anwendung des numerischen Modells der Software WUFI®

Für eine Erweiterung der Anwendungsbereiche wurde das numerische Modell der Software WUFI® benutzt. „WUFI® (Wärme Und Feuchte In stationär) ist eine Software-Familie zur realitätsnahen in stationären Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchttetransports in mehrschichtigen Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen.“, WUFI (2015). Die Simulationen zur zeitlichen Entwicklung der Holzfeuchte über den Querschnitt wurden 1-dimensional für die drei Materialachsen mit dem Programm WUFI® durchgeführt. Die Software WUFI® beinhaltet eine Materialdatenbank. Ausgewählte Materialgesetze für Holz wurden ausgehend von einer Konditionierung der Holzfeuchte von 12 M% für eine sechsmalige Auffeuchtung bei 20°C und 97% rel. Luftfeuchte für die Materialachsen orientierenden Versuche getestet und den Prüfergebnissen gegenübergestellt. In Tabelle 11 sind die verwendeten Materialgesetze und deren Bewertung zusammenfassend dargestellt.

Im Weiteren wurde das Materialgesetz No-T2 genutzt und für jede Materialachse empirisch angepasst, Anhang C.1 Tabelle 15. Der Vergleich mit den Prüfserien zeigte, dass mit einer konstanten Wasserdampfdiffusionszahl das Materialverhalten nicht korrekt wiedergegeben werden kann. Aus diesem Grund wurde die Wasserdampfdiffusionszahl in Abhängigkeit der Feuchte getrennt für jede Materialachse mit einem exponentiellen Modell beschrieben, Gleichung (2). In Tabelle 11 sind die Koeffizienten je Materialachse zusammengefasst und in Abb. 33 ist der Verlauf der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl über die Luftfeuchte grafisch dargestellt. Die Feuchtespeicherfunktion wurde anhand der Prüfergebnisse für alle drei Materialachsen konstant definiert, Abb. 34. Die Anpassung der implementierten Materialdaten im Programm WUFI erfolgte auf den im Projekt durchgeführten experi-

mentellen Untersuchungen und ist mit weiterführenden speziellen experimentellen Untersuchungen u.a. zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zu verifizieren.

$$\mu(LF) = a \cdot e^{(LF \cdot b)} \quad (2)$$

Tabelle 11: Materialgesetze für die numerische Simulation in WUFI®

Name	Katalog	Material	Rohdichte [kg/m³]	Beurteilung in longitudinaler (L), tangentialer (T) und radialer (R) Richtung
F-SpL	Fraunhofer	Fichte: Longitudinal	455	L: stimmiger Verlauf; Parameteranpassung notwendig T: Diffusion ist zeitlich zu schnell R: keine Übereinstimmung
F-SpR	Fraunhofer	Fichte: Radial	455	L: keine Übereinstimmung T: Diffusion ist zeitlich zu langsam R: keine Übereinstimmung
F-Sof	Fraunhofer	Nadelholz	400	L: Diffusion ist zeitlich zu langsam T: keine Übereinstimmung R: keine Übereinstimmung
No-T1	Norwegen	Fichte Richtung 1	420	L: keine Übereinstimmung T: keine Übereinstimmung R: keine Übereinstimmung
No-T2	Norwegen	Fichte Richtung 2	390	L: Diffusion ist zeitlich zu langsam T: gute Übereinstimmung R: gute Übereinstimmung
L-SpT	Lund, Schweden	Fichte: Tangential	430	L: keine Übereinstimmung T: keine Übereinstimmung R: keine Übereinstimmung
V-Sp6	Wien, Österreich	Fichte: 600 kg	600	L: Diffusion ist zeitlich zu langsam T: gute Übereinstimmung, angepasste Rohdichte R: gute Übereinstimmung, angepasste Rohdichte

Tabelle 12: Koeffizienten zur Beschreibung der Wasserdampfdiffusionszahl in Abhängigkeit der Luftfeuchte

Materialrichtung	Koeffizient <i>a</i>	Koeffizient <i>b</i>
Longitudinal	0.1350	4.0132
Radial	13.8646	0.2900
Tangential	17.6327	0.5138

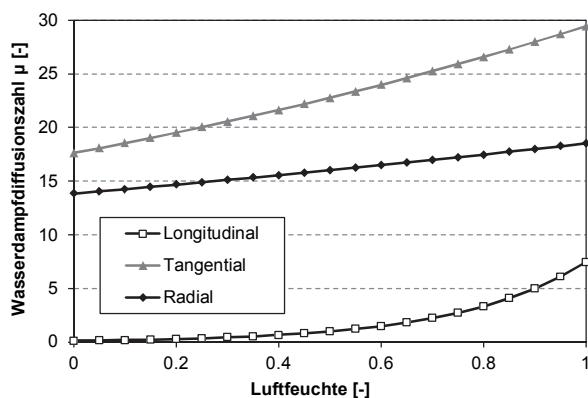


Abb. 33: Funktionen der Wasserdampfdiffusionszahl in Abhängigkeit der Luftfeuchte (LF)

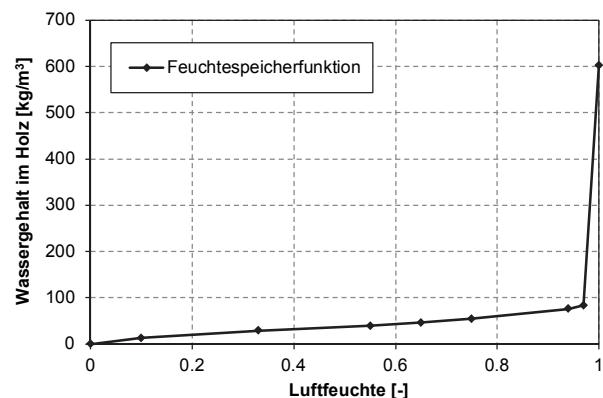


Abb. 34: Angepasste Feuchtespeicherfunktion für alle drei Materialachsen (L, R, T)

Abb. 35 zeigt den Vergleich der experimentellen Ergebnisse und der Simulationsergebnisse für alle drei Materialrichtungen getrennt pro Messtiefe im Querschnitt. Mit zunehmender Messtiefe tritt ein zeitlicher Versatz im Anstieg der Holzfeuchte auf. Der tendenzielle Kurvenverlauf zeigt aber eine sehr gute Übereinstimmung für einen konstanten Auffeuchtungszeitraum von 3 Monaten.

Die erreichten numerischen Ergebnisse mit WUFI® sind anhand der Messdaten für die Feuchtigkeitsaufnahme validiert. Das hygrokopische Verhalten von Holz unterscheidet sich für eine Auffeuchtung und Trocknung. In WUFI® können gleichzeitig keine unterschiedlichen Funktionen für die Sorption der Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Demzufolge ist die Konformität gegenüber der Realität für die Auffeuchtungsphase höher als für die Trocknung. Die Differenz zwischen Auffeuchtung und Trocknung ist für Fichtenholz gering, so dass die numerische Simulation in WUFI® mit den angepassten Materialdaten für eine Abschätzung der zu erwartenden Holzfeuchte genutzt werden kann.

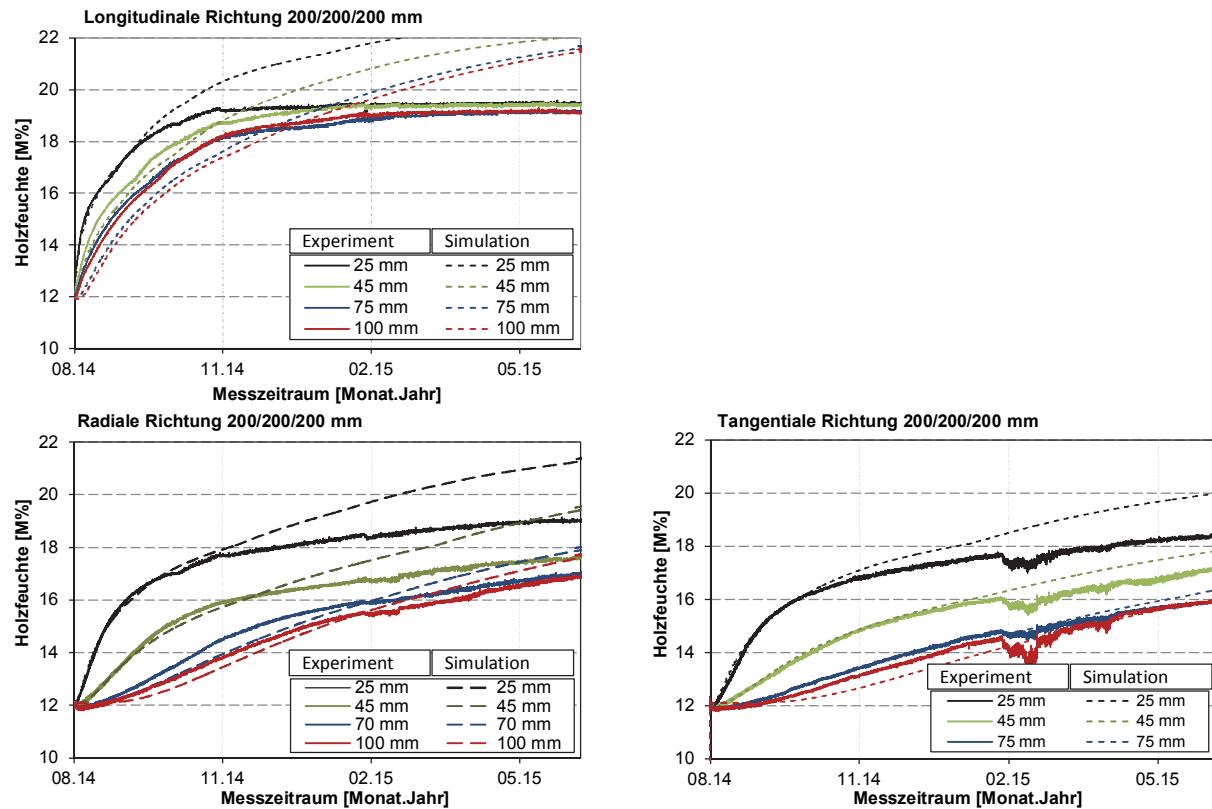


Abb. 35: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe

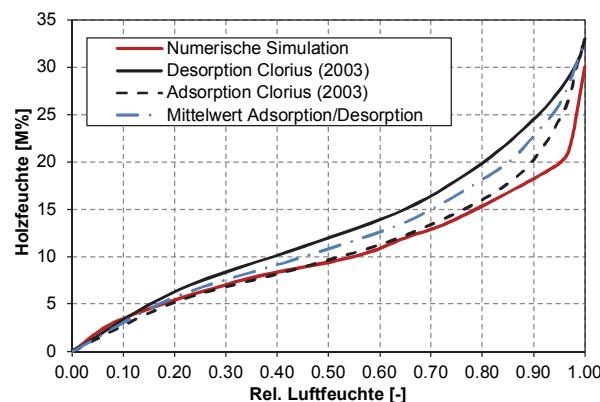


Abb. 36: Vergleich des Auffeuchtungs- und Trocknungsverhaltes für Nadelfichtenholz gegenüber dem numerischen Simulationsergebnis mit WUFI® für tangentiale Richtung (MS RT12-14)

4.5.3 Validierung mit Ergebnissen aus der Literatur

Für einen unabhängigen Vergleich der numerischen Simulation mit WUFI 5pro® wurden die veröffentlichten Versuchsergebnisse von Jönsson (2001) und Angst (2012) herangezogen. In beiden Arbeiten wurden Versuchsserien zur Auffeuchtung und Trocknung in tangentialer Richtung durchgeführt. Die Kenngrößen der Versuchsreihen sind Tabelle 13 zusammengefasst. Für die Vergleichsrechnungen wurde das angepasste Materialgesetz NoeRT14 verwendet, Anhang C.1. Die Abb. 37 bis Abb. 44 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten und den in numerischen Simulationen erhaltenen Holzfeuchteverteilungen über den Querschnitt.

Tabelle 13: Übersicht Literaturversuche zur Validierung der numerischen Simulation

Literaturquelle	Nr.	Probengröße	Klimatische Beanspruchung	Klima	
				Temperatur	Relative Luftfeuchte
Angst-Nicollier (2012)	1	90/270/90 mm	Auffeuchtung	20°C (angenommen)	80 %
Angst-Nicollier (2012)	2	90/270/90 mm	Trocknung	20°C (angenommen)	40 %
Angst-Nicollier (2012)	3	90/270/90 mm	Auffeuchtung	20°C (angenommen)	80 %
Angst-Nicollier (2012)	4	90/270/90 mm	Trocknung	20°C (angenommen)	40 %
Angst-Nicollier (2012)	5	90/270/90 mm	Zyklischer Wechsel	20°C (angenommen)	50 % für 14, 28, 42 Tage 90 % für 7, 21, 35 Tage
Jönsson (2001)	1	270/90/16 mm	Auffeuchtung	20°C	80 %
Jönsson (2001)	2	270/90/16 mm	Trocknung	20°C	40 %

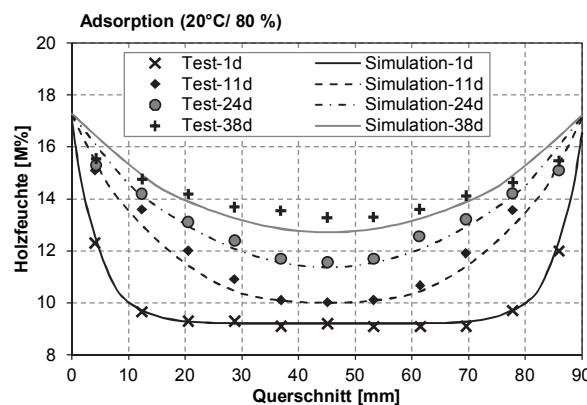


Abb. 37: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 1, Tabelle 13

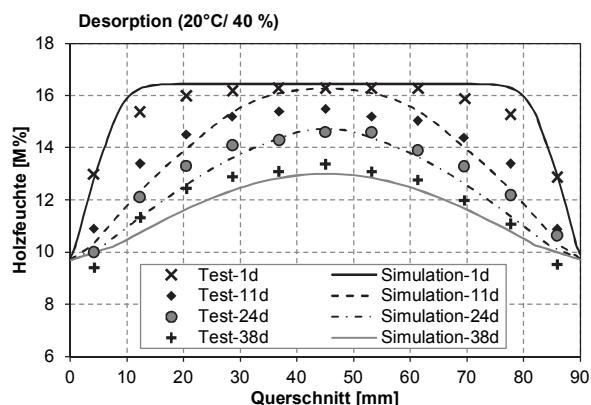


Abb. 38: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 2, Tabelle 13

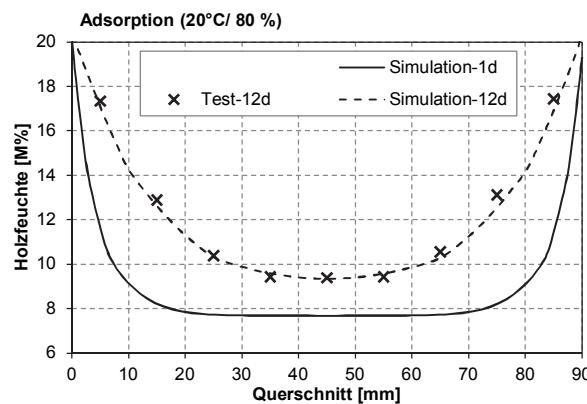


Abb. 39: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 3, Tabelle 13

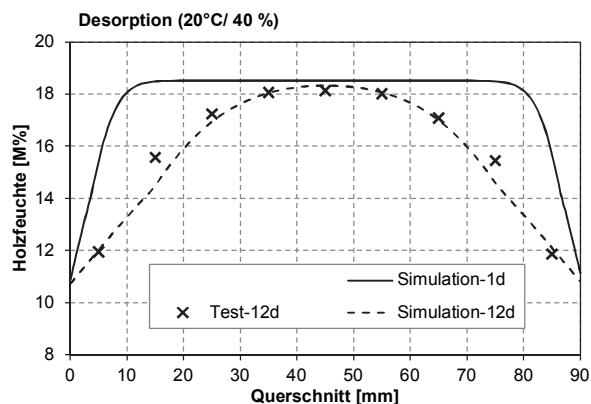


Abb. 40: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 4, Tabelle 13

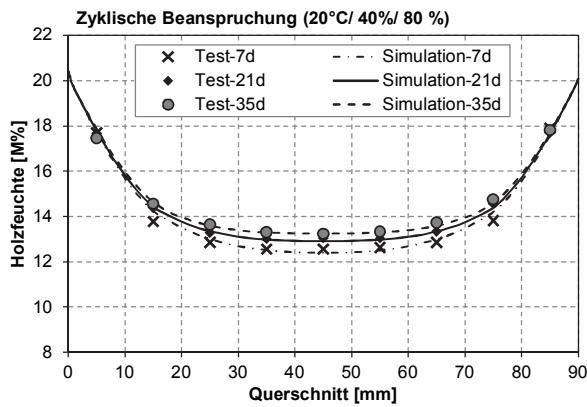


Abb. 41: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 4, Tabelle 13

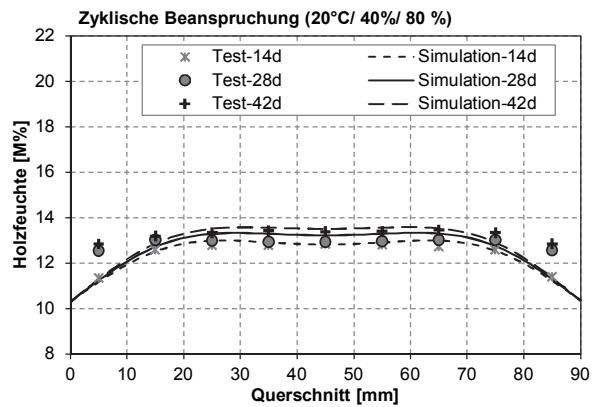


Abb. 42: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 4, Tabelle 13

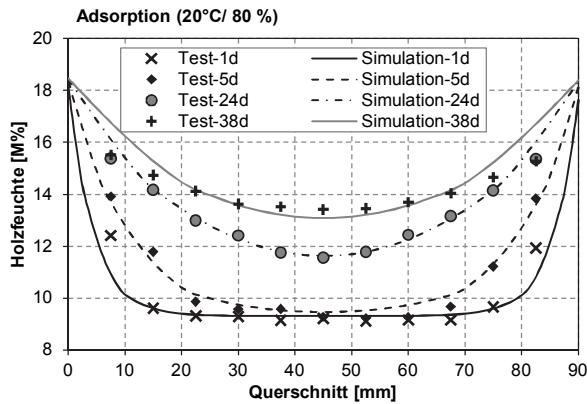


Abb. 43: Vergleich Simulation mit Jönsson (2001), Testreihe 1, Tabelle 13

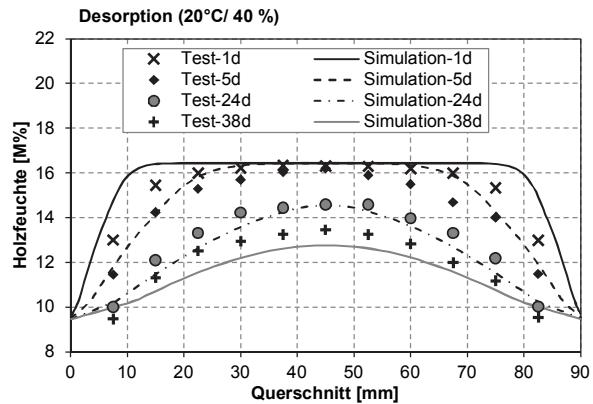


Abb. 44: Vergleich Simulation mit Jönsson (2001), Testreihe 2, Tabelle 13

4.5.4 Anwendungsbeispiel Brücke Horen

Für die Brücke Horen wurden ebenfalls mit der Software WUFI® Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die Brücke befindet sich im Kanton Aargau. Die dreifeldrige Blockholzbrückenkonstruktion überspannt 31 Meter und wurde im Juni 2008 errichtet, s. Abb. 45. An dieser Brücke konnten erste Langzeitmessungen der Holzfeuchte von blockverleimten Brettschichtholzträgern erzielt werden, Franke et al. (2012). Für die Langzeitmessung der Holzfeuchte wurden 20 Holzfeuchtesensoren gemäss dem Messstellenplan in Abb. 46 angebracht. Dabei wurden Messstellen sowohl in der Mitte des Trägers (M) als auch in der unmittelbaren Nähe des Fahrbahnübergangs (E) angeordnet. Die Messsensoren der Messgruppe E haben einen Abstand von 0.4 m vom Stirnholz. Die Messgruppe M liegt im Zentrum des Brückenträgers. Es wurde in fünf verschiedenen Höhen in radialer Richtung des Querschnittes gemessen, zudem jeweils in einer Messgruppe nahe der äusseren (O) und der mittleren (I) Fuge der Blockverleimung. Die exakte Position der Messpunkte ist in Tabelle 16 im Anhang C.2.1 zusammengefasst. Die angewandten Messsonden für die Holzfeuchtemessung nach dem Prinzip der elektrischen Widerstandsmessung wurden vor der Blockverleimung im Holzbaubetrieb eingebaut. Für die Datenspeicherung wurde der Multisensor und Materialfox der Firma Scanntronik Mugrauer GmbH verwendet.



Abb. 45: Überführung in Horen mit blockverleimten BSH Trägern

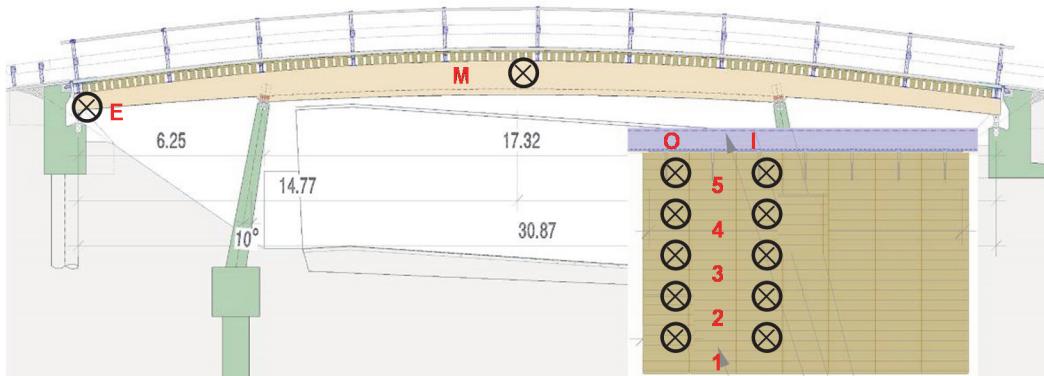


Abb. 46: Messstellen-Plan für die Brücke Horen

(E – Position Endträger, M – Position Mitte des Trägers, O – Oberfläche, I – Innenliegend im Querschnitt)

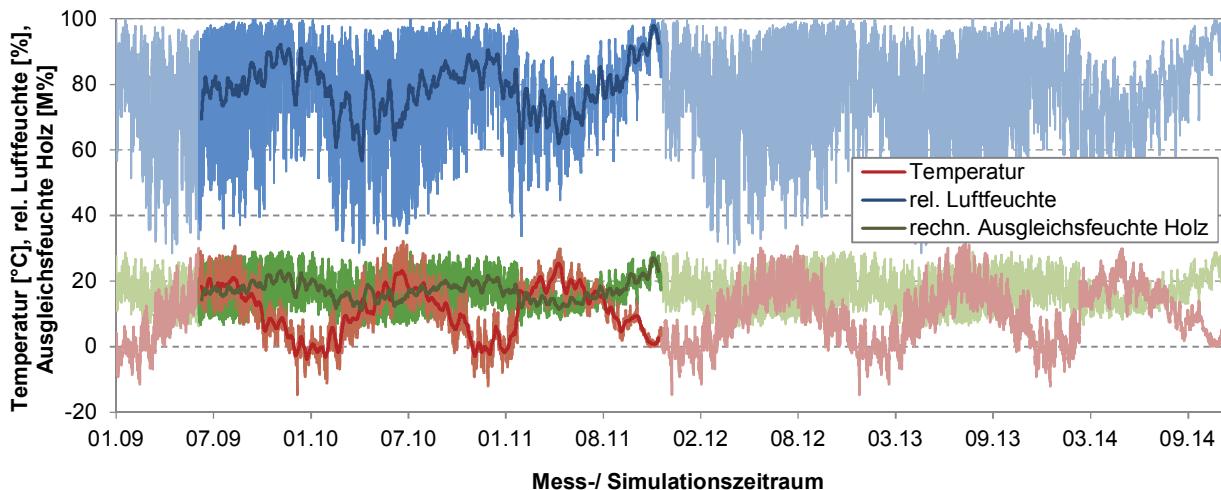


Abb. 47 : Gemessenes Klima mit resultierender rechnerischen Ausgleichsfeuchte an der Brücke Horen, Klimawiederholung für die Nutzung in WUFI®

Die Vergleichsrechnung wurde für einen Messzeitraum von ca. 2.5 Jahren durchgeführt. Die Grundlage für die Berechnungen war das aufgezeichnete Klima für diesen Messzeitraum, vgl. Abb. 47. Die Klimadaten wurden mit einem Messintervall von 1 Stunde aufgezeichnet. Für die Veranschaulichung wurde der gleitende Durchschnitt über 10 Tage jeweils für die Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und die rechnerische Ausgleichsfeuchte vom Holz in Abb. 47 hinzugefügt.

Dieses Klima wurde wiederholend verwendet, um den Effekt infolge der erstmaligen Holzfeuchteaufnahme/-akkumulation am Anfang der Simulation zu berücksichtigen. Hierdurch kann die Auswertung der Ergebnisse nachfolgend individuell erfolgen und die Ergebnisse sind frei von der Anfangsauffeuchtung über den Querschnitt. Die Anfangsfeuchte wurde in der Simulation als gleichverteilt über den Querschnitt mit 16.5 M% angesetzt. Für diese Ausgleichsfeuchte konnte in einer Parameterstudie die geringsten Abweichungen erreicht werden. Die Ausgleichsfeuchte von 16.5 M% ist relativ hoch verglichen zu der theoretischen Ausgleichsfeuchte von 12 M% resultierend aus den Produktionsbedingungen von Brettschichtholz. Die Begründung könnte durch die Messgenauigkeit der elektrischen Widerstandsmethode erfolgen und auch durch die noch ausstehende Kalibrierung der Brückenmessungen mittels Darrproben.

Die Berechnungen mit WUFI® erfolgten unidirektional für jede Materialachse. In der Praxis wird der Holzfeuchtegehalt an einen Messpunkt aber durch die Diffusion der Feuchte in allen drei Materialachsen beschrieben. Aus diesem Grund werden die Simulationsergebnisse je Materialachse im Postprozess mit dem Mittelwert-Ansatz verknüpft.

$$MC_{3D}(t) = \frac{[(Av_L + \Delta_L) + (Av_R + \Delta_R) + (Av_T + \Delta_T)]}{3} = Av + \frac{\Delta_L + \Delta_R + \Delta_T}{3}$$

Das individuelle Messergebnis je Materialachse (Longitudinal L, Radial R und Tangential T) ist wie folgt definiert:

$$MC(t) = Av_{MC} + \Delta_{MC}$$

Wobei Av_{MC} die Ausgangsfeuchte vom Material ist und Δ_{MC} die Änderung der Holzfeucht über die Zeit. Diese Methode ermöglicht relativ einfach eine gute Abbildung des 3-dimensionalen hygrokopischen Verhaltens von Holz. Die Diffusion ist in allen drei Materialachsen vereinfachend gleichgewichtet angesetzt. Dies entspricht nicht dem Ergebnis einer komplexen 3-dimensionale Modellierung. Die Simulationsergebnisse getrennt nach Materialachse sind in Abb. 48 für die Messpunkte E_I_1 und E_I_5 für die Brücke Horen dargestellt. Die jeweilig erhaltene Kurve aus der Simulation für die Materialachse L, T bzw. R wurde zu einer gemittelten Ergebniskurve zusammengezogen. Die Übereinstimmung zwischen den gemittelten Simulationsergebnis und der gemessenen Holzfeuchteentwicklung im Querschnitt ist positiv, s. Abb. 48, Abb. 49 und Anhang C.2.2. Für den besseren Vergleich ist hier ein Offset der gemessenen Holzfeuchte von 0.7 M% bzw. 0.3 M% für den Messpunkt E_I_1 und E_I_5 vorgenommen wurden. Diese vorgenommene Anpassung liegt innerhalb der Messgenauigkeit von ca. 2 M% der elektrischen Widerstandsmethode zur Messung der Holzfeuchte.

Generell konnten der gemessene Verlauf der Holzfeuchte innerhalb der Simulationen sehr gut wiedergegeben werden. Die Messpunkte zeigen eine relativ hohe Sensibilität auch im Querschnittsinneren gegenüber der Simulation, dies könnte z.B. auf die Signalinstabilität der Messtechnik zurückgeführt werden. Der Vergleich mit der rechnerischen Ausgleichsfeuchte bestätigt erneut eine deutlich verzögerte Reaktion gegenüber den theoretischen Ansätzen, Franke et al. (2012).

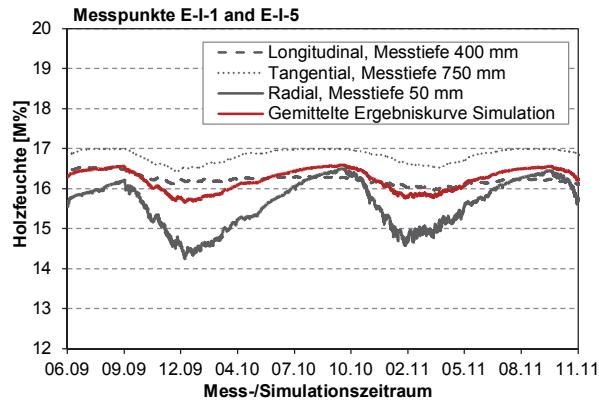


Abb. 48 : Simulationsergebnis für die Brücke Horen, getrennt in Materialachsen für die Messpunkte E-I-1 und E-I-5

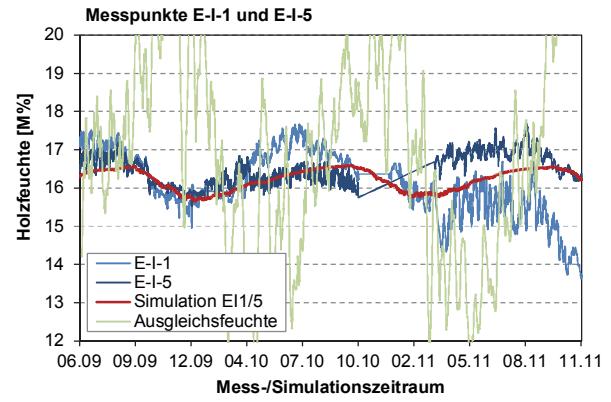


Abb. 49 : Gemitteltes Simulationsergebnis für die Brücke im Vergleich mit den Messergebnissen und der rechnerischen Ausgleichsfeuchte anhand des Klimas

5 Zusammenfassung Schlussfolgerungen

5.1 Analyse des Klimas an und in Bauwerken

Holz passt sich aufgrund des hygrokopischen Materialverhaltens dem Wechsel des Klimas an. Ein Klimawechsel ruft eine Änderung des Holzfeuchtegehaltes respektive der physikalischen Eigenschaften hervor. Für mehrere Gebäudetypen konnte aufgrund von eigenen und publizierten Messdaten die klimatische Beanspruchung abgeleitet werden. Eine Eingruppierung von Bauwerkstypen in die Feuchteklassen lt. SIA 265:2012 ist für den Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit möglich und in Tabelle 7 als Empfehlung gegeben. Für offene Bauwerke, insbesondere für Brücken, kann aufgrund der gemessenen Daten und der Analyse des Makroklimas eine Eingruppierung in die Feuchtekategorie 2 erfolgen. Zu beachten ist, dass durch lokale Besonderheiten das Mikroklima deutlich verändert sein kann und eine andere Eingruppierung erforderlich wird. Insbesondere die Überführung über Gewässer oder in stark beschatteten und engen Tälern kann ein anderes Klima vorherrschen.

Für die Praxis wäre eine Ableitung einer Holzfeuchtezonenkarte aus dem Klima eine gute Orientierung zur Eingruppierung der offenen Bauwerke. Basierend auf den vorhandenen klimatischen Daten von MeteoSwiss erfolgte die Erarbeitung der sich lokal rechnerisch einstellenden Ausgleichsfeuchte im Holz in Anlehnung an Karten zur Temperatur/Niederschlagsmenge (vgl. Abb. 50). Innerhalb der Studienarbeit von Schiere (2015) erfolgte eine erste Auswertung der Klimadaten für ca. 100 Klimastationen bis zu einer Höhe von 1600 Meter über NN für das Jahr 2014. Die Klimastationen verteilen sich gleichmäßig über die Schweiz, s. Abb. 51. Das untersuchte Jahr 2014 ist im Vergleich mit der Auswertung über 30 Jahre an ausgewählten Klimastationen kein aussergewöhnliches Jahr gewesen und damit repräsentativ für die Vergangenheit und Zukunft, Schiere (2015). Die maximale Differenz der rechnerischen Holzfeuchte basierend auf dem Jahr 2014 und den vergleichenden 30 Jahren (1984-2014) waren ca. 2 M%.

Die resultierende rechnerische Ausgleichsfeuchte im Holz wurde mit der Methode von Simpson (1973), Gl. (1) bestimmt. Die Verteilung der Ausgleichsfeuchte im Holz ist sehr homogen über die Schweiz, s. Abb. 52. Eine deutliche Differenzierung in Regionen mit einer höheren oder niedrigeren Ausgleichsfeuchte ist nicht erkennbar. Gleichermaßen gilt für die Zuordnung in die Feuchteklassen nach SIA 265:2012, vgl. Abb. 53. Auf den Ergebnissen basierend ist in der Schweiz mehrheitlich die Feuchtekategorie 2 für das Klima frei ausgesetzte Konstruktionen relevant. Die Feuchtekategorie 1 ist nicht vertreten und nur im Raum Bodensee resultiert die Feuchtekategorie 3 aus den Klimadaten. Aber bereits unter Berücksichtigung einer 2 M% Erhöhung der rechnerischen Ausgleichsfeuchte kommt es zu einer deutlichen regionalen Differenzierung zwischen Feuchtekategorie 2 und 3, vgl. Abb. 54. Die angesetzten 2 M% entsprechen u.a. dem Fehler des Auswertungszeitraums von nur einem Jahr oder den lokalen Besonderheiten infolge des Mikroklimas.

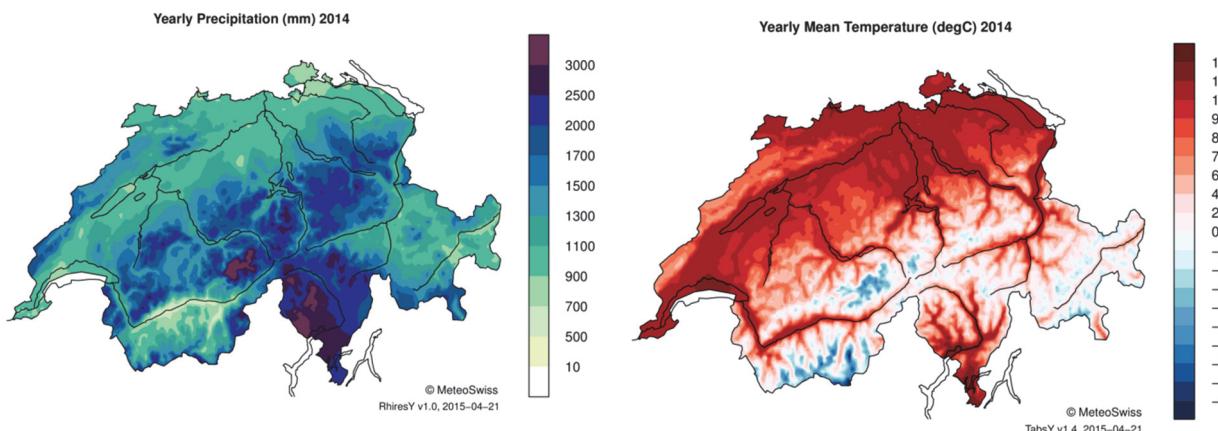


Abb. 50: Jährliche Niederschlagsmenge (links) und Jahrestemperatur im Mittel (rechts) in der Schweiz für 2014, Quelle: MeteoSwiss (2015)

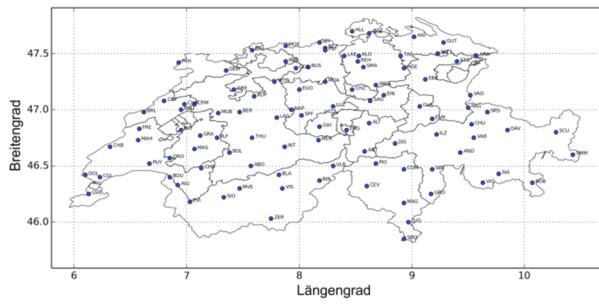


Abb. 51: Verwendete Wetterstationen der Schweiz

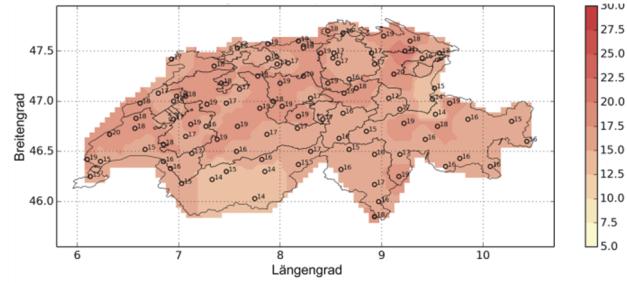


Abb. 52: Resultierende rechnerische Ausgleichsfeuchte als Mittelwert über das Jahr 2014

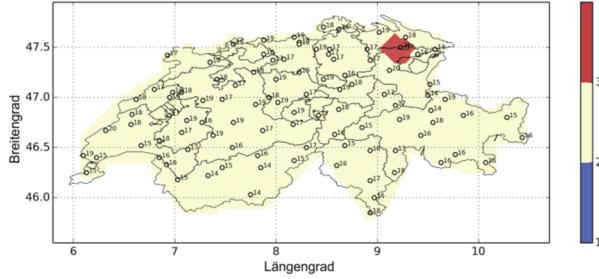


Abb. 53: Resultierende Feuchtekasse nach SIA 265:2012 unter Verwendung der mittleren Holzfeuchte aus Abb. 52

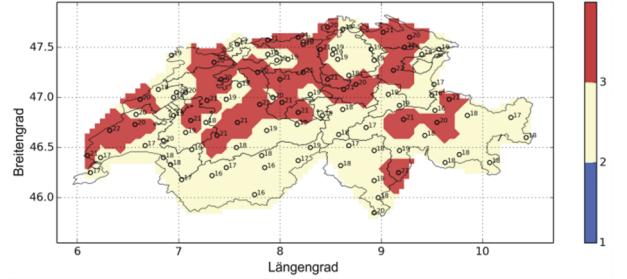


Abb. 54: Resultierende Feuchtekasse nach SIA 265:2012 unter Verwendung der mittleren Holzfeuchte mit 2M% Erhöhung

5.2 Experimentelle und numerische Untersuchungen

In der Regel werden Holzkonstruktionen mit einem Holzfeuchtegehalt von 12M%, die aus der Produktion resultiert, errichtet. Die klimatische Auswertung zeigt, dass für Brückentragwerke und Eisstadien, landwirtschaftliche Gebäude oder Reithallen sich höhere Ausgleichsfeuchten einstellen. Für die experimentellen Untersuchungen wird folglich eine Auffeuchtung gewählt. Es konnten 3 Versuchsreihen zeitlich gestaffelt gestartet werden. Die klimatischen Untersuchungen unterteilen sich in drei Prüfgeometrien und in die Materialachsen von Holz.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigte eine relativ hohe Sensibilität der verfügbaren und angewandten Messtechnik und Datenlogger. Die erreichten Messergebnisse liefern eine gute Grundlage für die Bewertung der entwickelnden Feuchtegradienten in Tragquerschnitten. Getrennt für jede Materialachse konnte die Auffeuchtung im Holz gemessen und ausgewertet werden. Der Verlauf der Holzfeuchte bezogen auf die Querschnittsbreite führt zu einer Abgrenzung zwischen einer ruhigen und beanspruchten Zone. Innerhalb der beanspruchten Zone liegt ein deutlicher Feuchtegradient vor, der zur Änderung der physikalischen insbesondere mechanischen Eigenschaften führt. In diesem Bereich besteht auch die Möglichkeit der Rissbildung aufgrund der vorliegenden Spannungen und der Überschreitung der Materialfestigkeiten. Für eine konkrete Ableitung der Grösse der Randzone sind weiterführenden Untersuchungen an unterschiedlichen Querschnittsgrössen erforderlich, da es gerade bei sehr schlanken Bauteilen zu einer beidseitigen Überlagerung kommen kann. Ferner ist die zeitliche Variation abzugrenzen, welche Beanspruchungsperiode hat einen Einfluss und bis zu welcher Querschnittstiefe. Zu beantworten ist auch welche dauerhafte Klimabbeanspruchung den gesamten Querschnitt beeinflusst, hierbei insbesondere in longitudinaler Richtung (schnellster Feuchtetransport).

Die erreichten Ergebnisse für die Dehnungen getrennt nach den Materialachsen zeigen, dass im Querschnittsinneren ein elastisches Materialverhalten vorliegt. Gestaffelt nach der Messtiefe sind auch die Messgrössen der Dehnungen. Der Vergleich mit den rechnerischen Dehnungen korrespondierend aus den gemessenen Holzfeuchten zeigt einen tendenziell gleichen Verlauf.

Die erreichten Ergebnisse mit den durchgeführten numerischen Simulationen geben die erfassten Messergebnisse während der Auffeuchtungsphase sehr gut wieder. Die numerische Simulationsmethode kann erfolgreich an publizierten Messergebnissen validiert werden. Abschliessend konnten die erreichten Messergebnisse innerhalb des Brückenmonitorings mit dem Simulationsmodell ebenfalls

nachvollzogen werden. Die numerische Simulationsmethode ist somit ein gutes Hilfsmittel zur Abschätzung der zu erwartenden Holzfeuchte im Tragquerschnitt. Aufgrund der Anwendung eines kommerziell verfügbaren Programms kann ein relativ einfacher Einsatz in der Praxis für die Planung von Tragwerken erfolgen. Weiterhin kann das erreichte Simulationsmodell für die weitere Analyse einer ruhigen und beanspruchten Zone im Tragquerschnitt genutzt werden. Für den Nachweis der Tragsicherheit ist es noch wichtig aus der Verteilung der Holzfeuchte im Tragelement die Dehnungen/Spannungen abzuleiten. Dies wäre ein wichtiger nächster Forschungsschritt im Bereich der numerischen Simulationen.

5.3 Empfehlungen für die Praxis zusammengefasst

Für die Planung von Tragwerken kennen wir das vorgesehene Nutzungsprofil und können anhand dessen eine erste Einschätzung des sich einstellenden Klimas respektive der Holzfeuchte vornehmen. Für geschlossene Tragwerke wie Hallen, Schwimmbäder, Reithallen und Eisstadien konnten typische Klimasituationen ausgewertet werden. Im Bericht sind die Spannweiten von Temperaturen und relativer Luftfeuchte je Gebäudetyp zusammenfassend dargestellt. Basierend auf diesen Daten wurde die rechnerische Ausgleichsfeuchte an der Oberfläche bestimmt und eine zur Zuordnung in die drei relevanten Feuchteklassen vorgenommen, s. Tabelle 7. Für frei dem Klima ausgesetzte Tragwerke, wie z. B. Brücken oder Türme, kann eine erste globale Abschätzung der zu erwartenden Holzfeuchte anhand der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte von benachbarten Wetterstationen erfolgen. Hierbei sind aber immer die lokalen Effekte (Tal, Beschattung, Flussquerung, usw.) zu beachten, die das Mikroklima am Tragwerk beeinflussen. In der Regel kann man Brücken in die Feuchtekasse 2 eingruppieren, wobei sich dies aufgrund der lokalen Effekte ändern kann. Für Brücken im Bereich von Gewässern empfiehlt sich eine Erhöhung von 2 M% zu berücksichtigen.

Für Tragwerke mit wechselnden klimatischen Beanspruchungen (z. B. Brücken und Eisstadien) konnte anhand der experimentellen Untersuchungen herausgearbeitet werden, dass der Querschnitt in Bezug auf die Holzfeuchte sich in eine ruhige und beanspruchte Zone gliedern lässt. Innerhalb einer massiven Auffeuchtung von 12 M% auf 24 M% über ein Jahr konnte kein konstantes Holzfeuchteniveau bei einem relativ kleinen Querschnitt von 200 mm Breite Holzfeuchteverteilung in radialer und tangentialer Richtung erreicht werden. In longitudinaler Richtung ist der Feuchtetransport wesentlich zügiger und bereits nach ca. 90 Tagen stellte sich bei einer Messbreite von 200 mm ein konstantes Holzfeuchteniveau ein.

Der Messzeitraum von einem Jahr umfasst viele Regelklimabbeanspruchungen der Gebäudetypen, wie Brücken (Jahreszeitenwechsel), Eisstadien (Saisonwechsel), Schwimm- und Reithallen (Servicezeiten, Saisonwechsel). Die Grösse der Zone ist aber noch in weiterführenden Untersuchungen zu definieren. Dieses erste Ergebnis unterstützt dennoch die Annahmen, dass im Querschnittsinneren in massiven Brettschichtholzträgern und blockverleimten Brettschichtholzträgern keine Spannungen infolge Feuchteänderungen entstehen und die Gefahr des Querschnittsaufreissen minimal ist. Dennoch ist zu beachten, dass es eine aktive Zone am Querschnittsäußerem gibt, die beansprucht wird und bereits bei geringen Holzfeuchteänderungen reissen kann.

Das erarbeitete numerische Simulationsmodell kann in Zusammenhang mit vorliegenden Klimadaten (Temperatur und Luftfeuchte) eine erste Abschätzung der zu erwartenden Holzfeuchte über den Tragquerschnitt geben. Mit Hilfe dieser Berechnungen könnte die Grösse der beanspruchten Zone definiert werden und evtl. auch eine Klassifizierung der Feuchteklassen über den Querschnitt erfolgen.

6 Danksagung

Die vorliegenden Forschungsergebnisse wurden primär vom Bundesamt für Umwelt, den Wald- und Holzforschungsfonds gefördert sowie der Roth AG, Burgdorf, dem Ingenieurbüro Makiol und Wiederkehr wie auch dem Tiefbauamt des Kantons Bern unterstützt. Die Ergebnisse aus den begleitenden studentischen Arbeiten von Ursula Gerzer und Marcus Schiere sind im Bericht mit eingeflossen. Allen Beteiligten wird an dieser Stelle für ihr Mitwirken gedankt.

7 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Holzbau, Tragwerke und Architektur und des Projektverantwortlichen gültig.

Dieser Bericht besteht aus 66 Seiten inkl. Anhang.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- Angst-Nicollier, V. (2012) Moisture Induced Stresses in Glulam, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim
- BAFU (2015)
https://map.geo.admin.ch/?lang=de&X=198000.00&Y=654850.00&zoom=1&topic=bafu&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers_opacity=0.75, Zugriff 19.10.2015
- Cruz, H., Custódio, J. (2006) Durability and temperature effects on bond line, Presentation at COST Action FP 1101, Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures
- EN1955-1-1:2004: Design of Timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, 2004, CEN Brussels, Belgium
- Franke, B., Müller, A., Vogel, M., Tannert, T. (2012) Langzeitmessung der Holzfeucht und Dimensionsänderung an Brücken aus blockverleimten Brettschichtholz, Forschungsbericht, Berner Fachhochschule, Biel
- Gerzer, U. (2015) Parameterbestimmung für den Feuchtetransport in blockverleimten Brettschichtholz, Projektarbeit, Berner Fachhochschule, Institut Holzbau, Tragwerke und Architektur, Biel, Schweiz
- Grosser, D., Zimmer, B. (1989) Einheimische Nutzhölzer und ihre Verwendung, holzbau handbuch R4/T2/F2, Informationsdienstholtz, Düsseldorf
- Hill, C.A.S., Norton, A., Newman, G. (2010) Analysis of the water vapour sorption behaviour of Sitka Spruce based on the parallel exponential kinetics model, Holzforschung, Vol. 64, pp. 469-473
- Jönsson, J. (2001) Moisture induced stresses in glulam cross sections, In proceedings, CIB-W18/34-12-4, Italy
- Jorge, L. (2013) Environmental and Moisture Measurements, Presentation at COST Action FP 1101, Assessment, Reinforcement and Monitoring of Timber Structures
- Keylwerth, R., Noack, D. (1964) Die Kammerrocknung von Schnittholz, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Reinbek, Betriebsblatt 1, 22.JG., Heft 1
- Gamper, A., Dietsch, P., Winter, S. (2014) Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures, In Proceedings: Cost Workshop – Highly performing timber structures, ISBN 9 783952 37873, Biel, Switzerland
- Finger, A., Meili, M. (2002) Dauerhaftigkeit von Holzbrücken, Forschungs- und Arbeitsbericht 115/49, Empa Abteilung Holz, Dübendorf, Schweiz
- MeteoSwiss (2015) Monats und Jahreskarten, <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/gegenwart/monats-und-jahreskarten.html#precip;mean;2014;yy;2014>
- NA Deutschland; DIN EN 1995-1-1/NA, National festgelegte Parameter-Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten-Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin

NA Frankreich; NF EN 14081-1:2011 Timber Structures - Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section - Part 1: General Requirements." 2011. AFNOR Association Française de Normalisation

SIA 265:2012, Holzbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

Schiere, M. (2015) Analysis of moisture content in timber structures, Module Paper, Berner Fachhochschule, Institut Holzbau, Tragwerke und Architektur, Biel, Schweiz

Simpson, W.T. (1973) Prediction equilibrium moisture content of wood by mathematical models, Wood and Fiber, Vol. 5, p. 41-48 Wood and Fibre 5 (1): 41 – 48

Winter, S., Sieder, M., Gamper, A., Dietsch, P., Merk., M. (2012) Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen, Forschungsbericht, TU-München.

WUFI (2015) Software, <https://wufi.de/de/>, 27.07.2015

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Feuchteklassen nach SIA 265:2014, EN 1995-1-1:2004 und den Nationales Anwenderdokument für Frankreich und Deutschland	12
Tabelle 2: Zuordnung der Feuchtekasse zur durchschnittlichen Holzfeuchte von Bauteilen nach SIA 265:2014	12
Tabelle 3: Zusammenstellung der berücksichtigten Gebäudetypen	13
Tabelle 4: Kenngrössen des Klimas im Eisstadion Aarau	14
Tabelle 5: Obermattbrücke; Vergleich lokale Brückenmessung zur globalen Wetterstation	16
Tabelle 6: Rechnerische Ausgleichsfeuchte für Brücken; Vergleich lokale Brückenmessung zur globalen Wetterstation	16
Tabelle 7: Zuordnung der Gebäudetypen zu Feuchteklassen lt. SIA 265:2014	17
Tabelle 8: Kenngrössen für Materialachsen orientierte Versuche	18
Tabelle 9: Grenzwerte der Holzfeuchte für die Gefahr des Aufreissens des Querschnitts	29
Tabelle 10: Resultierende Parameter getrennt nach Materialachse (L, R, T) und Messtiefe (25, 45, 70, 100 mm)	30
Tabelle 11: Materialgesetze für die numerische Simulation in WUFI®	31
Tabelle 12: Koeffizienten zur Beschreibung der Wasserdampfdiffusionszahl in Abhängigkeit der Luftfeuchte	31
Tabelle 13: Übersicht Literaturversuche zur Validierung der numerischen Simulation	33
Tabelle 14: Messpositionen und Messgrössen	56
Tabelle 15: Übersicht der angepassten und verwendeten Materialdaten für die Nutzung in WUFI®	63
Tabelle 16: Messstellen	64
Tabelle 17 : Verwendetes Offset für den besseren Vergleich der numerischen Simulation mit den Messergebnissen	64

8.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Überführung in Horen mit blockverleimten Brettschichtholzträgern	9
Abb. 2: Holz-Beton Verbundbrücke bei Bulle	9
Abb. 3: Auffeuchtung im Holz mit korrespondierender Spannungsverteilung sowie dem möglichen Rissbild	11
Abb. 4: Klimasituation für das Eisstadion in Aarau, Schweiz	13
Abb. 5: Zusammenstellung der Mittelwert für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit je nach Gebäudetyp	14

Abb. 6: Gegenüberstellung der mittleren rechn. Ausgleichfeuchte zu den Feuchteklassen nach SIA 265:2012	14
Abb. 7: Lage der überwachten Brücken	15
Abb. 8: Ansicht Obermattbrücke im Emmental, Balkenbrücke mit Spannweite 32 m und Nutzlast 40 Tonnen	15
Abb. 9: Klimasituation für die Obermattbrücke, Vergleich Brückenmessung und Wetterstation	15
Abb. 10: Zuschnittplan für die Prüfserien	18
Abb. 11: Skizze zu den Prüfkörpern 200/200/200 mm und 200/200/800 mm, blau gekennzeichnete Oberflächen isoliert gegen Holzfeuchtetransport	19
Abb. 12: Anordnung der Messsonden in den Prüfkörpern, 200/200/200 mm und 200/200/800 mm	19
Abb. 13: Vorbereitung der Prüfkörper und Klimatisierung	19
Abb. 14: Geometrie und Messpunktorientierung für den Blockprüfkörper	20
Abb. 15: Ansichten des Blockprüfkörpers während der Installation der Messtechnik und der Herstellung	21
Abb. 16: Messnadelpaar zur Erfassung der Holzfeuchte resp. Elektr. Widerstandes (links) und applizierte innenliegende Dehnungsmessstreifen (rechts)	21
Abb. 17: Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum und den Querschnitt zu gewählten Zeiträumen	22
Abb. 18: Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt und die Zeit	23
Abb. 19: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe	23
Abb. 20: Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum und den Querschnitt zu gewählten Zeiträumen	24
Abb. 21: Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt und die Zeit	25
Abb. 22: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den Materialachsen für die Messtiefe 25 mm und 400 mm	25
Abb. 23: Dehnungsentwicklung getrennt nach den Materialachsen	26
Abb. 24: Verlauf der Holzfeuchte über den Messzeitraum und den Querschnitt zu gewählten Zeiträumen	27
Abb. 25: Holzfeuchte Entwicklung in den drei Messrichtungen	27
Abb. 26: Zeitlicher Holzfeuchteanstieg für konstante Messtiefe für beide Prüfkörperlängen 200 mm und 800 mm	28
Abb. 27: Theoretische Analyse der beanspruchten Zone im Querschnitt, Tangentiale Richtung, 200/200/200 mm	28
Abb. 28: Theoretische Analyse der beanspruchten Zone im Querschnitt; Radiale Richtung, 200/200/200 mm	28
Abb. 29: Differenz der Holzfeuchte mit zunehmender Querschnittstiefe, Tangentiale Richtung, 200/200/200 mm	29
Abb. 30: Differenz der Holzfeuchte mit zunehmender Querschnittstiefe, Radiale Richtung, 200/200/200 mm	29
Abb. 31: Differenz der Holzfeuchte mit zunehmender Querschnittstiefe, Tangentiale Richtung, 200/200/800 mm	29
Abb. 32: Prinzipielle Darstellung von beanspruchter Zone für unterschiedliche Tragquerschnitte	29
Abb. 33: Funktionen der Wasserdampfdiffusionszahl in Abhängigkeit der Luftfeuchte (LF)	31
Abb. 34: Angepasste Feuchtespeicherfunktion für alle drei Materialachsen (L, R, T)	31
Abb. 35: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe	32
Abb. 36: Vergleich des Auffeuchtungs- und Trocknungsverhalten für Nadelfichtenholz gegenüber dem numerischen Simulationsergebnis mit WUFI® für tangentiale Richtung (MS RT12-14)	32
Abb. 37: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 1, Tabelle 13	33
Abb. 38: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 2, Tabelle 13	33

Abb. 39: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 3, Tabelle 13	33
Abb. 40: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 4, Tabelle 13	33
Abb. 41: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 4, Tabelle 13	34
Abb. 42: Vergleich Simulation mit Angst-Nicollier (2012), Testreihe 4, Tabelle 13	34
Abb. 43: Vergleich Simulation mit Jönsson (2001), Testreihe 1, Tabelle 13	34
Abb. 44: Vergleich Simulation mit Jönsson (2001), Testreihe 2, Tabelle 13	34
Abb. 45: Überführung in Horen mit blockverleimten BSH Trägern	35
Abb. 46: Messstellen-Plan für die Brücke Horen (E – Position Endträger, M- Position Mitte des Trägers, O – Oberfläche, I – Innenliegend im Querschnitt)	35
Abb. 47: Gemessenes Klima mit resultierender rechnerischen Ausgleichsfeuchte an der Brücke Horen, Klimawiederholung für die Nutzung in WUFI®	36
Abb. 48: Simulationsergebnis für die Brücke Horen, getrennt in Materialachsen für die Messpunkte E-I-1 und E-I-5	37
Abb. 49: Gemitteltes Simulationsergebnis für die Brücke im Vergleich mit den Messergebnissen und der rechnerischen Ausgleichsfeuchte anhand des Klimas	37
Abb. 50: Jährliche Niederschlagsmenge (links) und Jahrestemperatur im Mittel (rechts) in der Schweiz für 2014, Quelle: MeteoSwiss (2015)	38
Abb. 51: Verwendete Wetterstationen der Schweiz	39
Abb. 52: Resultierende rechnerische Ausgleichsfeuchte als Mittelwert über das Jahr 2014	39
Abb. 53: Resultierende Feuchtekasse nach SIA 265:2012 unter Verwendung der mittleren Holzfeuchte aus Abb. 52	39
Abb. 54: Resultierende Feuchtekasse nach SIA 265:2012 unter Verwendung der mittleren Holzfeuchte mit 2M% Erhöhung	39
Abb. 55: Eisstadium	47
Abb. 56: Sporthalle	47
Abb. 57: Schwimmhalle	47
Abb. 58: Brücke	47
Abb. 59: Klima für 200/200/200 mm und 200/200/800 mm	57
Abb. 60: Klima für 600/600/800 mm	57
Abb. 61: Messergebnisse zum Zeitpunkt der Darrprobe	58
Abb. 62: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe	59
Abb. 63: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe	60
Abb. 64: Holzfeuchte Entwicklung in den drei Messrichtungen	61
Abb. 65: Vergleich der 200 und 800 mm Prüfserien	62

Anhang A: Klimasituationen

A.1 Gebäudetypen und Datenquellen für Innenklima

Nr.	Name	Gebäudetyp	Quelle	Typ der Daten	Messfrequenz
I-1	Landwirtschaftsbetrieb Greiß Roßhaupten	Landwirtschaft	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
I-2	Landwirtschaftsbetrieb Mair Roßhaupten	Landwirtschaft	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
I-3	Schmitz - Kälberzentrum Buchloe	Landwirtschaft	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
II-1	Dachstuhl in PT	Dachstuhl	[4]	Monitoring	1 day
II-2	Dachstuhl in PT	Dachstuhl	[4]	Gleitender Durchschnitt	10 days
II-3	Dachstuhl Theater in Portugal	Dachstuhl	[4]	Monitoring	1 day
II-4	Dachstuhl Theater in Portugal	Dachstuhl	[4]	Gleitender Durchschnitt	10 days
IV-1	C Shopping centre in PT	Halle	[4]	Monitoring	1 day
IV-2	C Shopping centre in PT	Halle	[4]	Gleitender Durchschnitt	10 days
V-1	Aarau	Eisstadion	[1]	Monitoring	1h
V-2	Aarau	Eisstadion	[1]	Gleitender Durchschnitt	1 day
V-3	Olympia-Eissporthalle Garmisch-Partenkirchen geschlossen, klimatisiert	Eisstadion	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
V-4	Bundesleistungszentrum Füssen geschlossen, klimatisiert	Eisstadion	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
V-5	Eishalle Landsberg geschlossen, nicht klimatisiert	Eisstadion	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
V-6	Eishalle Buchlohe geschl., nicht klimatisiert	Eisstadion	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
VII-1	Verkaufshalle Sportmarkt Füssen	Produktionshalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
VII-2	Produktionshalle MW Racing Füssen	Produktionshalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
VIII-1	Olympia Reithalle München- Riem	Reithalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
VIII-2	Gestüt Obere Mühle Blonhofen	Reithalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
VIII-3	Sternstunden - Reithalle Herzogsägmühle	Reithalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
IX-1	Paul Wegmann-Halle Ingolstadt	Sporthalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
IX-2	Turnhalle der Volksschule Benediktbeuern	Sporthalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
IX-3	Turnhalle Gebeleschule München	Sporthalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
IX-4	Sporthalle in Portugal	Sporthalle	[3]	Monitoring	1 day
IX-5	Sporthalle in Portugal	Sporthalle	[3]	Gleitender Durchschnitt	10 days
X-1	Wellenbad Penzberg Hallenbereich	Schwimmhalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
X-2	Wellenbad Penzberg Durchgang Außenbecken	Schwimmhalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
X-3	Schwimmhalle Prienavera Prien	Schwimmhalle	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
X-4	Schwimmhalle in Portugal	Schwimmhalle	[3]	Monitoring	1 day
X-5	Schwimmhalle in Portugal	Schwimmhalle	[3]	Gleitender Durchschnitt	10 days
XI-1	Pflanzenhalle Willibaldstraße München	Warenhaus	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
XI-2	Lagerhalle Gebr. Heißerer Prem	Warenhaus	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days
XI-3	Zimmerei Hubert Schmid Marktoberdorf	Warenhaus	[2]	Gleitender Durchschnitt	10 days

A.2 Auswertung des Innenklimas nach Gebäudetyp

A.2.1 Analyse des gleitenden Durchschnitts über 10 Tage

Nr.	Temperatur				Relative Luftfeuchtigkeit				Ausgleichsfeuchte			
	Mittelwert	Minim.	Maxim.	Variation	Mittelwert	Minim.	Maxim.	Variation	Mittelwert	Minim.	Maxim.	Variation
I-1	11.6	2.0	24.0	22.0	74.7	44.8	90.1	45.3	15.3	11.3	19.9	8.7
I-2	14.2	3.0	27.0	24.0	68.4	43.1	91.1	48.0	14.0	9.5	19.2	9.7
I-3	12.6	-1.0	28.0	29.0	69.2	37.8	91.8	54.0	13.6	9.6	18.7	9.1
II-1	27.3	17.1	37.7	20.7	46.5	24.5	68.0	43.5	8.6	5.0	12.6	7.5
II-2	27.3	19.3	34.3	15.0	46.6	36.9	60.1	23.1	8.6	7.1	11.1	4.0
II-3	26.2	20.2	32.3	12.1	39.5	22.6	59.7	37.1	7.5	4.9	10.8	5.9
II-4	26.4	23.1	30.8	7.7	38.9	31.7	48.9	17.2	7.4	6.2	9.0	2.8
IV-1	22.9	13.0	33.8	20.9	49.7	27.3	74.4	47.1	9.2	5.7	14.4	8.7
IV-2	23.0	13.7	31.3	17.6	49.8	36.8	70.3	33.5	9.2	7.1	13.3	6.2
V-1	8.2	-1.5	25.8	27.3	77.1	33.2	97.8	64.6	16.7	6.8	26.8	20.0
V-2	8.2	-0.1	22.0	22.1	77.1	38.0	96.4	58.4	16.8	7.5	25.5	18.0
V-3	19.9	12.5	26.8	14.3	40.2	11.5	68.2	56.7	7.9	3.6	11.6	8.0
V-4	9.2	2.0	22.0	20.0	68.3	46.9	91.5	44.6	13.8	10.2	18.4	8.2
V-5	9.4	-0.5	26.0	26.5	69.0	42.8	85.5	42.7	13.1	9.3	16.3	7.0
V-6	9.9	-2.4	28.5	30.9	62.2	30.3	89.2	58.9	13.0	7.0	19.3	12.3
VII-1	18.4	9.0	27.0	18.0	40.9	19.5	57.6	38.1	7.8	5.3	9.8	4.5
VII-2	27.1	18.2	39.5	21.3	25.8	5.9	55.5	49.6	5.2	2.6	9.3	6.7
VIII-1	13.3	2.4	25.0	22.6	79.7	46.0	98.2	52.2	17.1	12.9	22.5	9.6
VIII-2	10.5	-3.0	27.0	30.0	77.8	48.5	97.0	48.5	16.6	11.0	23.1	12.1
VIII-3	9.8	-5.6	27.0	32.6	77.9	47.6	99.8	52.2	16.9	10.8	23.0	12.1
IX-1	27.4	12.0	49.0	37.0	27.7	13.9	43.5	29.6	5.5	3.8	7.2	3.5
IX-2	20.6	15.0	32.0	17.0	42.8	22.3	64.1	41.8	8.1	5.9	10.8	5.0
IX-3	20.8	17.5	25.5	8.0	51.2	32.1	65.9	33.8	9.2	6.9	11.7	4.8
IX-4	19.5	13.7	24.1	10.3	64.8	38.7	90.0	51.2	12.4	7.5	20.6	13.1
IX-5	19.4	15.5	22.4	7.0	65.2	45.9	79.7	33.8	12.5	8.6	16.5	7.9
X-1	29.7	25.0	32.0	7.0	48.3	44.8	51.8	7.0	8.6	8.3	8.9	0.6
X-2	28.7	21.2	32.0	10.8	88.6	76.2	95.8	19.6	20.4	18.3	23.0	4.7
X-3	30.5	16.0	38.0	22.0	45.6	36.5	65.4	28.9	8.4	7.0	10.5	3.6
X-4	31.0	21.7	33.6	11.9	56.6	44.5	82.1	37.6	10.1	8.0	16.4	8.4
X-5	30.9	27.6	32.6	5.0	56.8	48.3	67.9	19.6	10.1	8.6	12.5	3.9
XI-1	10.1	-5.0	33.0	38.0	74.3	37.6	100.0	62.4	16.7	9.8	24.0	14.2
XI-2	9.7	-8.0	27.0	35.0	67.1	38.9	93.0	54.1	13.4	9.5	18.1	8.6
XI-3	13.4	1.0	28.0	27.0	61.4	37.5	81.5	44.0	11.9	8.5	15.9	7.4

A.2.2 Grafische Darstellung ausgewählter Gebäudetypen

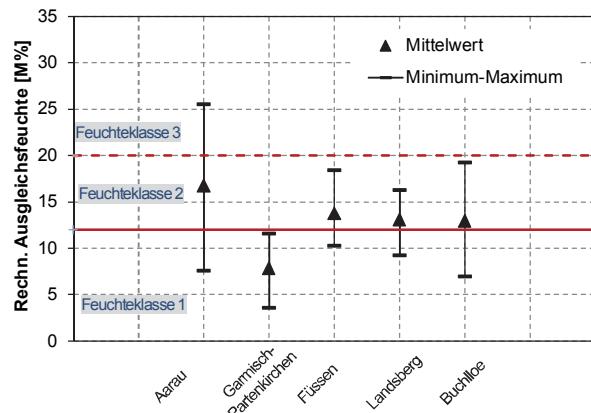


Abb. 55: Eisstadium

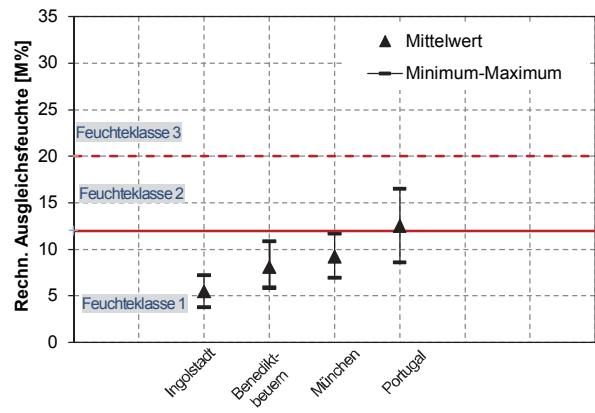


Abb. 56: Sporthalle

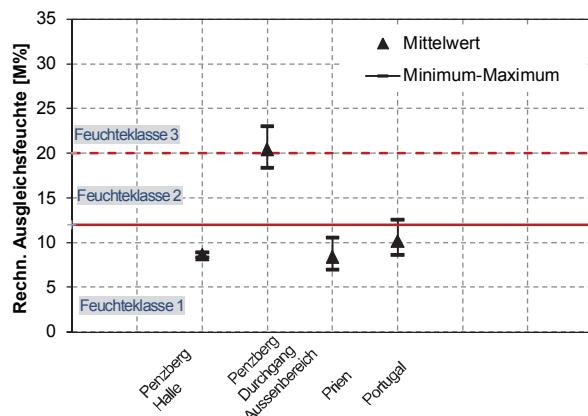


Abb. 57: Schwimmhalle

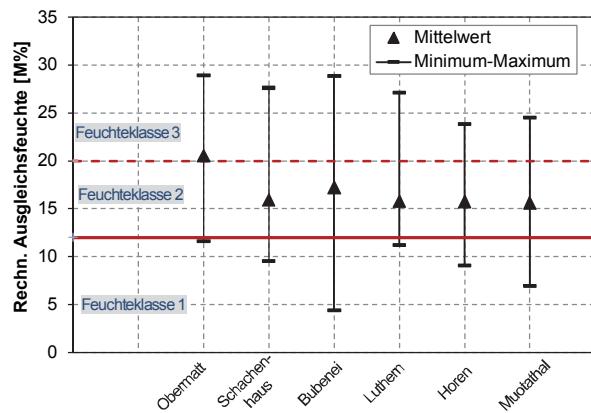


Abb. 58: Brücke

A.3 Klima an Brücken

A.3.1 Eckdaten zu den Brücken und genutzten Wetterstationen

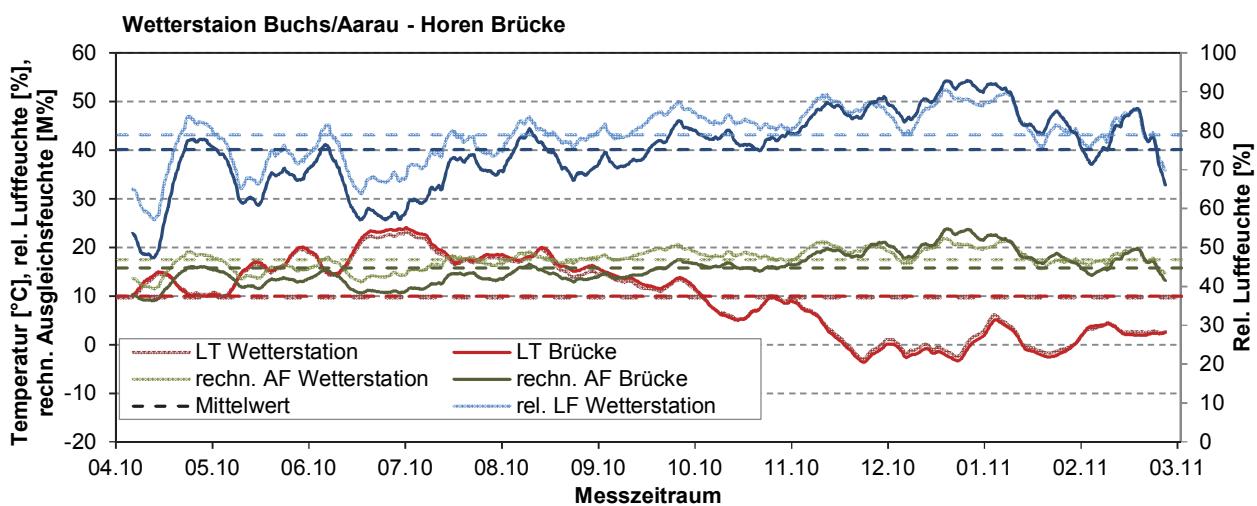
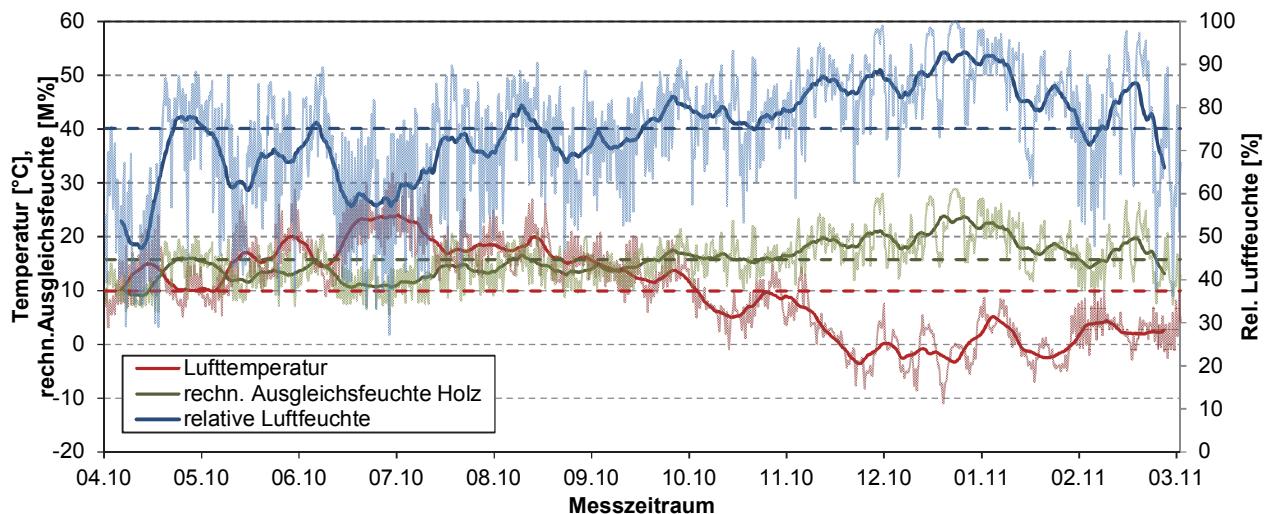
Nr.	Name	Gebäudetyp	Quelle	Typ der Daten	Messfrequenz
III-1	Obermatt	Bridge	[1]	Monitoring	3h to 12h
III-2	Obermatt	Bridge	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
III-3	Schachenhaus	Bridge	[1]	Monitoring	6h
III-4	Schachenhaus	Bridge	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
III-5	Bubenei	Bridge	[1]	Monitoring	24h
III-6	Bubenei	Bridge	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
III-7	Luthern	Bridge	[1]	Monitoring	6h
III-8	Luthern	Bridge	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
III-9	Horen	Bridge	[1]	Monitoring	6h
III-10	Horen	Bridge	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
III-11	Muotathal	Bridge	[1]	Monitoring	6h to 12h
III-12	Muotathal	Bridge	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
VI-1	Langnau im Emental - Zeit Obermatt	MeteoSwiss	[1]	MeteoSwiss	3h to 12h
VI-2	Langnau im Ementhal - Zeit Obermatt	MeteoSwiss	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
VI-3	Langnau im Ementhal - Zeit Schachenhaus	MeteoSwiss	[1]	MeteoSwiss	6h
VI-4	Langnau im Ementhal - Zeit Schachenhaus	MeteoSwiss	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
VI-5	Langnau im Ementhal - Zeit Bubenei	MeteoSwiss	[1]	MeteoSwiss	24h
VI-6	Langnau im Ementhal - Zeit Bubenei	MeteoSwiss	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
VI-7	Egolzwil - Zeit Luthern	MeteoSwiss	[1]	MeteoSwiss	6h
VI-8	Egolzwil - Zeit Luthern	MeteoSwiss	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
VI-9	BuchsAarau - Zeit Horen	MeteoSwiss	[1]	MeteoSwiss	6h
VI-10	BuchsAarau - Zeit Horen	MeteoSwiss	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage
VI-11	Altdorf - Zeit Muotathal	MeteoSwiss	[1]	MeteoSwiss	6h
VI-12	Altdorf - Zeit Muotathal	MeteoSwiss	[1]	Gleitender Durchschnitt	10 Tage

A.3.2 Analyse des gleitenden Durchschnitts über 10 Tage

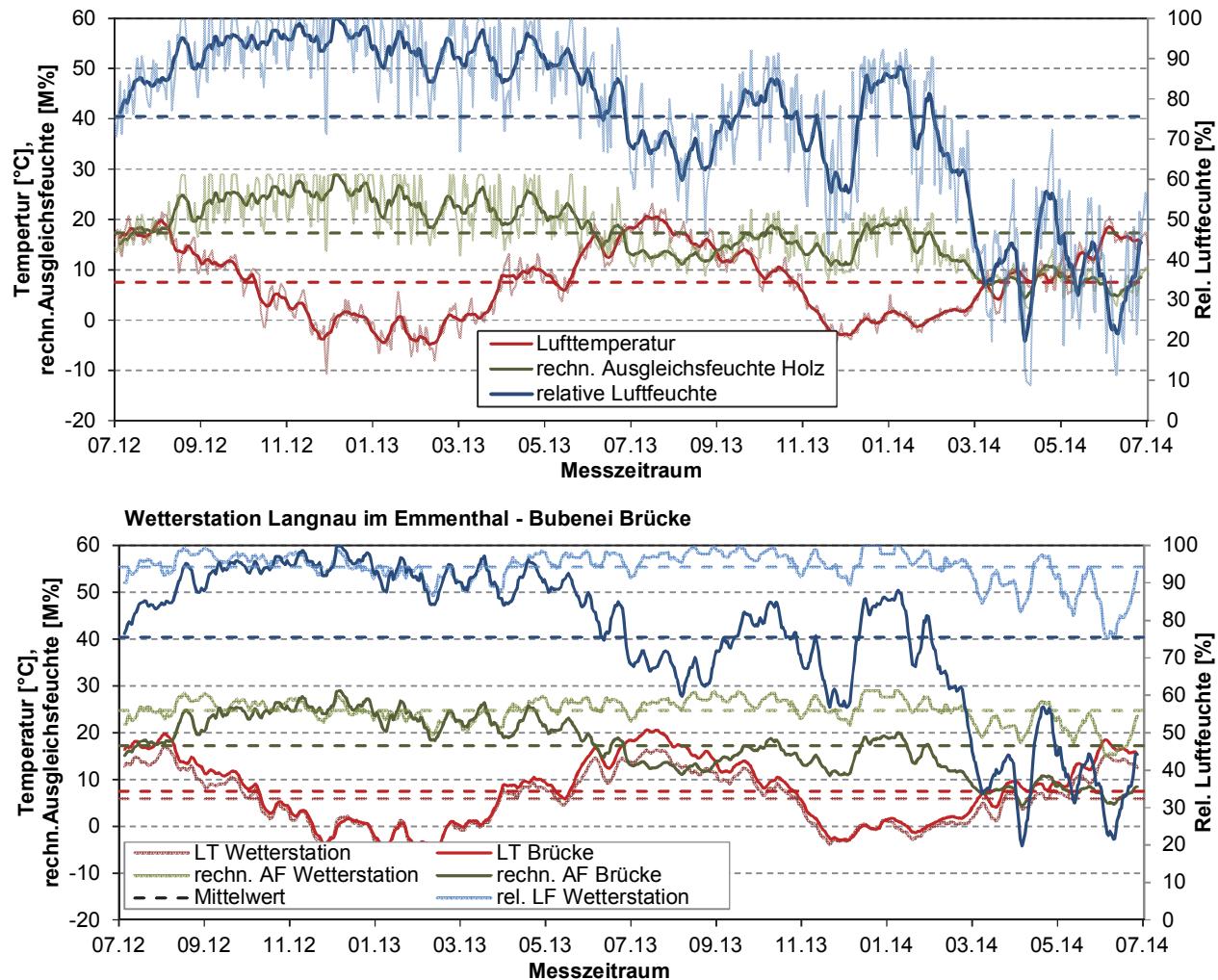
Nr.	Temperatur				Relative Luftfeuchtigkeit				Ausgleichsfeuchte			
	Mittelwert	Minim.	Maxi-mum	Variati-on	Mittelwert	Minim.	Maxi-mum	Variati-on	Mittelwert	Minim.	Maxi-mum	Variati-on
III-1	8.0	-18.1	25.3	43.4	86.8	34.5	99.9	65.4	20.6	6.9	29.0	22.1
III-2	8.1	-12.0	20.9	33.0	86.7	62.4	99.9	37.5	20.5	11.6	28.9	17.2
III-3	11.3	-5.9	25.3	31.2	75.2	38.7	99.9	61.2	15.9	7.6	28.9	21.3
III-4	11.4	-4.0	21.6	25.5	75.1	50.3	98.5	48.2	15.9	9.5	27.6	18.1
III-5	7.6	-10.7	23.2	33.9	75.4	8.8	99.9	91.1	17.2	2.3	29.0	26.6
III-6	7.5	-4.9	20.7	25.5	75.6	19.7	99.9	80.2	17.2	4.4	28.9	24.5
III-7	9.4	-8.2	25.6	33.8	76.2	45.8	99.9	54.1	15.7	8.7	28.9	20.2
III-8	9.4	-3.5	22.5	26.0	76.3	60.0	98.1	38.1	15.8	11.2	27.1	15.9
III-9	9.8	-11.0	31.9	42.9	74.7	27.2	99.9	72.7	15.6	5.6	28.9	23.3
III-10	9.9	-3.6	24.1	27.6	75.2	47.3	92.9	45.6	15.8	9.1	23.8	14.8
III-11	-4.6	-8.8	27.7	36.5	75.0	20.9	99.9	79.0	15.6	4.7	28.9	24.3
III-12	6.4	-4.3	23.0	27.4	75.4	35.0	94.8	59.7	15.6	7.0	24.5	17.6
VI-1	8.3	-19.1	31.7	50.8	84.1	21.8	100.0	78.2	20.3	4.7	29.1	24.3
VI-2	8.2	-12.8	21.0	33.8	84.2	61.4	99.3	37.9	20.3	12.0	28.5	16.4
VI-3	8.2	-19.1	30.7	49.8	84.5	21.8	100.0	78.2	20.5	4.7	29.1	24.3
VI-4	8.1	-12.8	20.7	33.4	84.5	62.5	99.4	37.0	20.6	12.3	28.5	16.2
VI-5	5.8	-13.4	20.7	34.1	94.2	58.5	100.0	41.5	24.7	11.0	29.1	18.1
VI-6	5.8	-6.1	17.1	23.2	94.2	75.0	100.0	25.0	24.7	15.0	29.0	14.0
VI-7	8.7	-12.3	29.3	41.6	84.1	29.8	100.0	70.2	20.5	6.1	29.1	22.9
VI-8	8.6	-4.6	21.6	26.2	84.0	61.7	99.6	37.8	20.5	13.2	28.6	15.3
VI-9	9.8	-11.2	31.6	42.8	78.6	24.4	100.0	75.6	17.5	5.3	28.9	23.6
VI-10	9.9	-2.9	23.3	26.2	78.9	57.0	90.6	33.6	17.6	11.5	21.9	10.4
VI-11	10.0	-11.3	32.9	44.2	75.1	14.3	100.0	85.7	15.9	3.5	29.1	25.6
VI-12	10.0	-2.5	23.1	25.5	75.0	51.9	90.2	38.3	15.9	10.4	21.8	11.5

A.4 Vergleich Wetterstation lokale Messung an Brücke

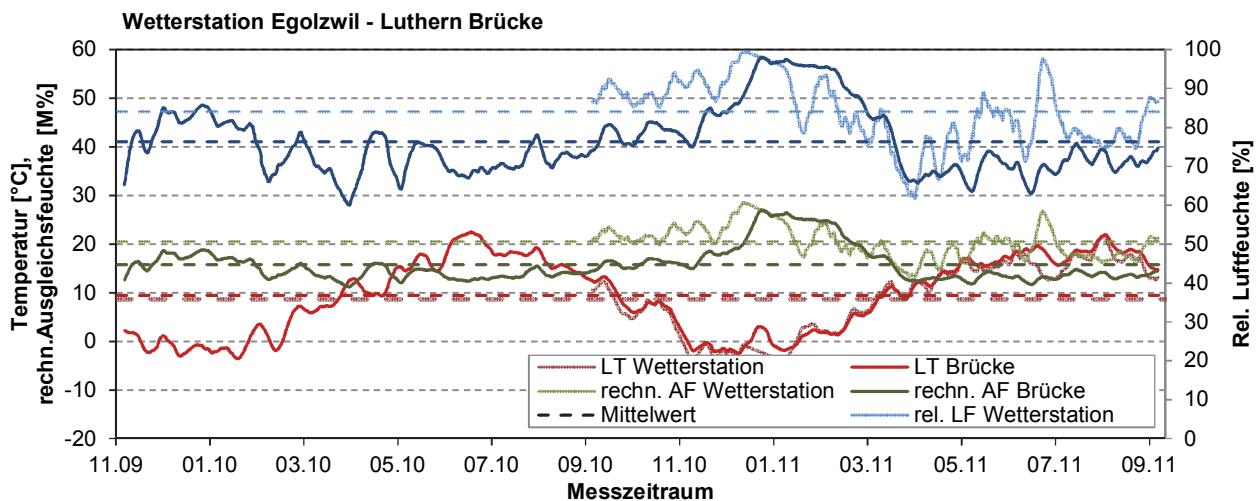
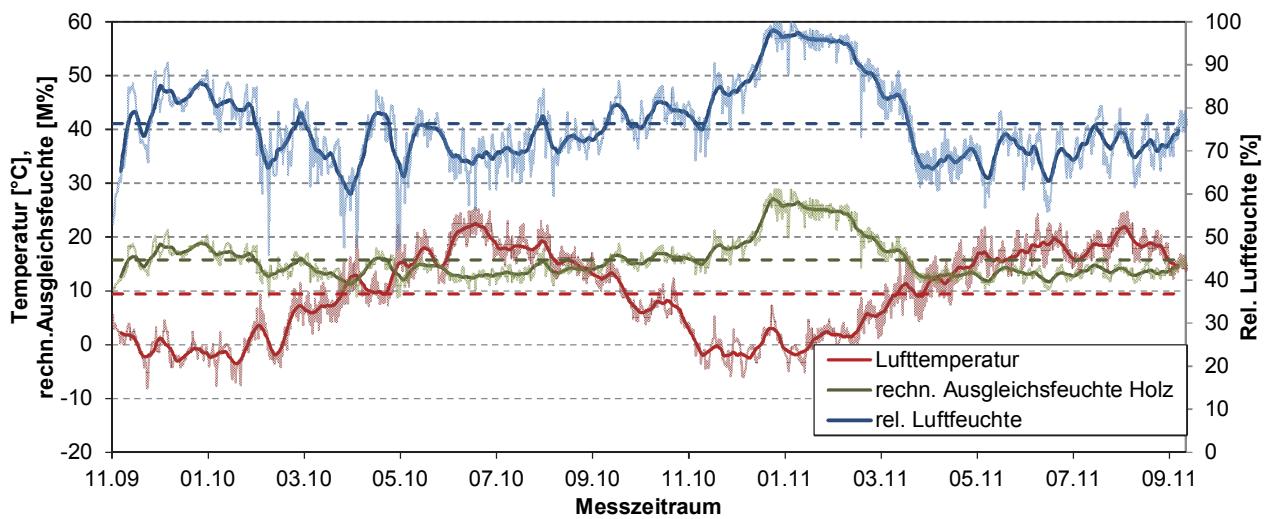
A.4.1 Brücke Horen



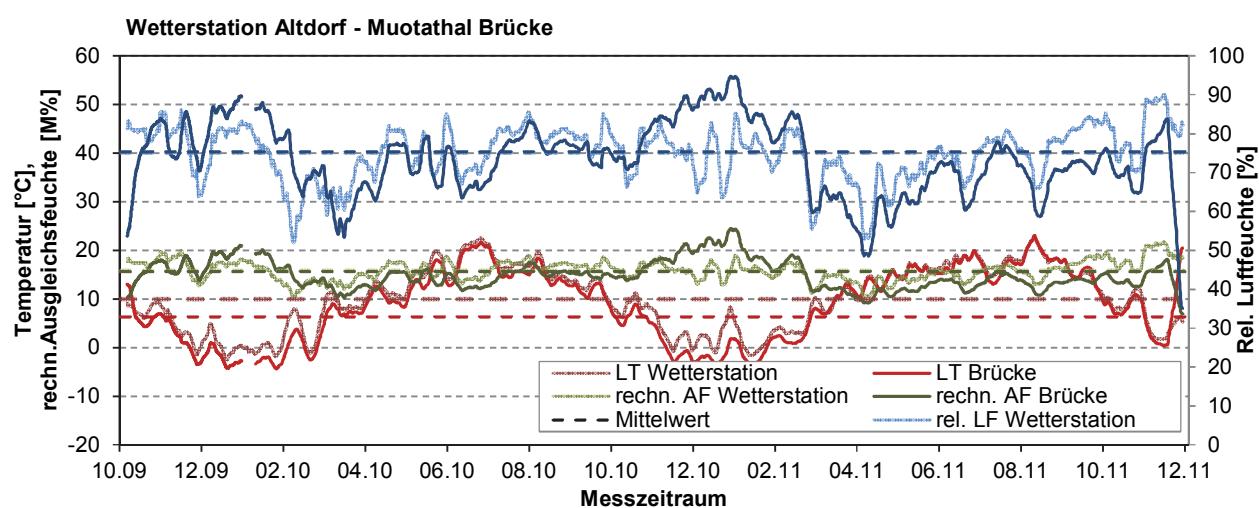
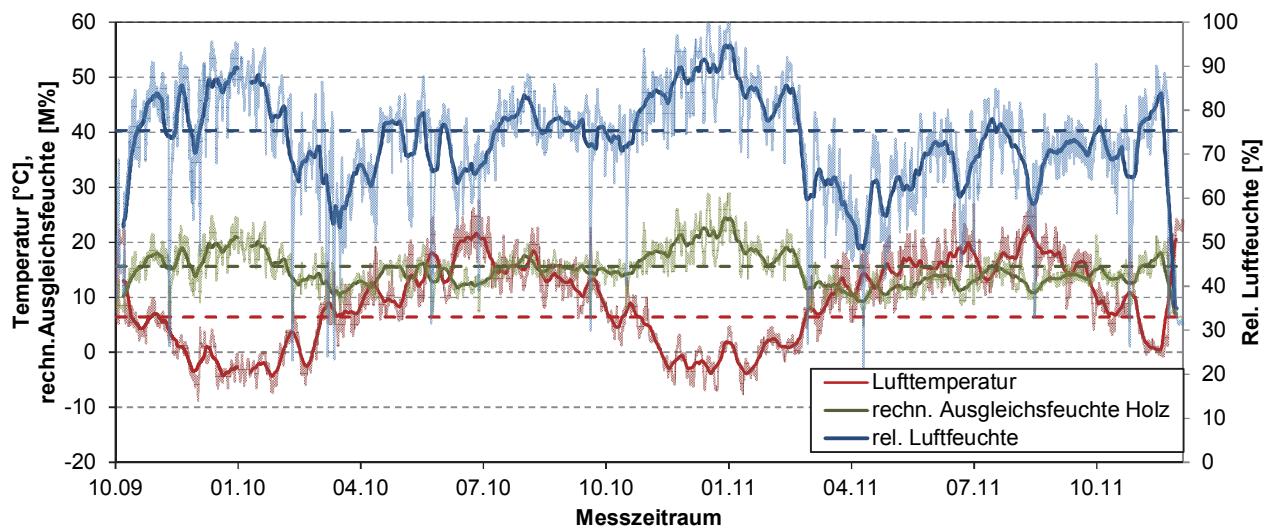
A.4.2 Brücke Bubenei



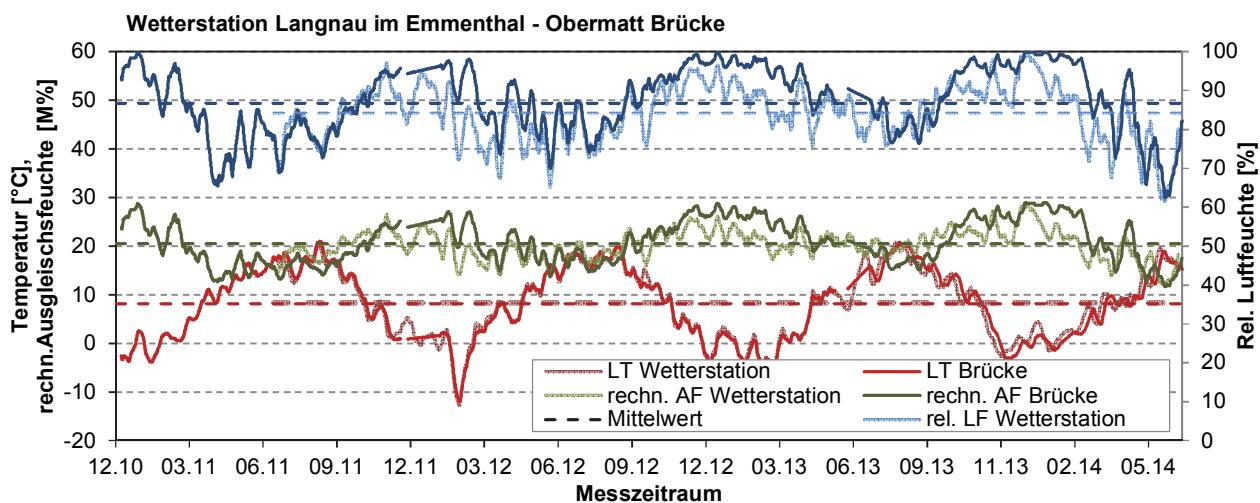
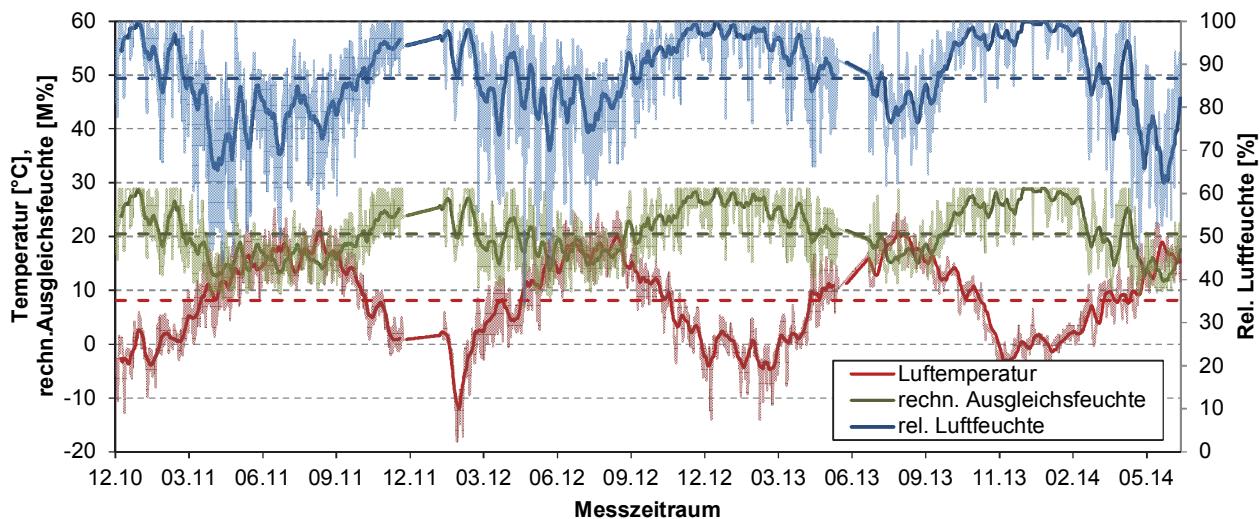
A.4.3 Brücke Luthern



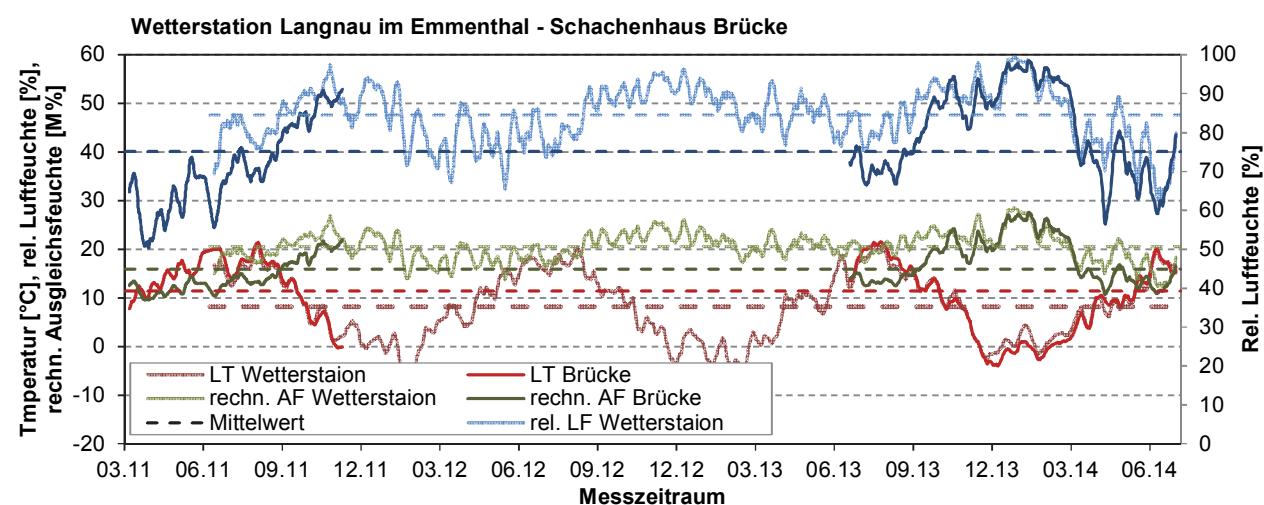
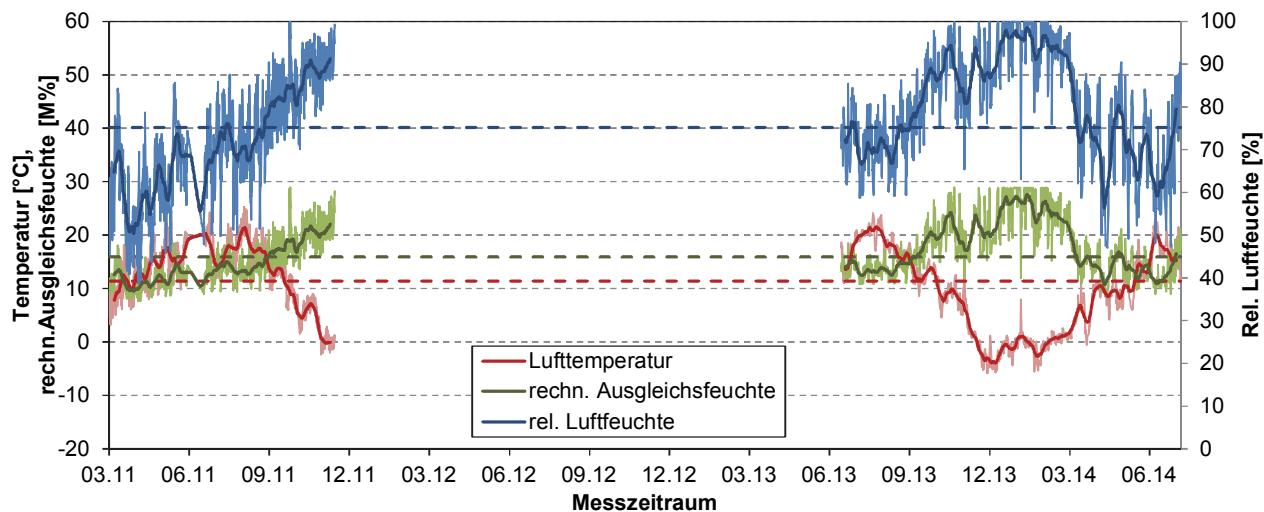
A.4.4 Brücke Muothatal



A.4.5 Brücke Obermatt



A.4.6 Brücke Schachenhaus



Anhang B: Experimentelle Untersuchungen

B.1 Messpositionen und Messgrößen blockverleimter Brettschichtholzkörper

Tabelle 1 4: Messpositionen und Messgrößen

Name	Position			Messgröße
	T [mm]	R [mm]	L [mm]	
R20	375	5/35	330	Holzfeuchte, Temperatur, Dehnung
R60	375	45/75	330	Holzfeuchte, Temperatur, Dehnung
R100	375	85/115	330	Holzfeuchte
R140	375	125/155	330	Holzfeuchte, Temperatur, Dehnung
R220	375	205/235	330	Holzfeuchte, Dehnung
R300	375	285/315	330	Holzfeuchte
R400	375	405/435	330	Holzfeuchte, Temperatur, Dehnung
T15	15	405/435	305	Temperatur, Dehnung
T25	25	405/435	355	Holzfeuchte, Dehnung
T45	45	405/435	305	Holzfeuchte
T70	70	405/435	355	Holzfeuchte, Temperatur
T100	100	405/435	305	Holzfeuchte
T150	150	405/435	355	Holzfeuchte, Temperatur
T225	225	405/435	305	Holzfeuchte, Dehnung
T300	300	405/435	355	Holzfeuchte
TR25/20	25	5/35	305	Holzfeuchte, Temperatur, Dehnung
TR45/60	45	45/75	355	Holzfeuchte
TR70/60	70	45/75	330	Holzfeuchte, Temperatur
TR100/100	100	85/115	330	Holzfeuchte
TR150/140	150	125/155	330	Holzfeuchte, Temperatur
TR255/220	225	205/235	330	Holzfeuchte, Dehnung
TR300/300	300	285/315	330	Holzfeuchte

B.2 Messergebnisse

B.2.1 Klimatisierung Prüfserien

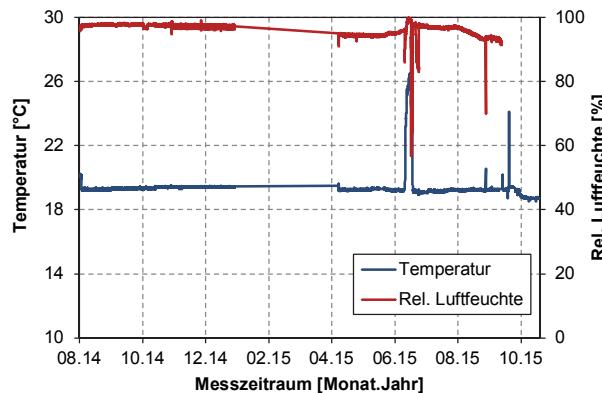


Abb. 59: Klima für 200/200/200 mm und 200/200/800 mm

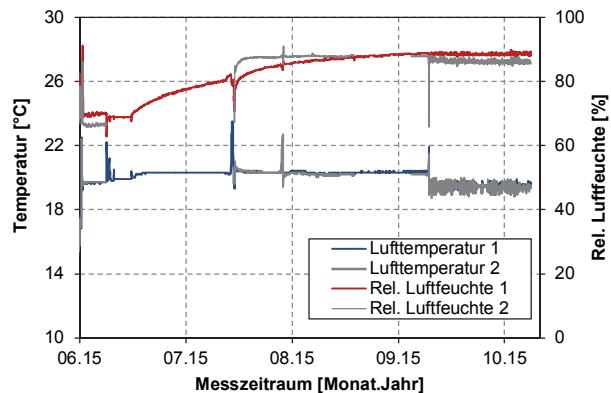


Abb. 60: Klima für 600/600/800 mm

B.2.2 Ergebnisse Darrproben

Longitudinal Differenz zwischen Messmethode und Darrprobe von $\varnothing +3.3\text{ M\%}$

Messtiefe [mm] Messsonde/Darrprobe	-/10	25/30	45/50	75/70	100/90	100/110	125/130	155/150	175/170	-/190
Mittelwert Messtag 435	-	20.4	20.2	20.1	20.0	20.0	20.1	20.2	20.4	-
Darrprobe Messtag 435	22.3	23.3	23.4	23.5	23.5	23.6	23.4	23.4	23.5	22.6

Radial Differenz zwischen Messmethode und Darrprobe von $\varnothing +3.7\text{ M\%}$

Messtiefe [mm] Messsonde/Darrprobe	-/10	25/30	45/50	75/70	100/90	100/110	125/130	155/150	175/170	-/190
Mittelwert Messtag 468	-	19.2	18.5	18.2	17.8	17.8	18.2	18.5	19.2	-
Darrprobe Messtag 468	24.13	23.05	22.49	21.25	21.19	21.29	22.16	21.95	22.48	23.31

Tangential Differenz zwischen Messmethode und Darrprobe von $\varnothing +4.9\text{ M\%}$

Messtiefe [mm] Messsonde/Darrprobe	-/10	25/30	45/50	75/70	100/90	100/110	125/130	155/150	175/170	-/190
Mittelwert Messtag 468	-									-
Darrprobe Messtag 468	23.36	23.10	22.65	22.45	22.45	22.51	22.63	22.40	22.98	23.11

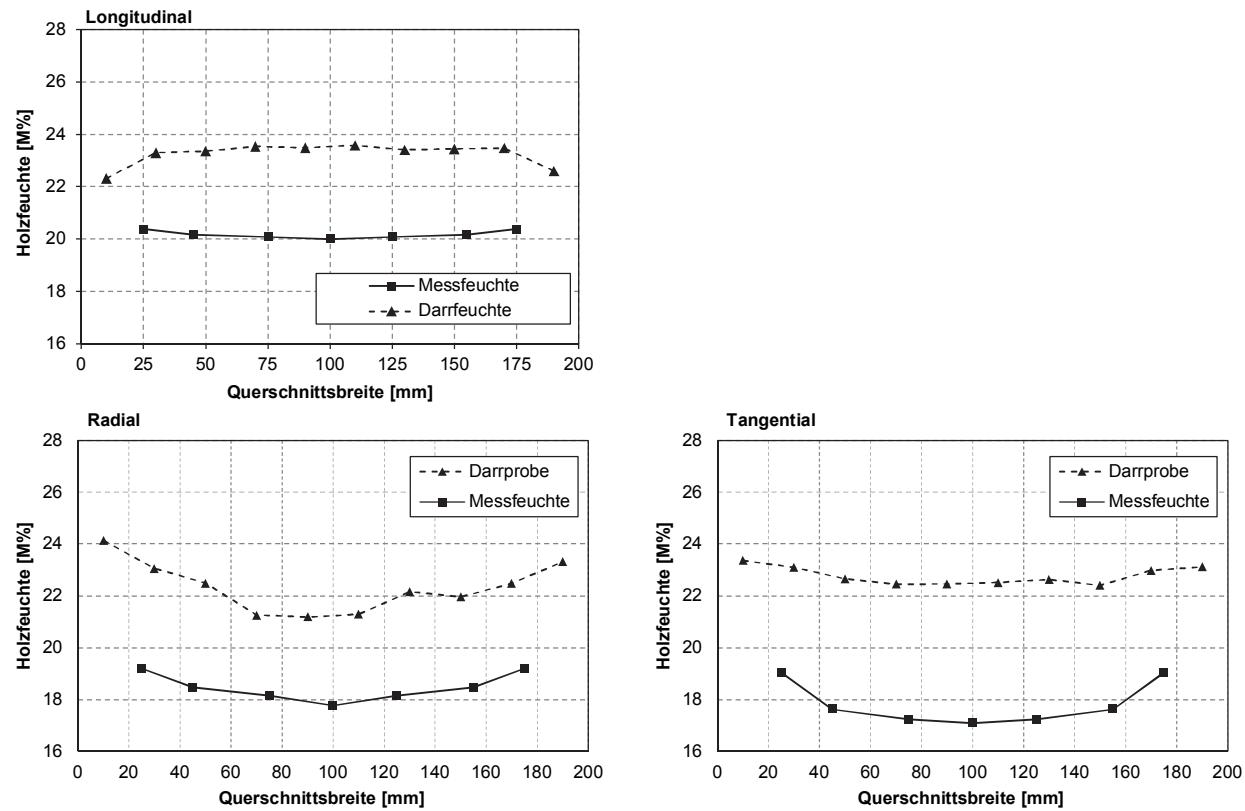


Abb. 61: Messergebnisse zum Zeitpunkt der Darrprobe

B.2.3 Entwicklung Holzfeuchte je Messtiefe und Materialrichtung, 200/200/200 mm

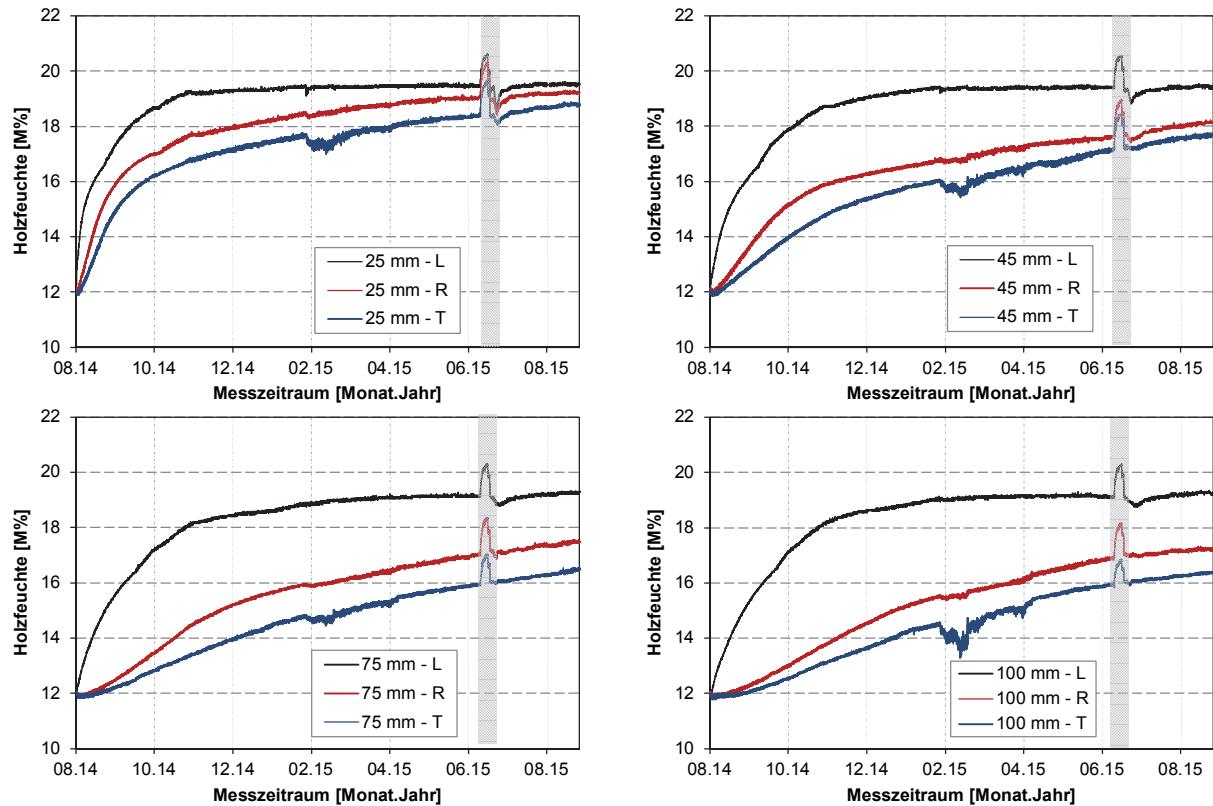


Abb. 62: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe

B.2.4 Entwicklung Holzfeuchte je Messtiefe und Materialrichtung, 200/200/800 mm

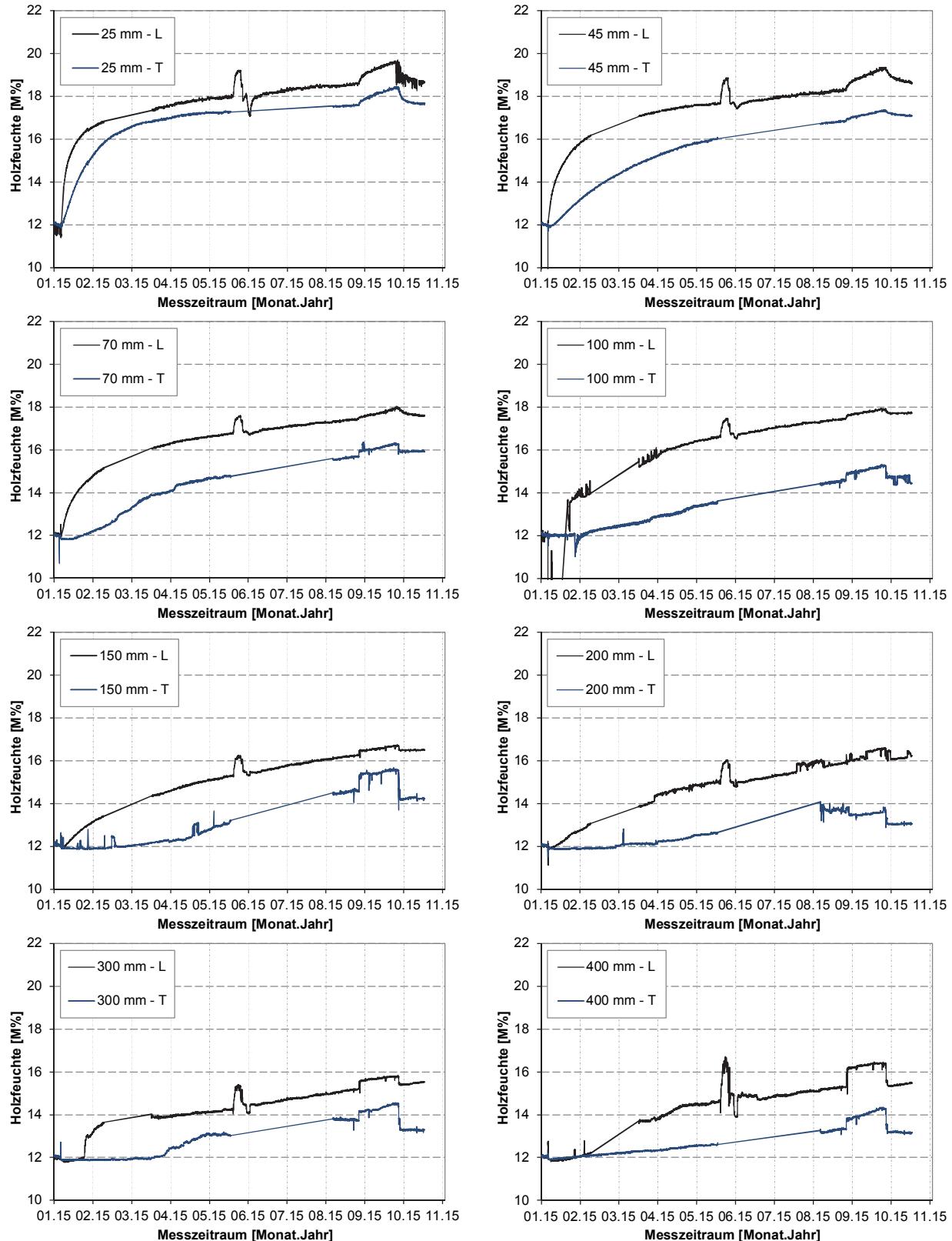


Abb. 63: Vergleich der zeitlichen Entwicklung in den drei Materialachsen für die jeweilige Messtiefe

B.2.5 Entwicklung Holzfeuchte je Messtiefe und Materialrichtung, 600/600/800 mm

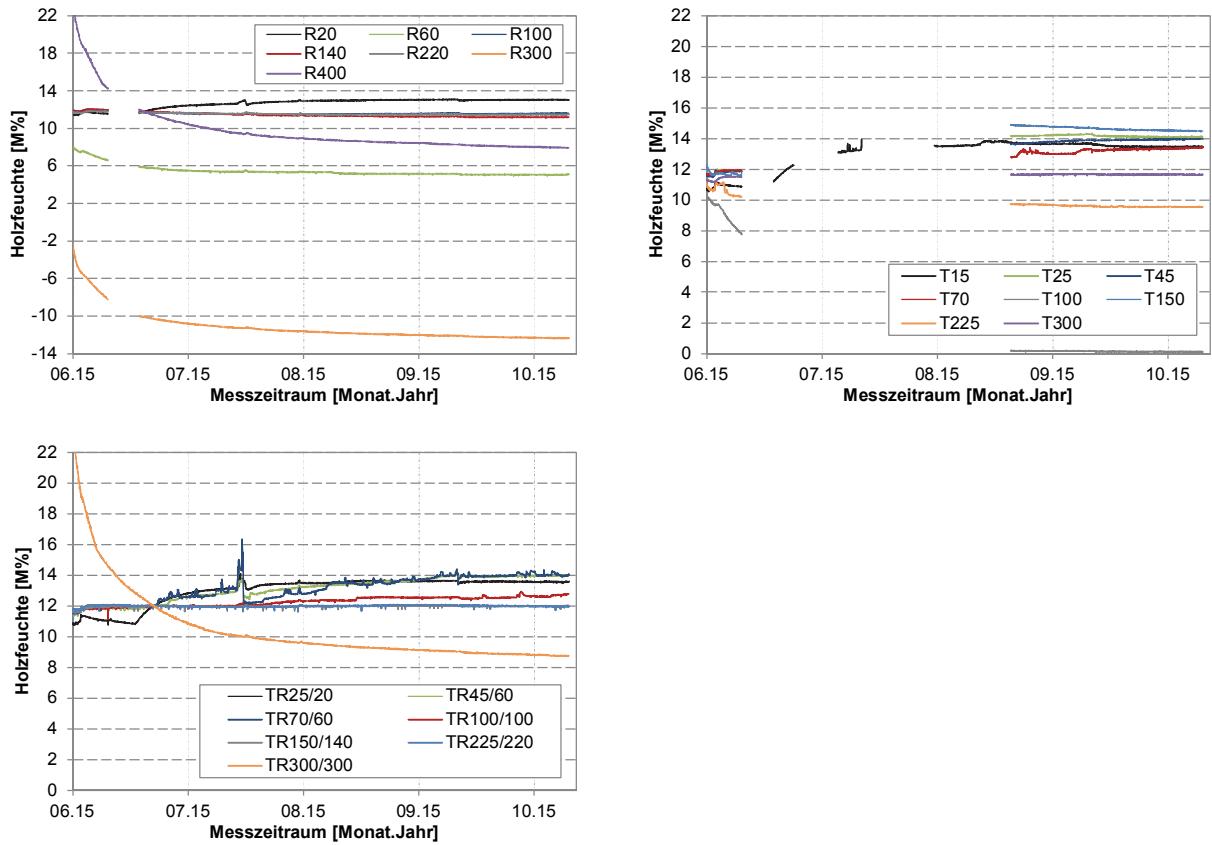


Abb. 64: Holzfeuchte Entwicklung in den drei Messrichtungen

B.2.6 Vergleich 200/200/200 mm und 200/200/800 mm

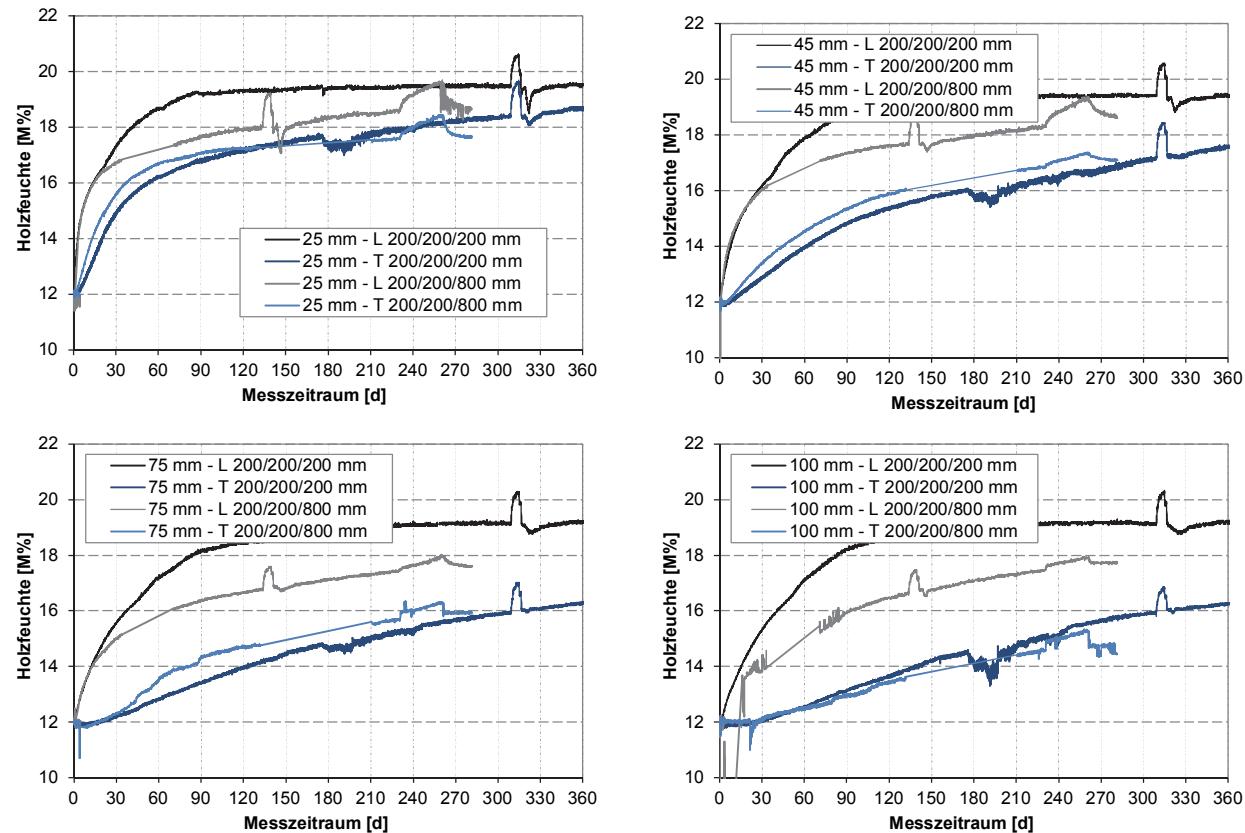


Abb. 65: Vergleich der 200 und 800 mm Prüfserien

Anhang C: Numerische Simulation / WUFI

C.1 Materialkenngrößen WUFI

Tabelle 15: Übersicht der angepassten und verwendeten Materialdaten für die Nutzung in WUFI®

	No-T2 Scandinavian spruce trans- verse direction	NoeRT12 Longitudinale Richtung	NoeRT13 Radiale Richtung	NoeRT14 Tangentiale Richtung
Rohdichte	390 kg/m ³	390 kg/m ³	390 kg/m ³	390 kg/m ³
Porosität	0.75 m ³ /m ³	0.75 m ³ /m ³	0.75 m ³ /m ³	0.75 m ³ /m ³
Wärmekapazität, trocken	1600 J/kgK	1600 J/kgK	1600 J/kgK	1600 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10°C	0.13 W/mK	0.13 W/mK	0.13 W/mK	0.13 W/mK
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	108	0.135	13.86	17.63
Bezugsfeuchtegehalt	80 kg/m ³	80 kg/m ³	80 kg/m ³	80 kg/m ³
Freie Wassersättigung	600 kg/m ³	600 kg/m ³	600 kg/m ³	600 kg/m ³
Wasseraufnahmekoeffizient	- kg/m ² s ^{0.5}	- kg/m ² s ^{0.5}	- kg/m ² s ^{0.5}	- kg/m ² s ^{0.5}
Trocknungsfaktor	10	10	10	10
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	1.3 %/M.-%	1.3 %/M.-%	1.3 %/M.-%	1.3 %/M.-%
Typ. Einbaufeuchte	- kg/m ³	- kg/m ³	- kg/m ³	- kg/m ³
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temperatur	0.0002 W/mK ²	0.0002 W/mK ²	0.0002 W/mK ²	0.0002 W/mK ²
Wärmeleitfähigkeit, Bemessungswert	- W/mK	- W/mK	- W/mK	- W/mK

C.2 Anwendungsbeispiel Brücke Horen

C.2.1 Messstellen der Brücke Horen

Tabelle 16: Messstellen

Messstellen-name	Positionsbeschreibung		Longitudinale Richtung [mm]	Tangentiale Richtung [mm]	Radiale Richtung [mm]
E_I_1	Stirnseite	innenliegend	400	750	50
E_I_2	Stirnseite	Innenliegend	400	750	200
E_I_3	Stirnseite	Innenliegend	600	750	540
E_I_4	Stirnseite	Innenliegend	400	750	200
E_I_5	Stirnseite	Innenliegend	400	750	50
E_O_1	Stirnseite	oberflächennah	400	210	50
E_O_2	Stirnseite	oberflächennah	400	210	200
E_O_3	Stirnseite	oberflächennah	600	210	540
E_O_4	Stirnseite	oberflächennah	400	210	200
E_O_5	Stirnseite	oberflächennah	400	210	50
M_I_1	Trägermitte	Innenliegend	14500	750	50
M_I_2	Trägermitte	Innenliegend	14000	750	200
M_I_3	Trägermitte	Innenliegend	13500	750	540
M_I_4	Trägermitte	Innenliegend	14000	750	200
M_I_5	Trägermitte	innenliegend	14500	750	50
M_O_1	Trägermitte	oberflächennah	14500	210	50
M_O_2	Trägermitte	oberflächennah	14000	210	200
M_O_3	Trägermitte	oberflächennah	13500	210	540
M_O_4	Trägermitte	oberflächennah	14000	210	200
M_O_5	Trägermitte	oberflächennah	14500	210	50

C.2.2 Numerisches Simulationsergebnis für Brücke Horen

Tabelle 17 : Verwendetes Offset für den besseren Vergleich der numerischen Simulation mit den Messergebnissen

Messstelle/ Position	1	2	3	4	5
E-I	0.7	-0.2	0	0	0.3
E-O	-0.4	-0.2	0	0.1	0.2
M-I	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4
M-O	0.5	0.4	0.2	0.1	-1.4

