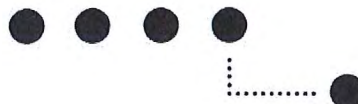



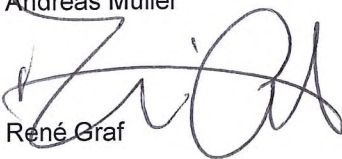
Holzfeuchte-Langzeitmessung

Langzeitmessung der Holzfeuchte und
Dimensionsänderung an Brücken aus
blockverleimten Brettschichtholz

Forschungsbericht

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau



Bericht Nr.	2775-SB-01
Auftrag Nr.	2775.DHB (BAFU 2009.11)
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	22.10.2012
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Wald Herr Werner Riegger 3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Abteilung F+E, Holz- und Verbundbau Soothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel +41 (0)32 344 0 341 www.ahb.bfh.ch
Verfasser	Bettina Franke, Andreas Müller, Mareike Vogel, Thomas Tannert
Projektverantwortlicher	 Andreas Müller
Abteilungsleiter	 René Graf

ABSTRACT

Viele Brückentragwerke in Holz erfordern aufgrund der gewünschten und teilweise notwendigen geringen Bauhöhe sehr breite Träger für die Konstruktion. Die Breite von Brettschichtholz ist herstellungstechnisch begrenzt, so dass es erforderlich ist, mehrere Träger nebeneinander zu verkleben. Dieses Verfahren wird als Blockverleimung bezeichnet. Die Vorteile dieser Bauweise liegen neben dem kompakten Aufbau unter anderem in der freien Formgebung und der einfachen Wartung.

Blockverleimte Brettschichtholzträger in Brückenkonstruktionen unterliegen dem Aussenklima. Es kommt somit zu einer Änderung der Holzfeuchte, welche aufgrund der grossen Querschnitte und der Klebstoffugen in unterschiedlichen Querschnittstiefen mit verschiedenen Geschwindigkeiten stattfindet. Besonders bei offenen Fahrbahnübergängen kommt es im Bereich des Stirnholzes zu grösseren Holzfeuchtegefällen. Die unterschiedliche Holzfeuchteverteilung im Querschnitt führt zu ungleichem Schwind- und Quellverhalten innerhalb des Querschnitts, welches wiederum innere Spannungen im Querschnitt hervorruft.

Im Rahmen des BAFU Projekts „Langzeitmessung an Brücken aus blockverleimtem Brettschichtholz“ werden die Holzfeuchteänderungen in blockverleimten Brettschichtholz sowohl im Labor wie auch in Brücken gemessen. Dafür werden moderne Mess- und Datenübertragungssysteme eingesetzt. Im Labor werden zusätzlich innere und äussere Dimensionsänderung gemessen, um entstehende innere Spannungen abzuschätzen.

Zwei Brücken mit blockverleimten Brettschichtholz wurden vor der Montage mit Feuchtesensoren ausgestattet, bei einer dritten und vierten Brücke aus Holz wurden Sensoren nachträglich

angebracht. Ein Remote-Datenübertragungssystem ermöglicht die Überwachung einer Brücke mittels eines Web-Interfaces. Das Projekt ist formell abgeschlossen, jedoch werden derzeit die Brücken weiterhin überwacht.

Innerhalb des Forschungsprojektes konnte die erforderliche Messtechnik zur Langzeitüberwachung der Holzfeuchteentwicklung präzisiert werden. Die für die Überwachung von Brückentragwerken in Holz erarbeiteten und verwendeten Messstellenpläne zeigen keine Einschränkungen für die Durchführung der Messungen. Die Applikation der Messsensoren ist sowohl während der Produktion oder auch nachträglich an nahezu beliebiger Stelle möglich. Die im Projekt realisierte Online-Überwachung einer Brücke mittels Web-Interface arbeitet zuverlässig. Das rechtzeitige Erkennen von extremen Holzfeuchteänderungen wird hierdurch positiv unterstützt und eventuell hiermit verbundenen Schäden können frühzeitig begegnet werden.

Die gewonnenen Messergebnisse zur Holzfeuchteentwicklung an Brückenträgern konnten durch die im Labor durchgeführten Messungen ergänzt werden. Die innerhalb einer extrem abgebildeten Aufweichungsphase des Prüfkörpers gewonnenen Ergebnisse belegen erste, bisher nur formal bekannte, Entwicklungsstufen über den Querschnitt. In weiterführenden Forschungsbestrebungen sollte aufbauend auf diesen Ergebnissen die Messstellendichte erhöht und die Messtechnik sensibilisiert werden, um detaillierte und generelle Aussagen erarbeiten zu können. Die im Projekt erreichten ersten tendenziellen Abschätzungen sollten für einen zukünftig vermehrten Einsatz von blockverleimten Holz in Brücken und damit neue Absatzmöglichkeiten für die Schweizer Forst- und Holzindustrie vertieft werden.

Keywords: Langzeitmessung, Holzfeuchte, Brücken, Brettschichtholz

INHALTSÜBERSICHT

1	AUSGANGSLAGE	8
2	ZIELSETZUNGEN UND ÜBERARBEITETER FORSCHUNGSPLAN	9
3	PROJEKTBETEILIGTE	10
4	LABORUNTERSUCHUNGEN	11
5	HAUPTTEIL	25
6	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	38
7	BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT	39
8	VERZEICHNISSE	40
	ANHANG A: LABORVERSUCHE	43
	ANHANG B: PUBLIKATION IM RAHMEN DES PROJEKTES	54

INHALTSVERZEICHNIS

1	AUSGANGSLAGE	8
1.1	Problembeschreibung	8
1.2	Ziele der geplanten Forschung.....	8
1.3	Bedeutung des Projektes für Praxis und Forschung.....	9
2	ZIELSETZUNGEN UND ÜBERARBEITETER FORSCHUNGSPLAN	9
2.1	Arbeitspaket 1: Messungen an Prüfkörpern im Labor.....	9
2.2	Arbeitspaket 2: Messungen an gebauten Brücken	9
2.3	Arbeitspaket 3: Wissensvermittlung	10
2.4	Projektlaufzeit	10
3	PROJEKTBETEILIGTE	10
4	LABORUNTERSUCHUNGEN	11
4.1	Voruntersuchungen	11
4.1.1	Allgemeines	11
4.1.2	Klimamessung	11
4.1.3	Holzfeuchtemessung	11
4.1.4	Rissentstehung	12
4.1.5	Dehnungsmessung	12
4.1.6	Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen	13
4.2	Hauptuntersuchungen an blockverleimtem BS-Holzprobekörper	13
4.2.1	Einführung und Prüfkörper	13
4.2.2	Messgrößen, Messtechnik, Messplan	14
4.2.2.1	Umgebungsklima.....	14
4.2.2.2	Holzfeuchtemessung	14
4.2.2.3	Holztemperatur	15
4.2.2.4	Dimensionsänderung innen.....	15
4.2.2.5	Dimensionsänderung aussen.....	16
4.2.2.6	Rissentwicklung.....	16
4.2.3	Darlegung der Messergebnisse	17
4.2.3.1	Messzeitraum	17
4.2.3.2	Holzfeuchte.....	18
4.2.3.3	Holztemperatur	22
4.2.3.4	Dimensionsänderung - Aussenseiten	22
4.2.3.5	Dimensionsänderung - Querschnittsinnere.....	23
4.3	Diskussion und Zusammenfassung der Laboruntersuchungen.....	24
5	HAUPTTEIL	25
5.1	Brücke I: Überführung Horen	25
5.1.1	Grundlagen und eingesetzte Messtechnik	25
5.1.2	Messergebnisse und deren Diskussion	26
5.2	Brücke II: Muotathal	28
5.2.1	Grundlagen und eingesetzte Messtechnik	28
5.2.2	Messergebnisse und deren Diskussion	29
5.3	Brücke III: Obermatt	31
5.3.1	Grundlagen und eingesetzte Messtechnik	31
5.3.2	Messergebnisse und deren Diskussion	33

5.4	Brücke IV: Schachenhaus.....	35
5.4.1	Generelles und eingesetzte Messtechnik	35
5.4.2	Messergebnisse und deren Diskussion	36
5.5	Zusammenfassung zu den Brückenmessungen.....	37
6	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	38
6.1	Resümee.....	38
6.2	Ausblick.....	39
7	BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT	39
7.1	Umfang des Berichts.....	39
8	VERZEICHNISSE	40
8.1	Literaturverzeichnis.....	40
8.2	Abbildungsverzeichnis	41
8.3	Tabellenverzeichnisse	42
ANHANG A: LABORVERSUCHE		43
A.1	Messpositionen und Messplan.....	43
A.2	Ergebnisse zu den Labormessungen	46
A.2.1	Holzfeuchtemessung	46
A.2.2	Holzfeuchteentwicklung in tangentialer Richtung	48
A.2.3	Holzfeuchteentwicklung in radiale Richtung	50
A.2.4	Holzfeuchteentwicklung in longitudinale Richtung.....	51
A.2.5	Holztemperatur.....	52
A.2.6	Dimensionsänderung - Aussenseiten	52
A.2.7	Dimensionsänderung - Querschnittsinnere	52
ANHANG B: PUBLIKATION IM RAHMEN DES PROJEKTES		54
B.1	Veröffentlichte Beiträge.....	54
B.2	Vorgesehene Beiträge	54

1 AUSGANGSLAGE

1.1 Problembeschreibung

Brettschichtholz (BSH) hat sich im Ingenieurholzbau bei nahezu allen grösseren Konstruktionen durchgesetzt. Aus fertigungstechnischen und materialspezifischen Gründen ist die Breite der Einzelbretter für BSH-Träger jedoch begrenzt. Eine Weiterführung der Technologie besteht darin, mehrere BSH-Träger nebeneinander zu einem Block zu verkleben. Vorteile dieser Bauweise sind vielfältig und liegen unter anderem im kompakten Aufbau, welcher eine geringe Konstruktionshöhe ermöglicht.

Die Holzfeuchte für die Herstellung von Brettschichtholz liegt produktionsbedingt bei ca. 10 - 12 %. Da Brettschichtholz beim Einsatz in Brücken dem Aussenklima ausgesetzt ist, kommt es zum Ausgleich der Holzfeuchte auf ca. 15 – 20 %. Aufgrund der grossen Querschnittabmessungen und der Klebstoff-fugen findet in blockverleimten Brettschichtholz der Holzfeuchteausgleich in unterschiedlichen Bereichen mit verschiedenen Geschwindigkeiten statt und ein komplexes Schwind- und Quellverhalten innerhalb des Bauteils entsteht. Wird dieses Verhalten aufgrund der Blockverleimung behindert, können innere Spannungen, sogenannte moisture-induced-stresses, entstehen, welche die Tragfähigkeit beeinträchtigen können.

Bei Fahrbahnübergängen werden Bewegungen von Brücken ausgeglichen, welche durch die Wärmeausdehnung verschiedener Materialien und das Quellen und Schwinden von Holz auftreten. Bei offenen Fahrbahnübergängen kommt es im Bereich des Stirnholzes (Transport parallel zur Faser) zu grossen Holzfeuchteschwankungen. Von Seiten der Prüfsachverständigen werden deshalb Bedenken geäussert, dass sich hier grosse Dimensionsänderungen im Querschnitt ergeben, die längerfristig zu Schäden führen können. Die Untersuchungen im Rahmen des Projekts sollen helfen, weiterführende Erkenntnisse zu gewinnen.

1.2 Ziele der geplanten Forschung

Ausführliche Informationen über das Verhalten der Holzfeuchte in blockverleimten Brettschichtholz sowie deren Auswirkungen auf die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit liegen für langfristige Zeiträume mit verschiedenen klimatischen Einflüssen kaum vor. Bisher werden überwiegend Abschätzungen aufgrund einfacher Annahmen zum Langzeitverhalten der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter wechselnden klimatischen Einflüssen sowohl im Hoch- wie auch im Brückenbau getroffen.

Im Rahmen des Projektes ist es das Ziel, Aussagen zum Langzeitverhalten von Holz in Bezug zur resultierenden Holzfeuchte aus dem Umgebungsklima zu treffen. Der Schwerpunkt liegt hierbei bei blockverleimten Brettschichtholz und insbesondere beim Einsatz dieser Bauteile in Brücken. Die Langzeitmessung der Holzfeuchte respektive die Querschnittsänderungen infolge der wechselnden Holzfeuchte bei Bauteilen im Aussenklima sollen mit geeigneter Messtechnik sowie Monitoring- und Datenübertragungssystemen erfolgen. Die gewonnenen Ergebnisse können im Anschluss für erste Aussagen über das Spannungs- und Dehnungsverhalten von Holz unter wechselnder Holzfeuchte genutzt werden.

Die Ziele der geplanten Forschung können somit wie folgt zusammengefasst werden:

- Erarbeitung und Aufbau geeigneter Mess- und Datenübertragungssysteme zur Messung der Holzfeuchte- und Dimensionsänderungen von blockverleimten Brettschichtholzquerschnitten
- Messung der Holzfeuchte- und Dimensionsänderungen in blockverleimten Brettschichtholzquerschnitten an Laborprüfkörpern und in-situ an Brücken
- Erste Abschätzung zum Langzeit-Spannungs- und Dehnungsverhalten des blockverleimten Brettschichtholzes in Bezug zur Holzfeuchte

1.3 Bedeutung des Projektes für Praxis und Forschung

Die gegenwärtige Planungspraxis für blockverleimte BSH-Brücken arbeitet ohne genaue Kenntnisse über das Feuchte- und damit Dimensionsänderungs- und Spannungsverhalten von blockverleimten BSH-Bauteilen. Im Bereich des Fahrbahnüberganges wird mithilfe von konstruktiven Massnahmen oder theoretischen Bemessungsansätzen versucht, eventuell auftretenden Problemen zu begegnen.

Das Projekt wird neue Erkenntnisse zum Langzeitverhalten von blockverleimten BSH-Bauteilen liefern und damit eine bessere Früherkennung von Schäden durch nicht akzeptable Dimensionsänderungen oder Risse durch „moisture-induced-stresses“ ermöglichen. Als Konsequenz werden langfristig gesehen das Vertrauen und die allgemeine Akzeptanz auf Seiten der Prüfeningenieure, der Bauämter und der Investoren in diese zukunftsorientierte Methode steigen. Die Anzahl der Rückbauten von Holzbrücken wird verringert, Sanierungsmassnahmen vermieden und die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Holzbrücken erhöht.

Die Anwendung der erwarteten Erkenntnisse leistet einen wichtigen Beitrag zur langlebigen Nutzung von blockverleimten Holzbrücken. Dadurch ergibt sich ein vermehrter Einsatz von blockverleimtem Brettschichtholz in Brücken und wesentliche Absatzmöglichkeiten für die Schweizer Forst- und Holzindustrie. Mit der Bereitstellung einer wissenschaftlich fundierten Studie zum Langzeitverhalten von blockverleimten Brettschichtholz ist ein erheblich gesteigertes Marktpotential sowohl im Brücken- als auch im Hochbau zu erwarten.

2 ZIELSETZUNGEN UND ÜBERARBEITETER FORSCHUNGSPLAN

Das Projekt gliederte sich in drei Arbeitspakete:

2.1 Arbeitspaket 1: Messungen an Prüfkörpern im Labor

AP1.1: Untersuchung zu geeigneten Messtechniken

Vergleich verschiedener Messgeräte zur Holzfeuchtemessung und Querschnittsänderung in Bezug auf Zuverlässigkeit und Benutzerfreundlichkeit für Langzeitmessungen und Funkübertragung. Besonderes Augenmerk liegt auf geeigneten Techniken zur Einbringung und Isolierung der Messfühler in das Holz und die Notwendigkeit einer Korrektur der Messwerte aufgrund der Temperatur.

AP1.2: Instrumentierung von Prüfkörpern und Durchführen der Messungen

Basierend auf AP1.1 wird ein blockverleimter BSH-Block mit Messgeräten zur Holzfeuchtemessung und Querschnittsänderung bestückt und Messungen in kontrolliertem Klima durchgeführt. Hierbei wird insbesondere die Zuverlässigkeit der Messfühler innerhalb der Blockverleimung geprüft.

AP1.3: Auswertung der Messungen/Ermittlung der „moisture-induced-stresses“

Auswertung der Ergebnisse aus AP1.2 bezüglich des Einflusses des Klimas auf die Ausgleichsfeuchte im Holz und die Dimensionsänderung im Querschnitt. Erste Abschätzungen von „moisture-induced-stresses“ in den untersuchten Querschnitten und deren Auswirkungen auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von blockverleimten BSH-Querschnitten.

2.2 Arbeitspaket 2: Messungen an gebauten Brücken

AP2.1: Festlegen von Messplänen

Basierend auf AP1 werden geeignete Messpläne zur Langzeitüberwachung der Holzfeuchte und der Querschnittsänderung an Brücken mit blockverleimten BSH-Trägern erarbeitet. Dabei wird besonderer Wert auf die Festlegung der relevanten Messstellen gelegt.

AP2.2: Instrumentierung und Monitoring von Brücken I und II

Zwei Brücken mit blockverleimten BSH werden aufbauend auf AP2.1 mit Messsystemen ausgestattet, um die Holzfeuchteänderungen zu messen. Die Datalogger werden manuell ausgelesen.

AP2.3: Instrumentierung und Monitoring von Brücke III

Entsprechend der Erfahrung bei der Instrumentierung der Brücken I und II werden weitere Brücken mit Messsystemen ausgestattet. Der Einsatz einer Monitoringtechnik, die einen Zugang zu den Messdaten mittels Fernabfrage ermöglicht, wird geprüft.

2.3 Arbeitspaket 3: Wissensvermittlung

Die gewonnenen Ergebnisse aus den Messungen an Prüfkörpern im Labor und an gebauten Brücken werden ausgewertet und die Erkenntnisse werden der Öffentlichkeit zugänglich gemacht durch:

- Vorträge auf Fachtagungen und Konferenzen
- Veröffentlichungen in Fachzeitschriften
- Integration in die Ausbildung an der BFH-AHB

2.4 Projektlaufzeit

Das Projekt hat eine Laufzeit von 30 Monaten, der genaue Ablauf ist Abbildung 2-1 zu entnehmen.

	2010												2011												2012							
	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08		
AP 1.1																																
AP 1.2																																
AP 1.3																																
AP 2.1																																
AP 2.2																																
AP 2.3																																
AP 3																																

Abbildung 2-1: Zeitplan für das Forschungsprojekt

3 PROJEKTBETEILIGTE

Das Forschungsprojekt wurde primär von der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau initiiert und bearbeitet. Innerhalb des Projektzeitraumes von 30 Monaten wirkten neben Professor Andreas Müller, Wissenschaftliche Mitarbeiter und auch Praktikanten der Einheit Holz- und Verbundbau an der erfolgreichen Umsetzung mit.

Das Projekt wurde parallel von den folgenden Projektpartnern aus der Wirtschaft aktiv unterstützt.

- Makiol + Wiederkehr, Dipl. Holzbau-Ingenieure HTL/SISH, Beinwil am See
- Hüsler Holzleimbau Ag, Bremgarten
- Tiefbauamt des Kantons Bern

4 LABORUNTERSUCHUNGEN

4.1 Voruntersuchungen

4.1.1 Allgemeines

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde geeignete Messtechnik zur Erfassung des Klimas, der Holzfeuchte sowie von resultierenden Rissen und Dehnungen infolge klimatischer Einflüsse an kleinformatigen Prüfkörpern untersucht. Weiterführend wurden Erkenntnisse aus vorrangegangenen Forschungsprojekten angewandt, wie zum Beispiel für die Erfassung von Rissentwicklungen, welche bereits an Brückenträgern mit praxisrelevanten Abmessungen eingesetzt wurden.

4.1.2 Klimamessung

Für die Klimamessungen steht eine grosse Anzahl von Messsystemen auf dem Markt zur Verfügung. Zur Erfassung des Klimas respektive der Messung der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur wurden hierzu das Messgerät Hygrofox der Firma Scanntronik verwendet. Der Messbereich für die relative Luftfeuchte ist von 0 % bis 99 % und für die Lufttemperatur von -10 °C bis 50 °C, Scanntronik (2012). Mit einer Messwerterfassung aller 3 Stunden sind mit dem internen Gerätespeicher Langzeitmessung von 250 Tagen möglich. Die Messgerätespezifikation ist zur späteren Erfassung aller jahreszeitlichen Klimaperioden von Brücken ausreichend.

4.1.3 Holzfeuchtemessung

Der Feuchtegehalt im Holz kann direkt nur mittels der Darmmethode durch Trocknung von Holzproben bis zur vollständigen Feuchteextraktion exakt bestimmt werden. Mit indirekten Methoden hingegen, z. B. der elektrischen Widerstandsmessung, wird der Holzfeuchtegehalt aus dem Zusammenhang zu einer messbaren physikalischen Eigenschaft des Holzes abgeleitet. Da für die Langzeitmessung der Holzfeuchte an bestehenden Tragwerken Holzproben für die exakte Darmmethode nur bedingt gewonnen werden können, wird sich auf die elektrische Widerstandsmessung von Holz konzentriert, Birschke (2007), Evans et al. (2006), Kießl & Steinbach (2006). Die Widerstandsmethode ist nahezu zerstörungsfrei und in den Fachkreisen eine anerkannte Messmethode. Das in Niemz (2005) enthaltene von Keylwerth & Nock (1956) erarbeitete Diagramm enthält die Beziehung des elektrischen Widerstandes zu dem Feuchtegehalt im Holz.

Wie bereits erläutert, wurde für die vorgesehenen Langzeitmessungen die indirekte Holzfeuchtemessung, die Widerstandsmethode, verwendet. Hierzu wurde ebenfalls ein Messgeräte der Firma Scanntronik, der Materialfox bzw. das Gigamodul, verwendet (Abbildung 4-1 links). Als Sensoren im Holz wurden isolierte Chromstahl-Schrauben, welche im Abstand von 32 mm quer zur Faser ins Holz eingedreht wurden, verwendet. Die notwendige Isolierung der Messsensoren wurde anhand von passgenauen Schrumpfschläuchen sichergestellt (Abbildung 4-1 rechts). Das Messgerät Materialfox/Gigamodul erfasst 8 Sensoren parallel und bietet einen sehr grossen Messbereich von unter 10

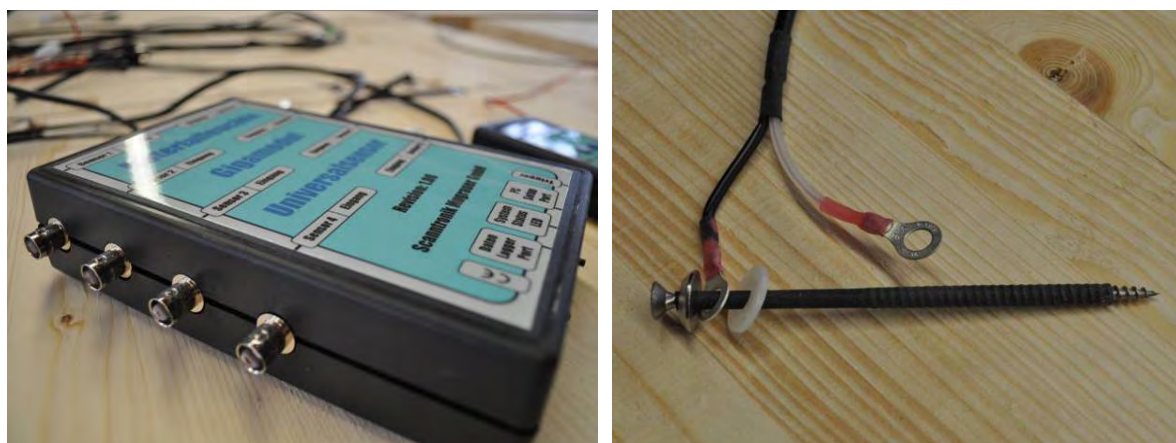


Abbildung 4-1: Holzfeuchtemesstechnik (links) und Holzfeuchte-Sensoren (rechts)

kOhm bis über 100 GOhm, Scanntronik (2012). Dies entspricht Ausgleichsfeuchten im Holz von unter 6 % bis zu über 90 %. Das Messintervall kann individuell eingestellt werden und entsprechend der gewählten internen Speichergrösse sind Langzeitmessungen sicher erfassbar.

4.1.4 Rissentstehung

In einem vorangegangenen interdisziplinären Forschungsprojekt an der Berner Fachhochschule zwischen den Departementen Technik und Informatik und Architektur, Holz und Bau wurden Sensoren zur Erfassung von Rissen entwickelt, s. Abbildung 4-2. Diese Messsensoren bestehen aus Epoxydharzkleber auf Silberbasis (Produkt LOCTITE® 3888), welcher als Bahn direkt auf der Holzoberfläche appliziert wird und an ein Widerstandsmessgerät angeschlossen wird. Bei einer Rissentwicklung auf der Holzoberfläche reisst die Klebstoffbahn und der Stromfluss wird unterbrochen. Die Wahl der Bahnstärke hat Einfluss auf die Empfindlichkeit und damit auf die minimale Rissbreite, bei der der Stromfluss unterbrochen wird. Der Vorteil dieser Messtechnik liegt in der variablen Anpassung an die vorhandenen Querschnittsdimensionen, es stehen hier prinzipiell keine Einschränkungen wie bei herkömmlichen Messtechniken entgegen.



Abbildung 4-2: Applizierte Riss-Sensoren bei einem Vorversuch an einer Brücke

4.1.5 Dehnungsmessung

Zur Beurteilung der Auswirkung wechselnden Klimaeinflüsse auf das Tragverhalten von Holz ist es wichtig neben der äusseren Querschnittsänderung auch die Dehnung innerhalb des Querschnittes zu erfassen. Hierzu werden Dehnungsmessstreifen (DMS) als eine gängige Standardlösung in der experimentellen Mechanik gesehen. Im Hinblick auf Langzeitmessungen in Holz stehen hier aber die erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Querdehnungen, zusätzlich erforderliche Temperaturkompensationen, die geringere Langzeitstabilität sowie geringe Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit der Anwendung von DMS entgegen.

Messsensoren zur Dehnungsmessung die auf der Glasfasertechnik basieren, zeigen demgegenüber positive Vorteile. Zur Messung der Dehnung wurden an kleinformatigen Prüfkörpern Glasfasern der Firma Fibersensing geprüft. In Abbildung 4-3 ist die Positionierung eines Fiber-Bragg-Grating (FBG) - Sensors im Brettschichtholzquerschnitt vor und nach der Blockverleimung gezeigt. Die Glasfasertechnik führt zu keinen Einschränkungen in der Messstrecke und ist unempfindlich gegenüber Querdehnungen. Für eine zuverlässige Langzeitmessung von Dehnungen innerhalb des Querschnittes ist es wichtig, dass der FBG-Sensor langfristig stabil gelagert ist. Die Anwendung eines PU-Klebstoffes hat sich als ausreichend steif in den Vorversuchen herausgestellt. Der zu Beginn genutzte Epoxyd-Harz-Klebstoff hat sich als zu steif erwiesen, um die im Holz auftretenden Dehnungen zu erfassen.

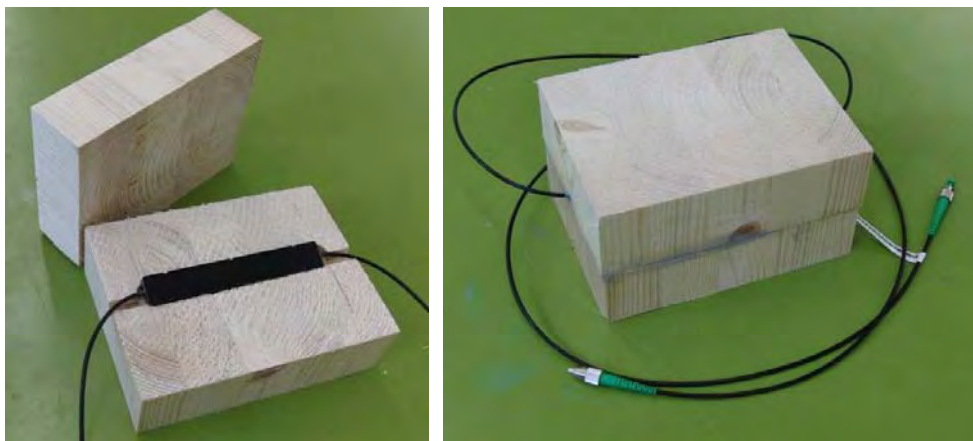


Abbildung 4-3: Probekörper mit Glasfaser-Dehnungs-Sensoren, während der Herstellung (links) und nach der Blockverleimung (rechts)

4.1.6 Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen

Die an kleinformatischen Prüfkörpern durchgeführten Messungen der Ausgleichsfeuchte im Holz und die parallel durchgeführte Messung des Umgebungsklima führten mit der gewählten Messtechnik der Firma Scantronic zu zuverlässigen Ergebnissen.

Der Einsatz von FBG-Sensoren der Firma Fibersensing zur Erfassung des Dehnungsverhaltens von Holz innerhalb des Querschnittes bestätigte die Erwartungen innerhalb der Voruntersuchungen und stellt eine gute Alternative zur herkömmlichen Messtechnik, den Dehnungsmessstreifen, dar.

4.2 Hauptuntersuchungen an blockverleimtem BS-Holzprobekörper

4.2.1 Einführung und Prüfkörper

Die aus den Voruntersuchungen positiv gewonnenen Erkenntnisse wurden an einem blockverleimten Brett-schichtholz-Probekörper konsequent umgesetzt. Die Querschnittsabmessungen mit einer Breite/Höhe/Länge von 800/800/1000 mm beschreiben einen praxisrelevanten Trägerquerschnitt für den Brückenbau. Der Blockquerschnitt ist aus 4 einzelnen Brett-schichtholzträgern mit den Abmessungen 200/800/1000 mm zusammengesetzt. Die BSH-Träger wurden mit dem Klebstoff Melanin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF) hergestellt und vom Industriepartner zur Verfügung gestellt. Die BSH-Träger

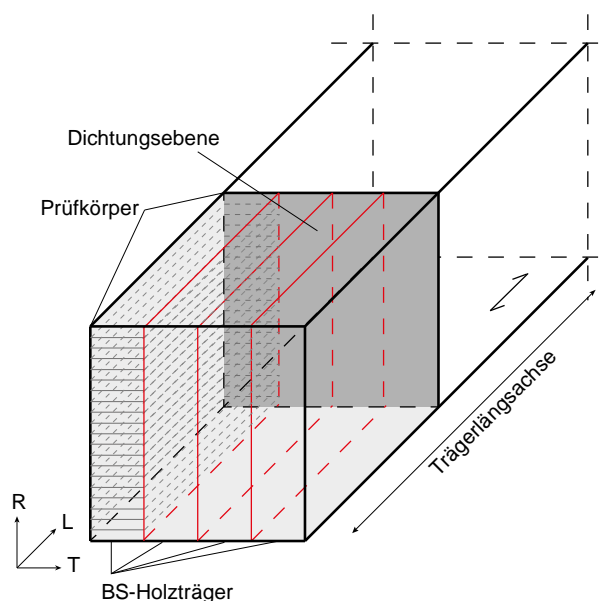


Abbildung 4-4: Prinzipielle Darstellung des definierten Prüfkörpers von einem Brückenträger

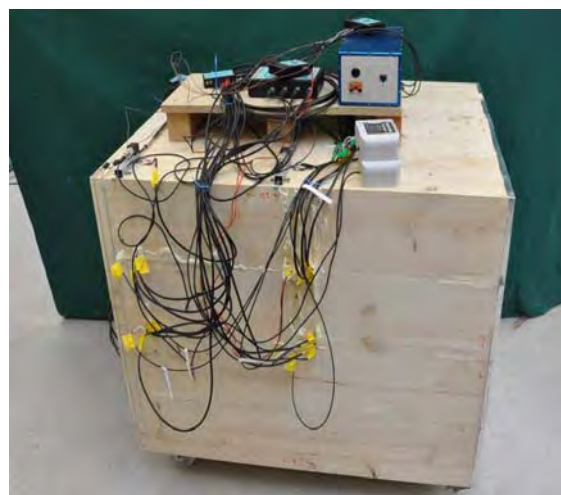


Abbildung 4-5: Fertiggestellter Prüfkörper mit installierter Messtechnik

wurden nach der Lieferung im Normklima (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) gelagert. Nach der Applikation der innenliegenden Messtechnik wurden die einzelnen BSH-Träger mit dem Polyurethane-Klebstoff „PURBOND HB S709“ zum Blockprüfkörper verklebt.

Zur realistischen Abbildung eines Trägerendes von einem Brückentragwerk wurde eine Stirnseite des Prüfkörpers mit einer dauerhaften Dichtung abgedeckt um einen Feuchteinfluss von dieser Seite zu unterbinden, vgl. Abbildung 4-4. Ziel war es, mit dem Blockprüfkörper unter kontrollierten Klimaeinflüssen im Labor das korrespondierende Dehnungsverhalten von Holz zu erfassen. Hierzu wurden in unterschiedlichen Tiefen und Ebenen des Querschnittes Messsensoren zur Erfassung der Holzfeuchte und der Dehnungsänderungen appliziert. Der fertiggestellte Prüfkörper mit der integrierten Messtechnik ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Die eingesetzte Messtechnik und der Messstellenplan ist im Abschnitt 4.2.2 und im Anhang A.1 näher erörtert. Die Aktivierung und Aufzeichnung der Messdaten erfolgte direkt vor der Platzierung des Prüfkörpers in der Klimakammer.

4.2.2 Messgrößen, Messtechnik, Messplan

4.2.2.1 Umgebungsklima

Zur Erfassung des Umgebungsklimas, mit den Messgrößen Lufttemperatur und Luftfeuchte, wurde das Messgerät Hygrofox der Firma Scantronik eingesetzt. Der elektronische Hygrothermograph sichert einen Messbereich von 0 % bis 99 % für die relative Luftfeuchte und von -10 °C bis 50 °C für die Lufttemperatur, Scantronik (2012).

4.2.2.2 Holzfeuchtemessung

Zur Erfassung des unterschiedlichen Feuchtetransportes im Holz in longitudinaler und radialer/tangentialer Richtung wurden die Messstellen zur direkten Holzfeuchtemessung in insgesamt 6 Gruppen von A bis E unterteilt. Es wurden zwei unterschiedliche Messsysteme der Firma Scantronik eingesetzt, zum einem das Gigamodul in Verbindung mit dem Gerät Thermofox und zum anderem der Multisensor in Verbindung mit dem Gerät Materialfox. Die Zuordnung der Messgeräte zu den individuellen Messstellen ist in Tabelle B-1 im Anhang zusammengefasst.

Die Positionen der Messaufnehmer gliedern sich in die Gruppen A, B und C, D für den Feuchtetransport in radialer/tangentialer Richtung. Die Gruppen sind in Ebenen parallel zur Stirnseite angeordnet, wobei die Gruppen A und B in einer Tiefe von 50 mm und die Gruppen C und D in einer Tiefe von 500 mm gemessen von der offenen Stirnseite liegen, gemäss Abbildung 4-6. In jeder Ebene sind die Messsensoren in zwei parallelen Gruppen in tangentialer Richtung (T) unterteilt. Innerhalb der Gruppe sind die Sensoren stufenweise versetzt und im Abstand von 20, 85, 180, 285, 350 mm von der Prüfkörperoberfläche angeordnet, vgl. Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8.

Zur Erfassung des Feuchtetransportes in longitudinaler Richtung (L) sind die Gruppen E und F im Prüfkörper integriert. In tangentialer Richtung sind die Messsensoren ebenso in zwei parallel laufende Gruppen geordnet, wobei die Sensoren in longitudinaler Richtung jeweils in den Tiefen 20, 50, 100, 200, 500 mm angeordnet sind, siehe Abbildung 4-9.

Zusätzlich zur Holzfeuchtemessung mit der Widerstandsmethode wurde die Sorptionsmethode an der Messstelle F_250_HLF/F_250_HLT angewandt. Hierzu wurde an der genannten Messstelle ein innenliegender und abgeschlossener Hohlraum initiiert, wo die sich, entsprechend der Holzfeuchte des umliegenden Materials, einstellende Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen wurde. Als Messsensor wurde der °C/rF-Stabsensor in Verbindung mit dem Gerät Thermofox der Firma Scantronik verwendet. Die Position der Messstelle ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Die Bestimmung der rechnerischen Ausgleichsfeuchte und somit Holzfeuchte des umliegenden Materials (im Weiteren als Sorptionsisothermenmethode deklariert) erfolgt über die materialspezifischen Sorptionsisothermen nach Keylwerth (1949).

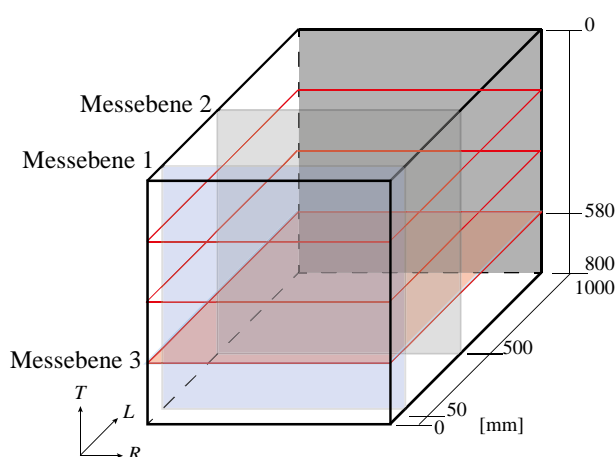


Abbildung 4-6: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene 1, Gruppen A, B

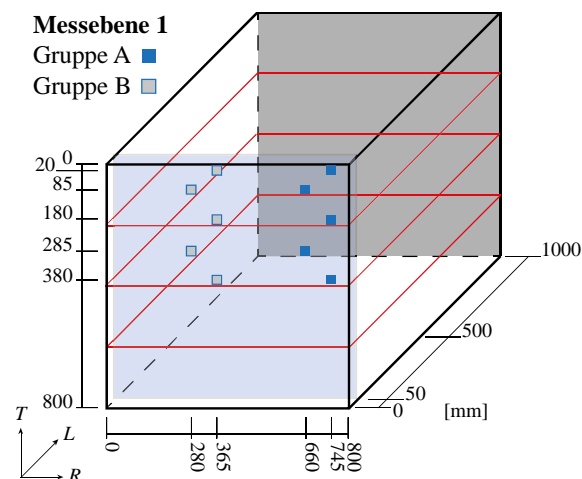


Abbildung 4-7: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene 2, Gruppen C, D

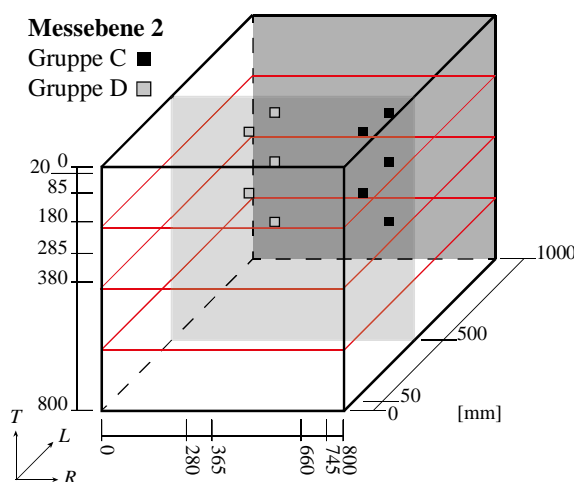


Abbildung 4-8: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene 3, Gruppen F, E

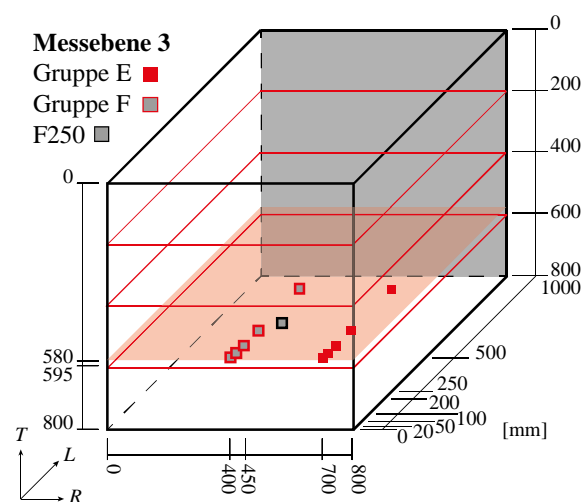


Abbildung 4-9: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene 3, Gruppen E, F

4.2.2.3 Holztemperatur

Die innere Holztemperatur wurde insgesamt an sechs Stellen in den zwei parallel verlaufenden Querschnittsebenen (RT-Ebene) gemessen. Die Ebenen sind in longitudinaler Richtung in den Tiefen 50 mm und 500 mm angeordnet. Die Temperatursensoren sind in tangentialer Richtung in den Abständen 200 mm und 400 mm und in radialer Richtung im Abstand von 75 mm und 335 mm positioniert, siehe Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 sowie im Anhang A.1.

4.2.2.4 Dimensionsänderung innen

Zur Erfassung des Dehnungsverhaltens im Inneren des Prüfkörpers wurden vier Messarrays der Firma Fibersensing eingesetzt. Jedes Array erfasst jeweils an zwei Stellen die lokale Dehnung und an einer dritten Stelle die Holztemperatur für die Temperaturkompensation des Dehnungsmesswertes der Glasfaser. Abbildung 4-10 zeigt ein implementiertes Messarray vor der durchgeführten Blockverleimung der einzelnen Brettschichtholzträger. Zur Erfassung der Beziehung zwischen Holzfeuchte und inneren Dimensionsänderung wurden die Messstellen für die Dimensionsänderungen den implementierten Messstellen zur Holzfeuchte in den Messebenen 1 und 2 zugeordnet. Die Lage der Gruppen ist in Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 sowie im Anhang A.1 ersichtlich.

4.2.2.5 Dimensionsänderung aussen

Zur Messung der äusseren globalen Dimensionsänderungen des Prüfkörpers wurden zwei Wegmesssensoren bestehend aus potentiometrischen Wegmessern und dem Messgerät „Rissfox“ der Firma Scantronik, eingesetzt, vgl. Abbildung 4-13. Die Wegmesssensoren 1 und 2 liegen in der RL-Ebene mit einem Abstand von 80 bzw. 460 mm von der Stirnfläche, siehe Abbildung 4-14.

4.2.2.6 Rissentwicklung

Die unter Abschnitt 4.1.4 beschriebenen Rissensoren wurden an drei Seiten mit Abständen von 10 und 40 mm zur Stirnfläche an den Prüfkörper appliziert, siehe Abbildung 4-15. Es wurden hierzu zwei unterschiedliche Breiten der Messsensoren gewählt. Das Gerät „Materialfox“ der Firma Scantronik erfasst und speichert die Messgrößen.



Abbildung 4-10: Dehnungsmesssensoren im blockverleimtem Prüfkörper

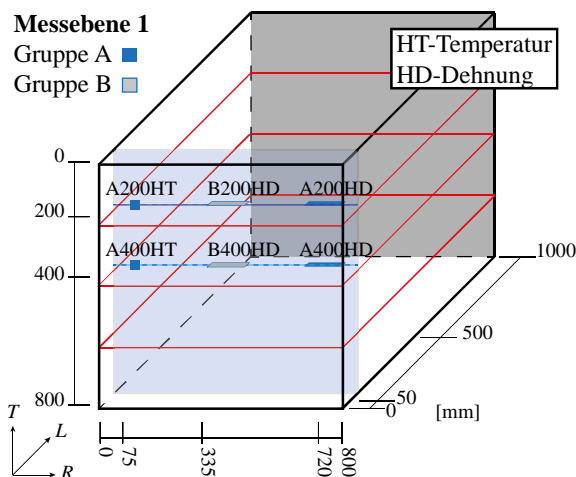


Abbildung 4-11: Position der Messsensoren für die Dehnungen in Messebene 1

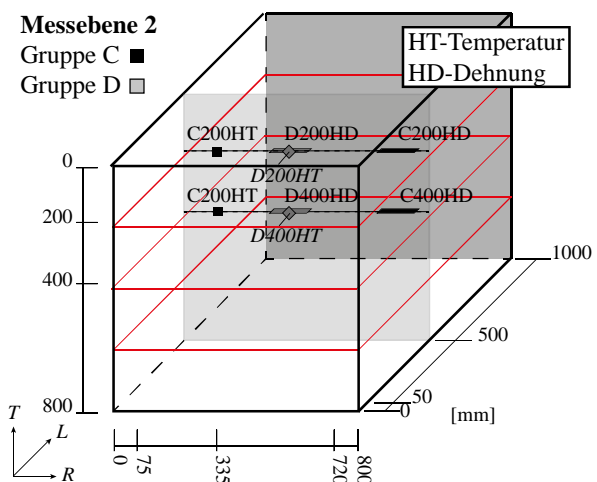


Abbildung 4-12: Position der Messsensoren für die Dehnungen in Messebene 2

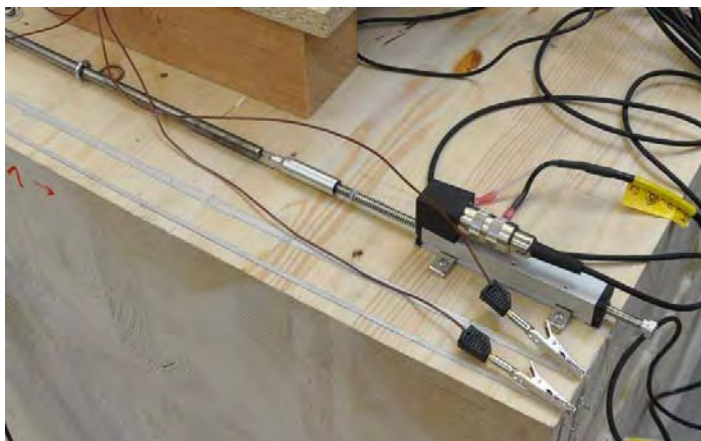


Abbildung 4-13: Applizierter Wegsensor (oben) und eingesetzte Risssensoren am Prüfkörper (unten)

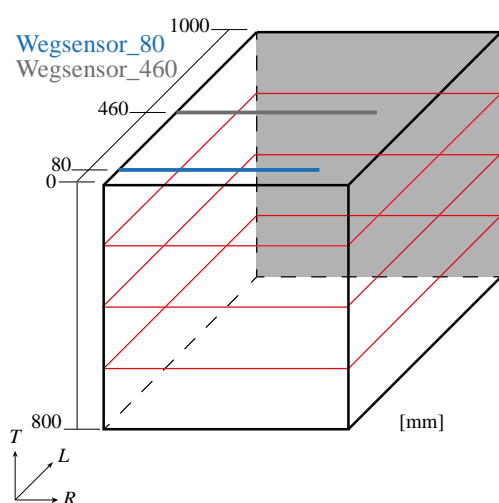


Abbildung 4-14: Position der Wegmesssensoren für die äussere Dimensionsänderung

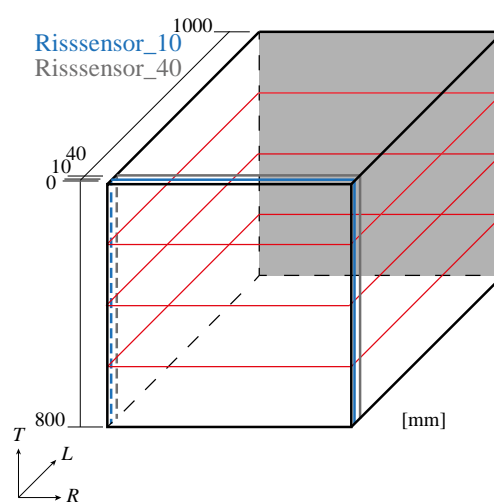


Abbildung 4-15: Position der Risssensoren für die Erfassung von äusseren Dehnungen/Rissen

4.2.3 Darlegung der Messergebnisse

4.2.3.1 Messzeitraum

Die applizierten Messgrössen am blockverleimten Brettschichtholzträger wurden über einen Messzeitraum von insgesamt 633 Tagen, ca. 2 Jahre erfasst. Die Messperioden gliedern sich in zwei Abschnitte, siehe Abbildung 4-16. Der erste Messabschnitt beschreibt die Auffeuchtung des Prüfkörpers innerhalb eines Messzeitraums von 250 Tagen. Der Prüfkörper wurde hierzu in einer speziell konfigurierten Klimakammer in einer feucht warmen Umgebung mit einer relativen Luftfeuchte von ca. 90 % und Lufttemperatur von 15 - 30 °C gelagert, um eine zügige Auffeuchtung abzubilden. Der zweite Messabschnitt spiegelt den tatsächlichen Ist-Zustand im Aussenklima wieder. Es konnte hier über einen Zeitraum von 300 Tagen die Auswirkungen der jahreszeitlich bedingten Klimawechsel erfasst werden. Eine Messkontinuität konnte aufgrund nicht ausreichend zuverlässiger Messtechnik nicht erreicht werden, so dass für einen Messzeitraum von ca. 100 Tagen zwischen den zwei Messperioden die Messdaten nicht zur Auswertung herangezogen werden können.

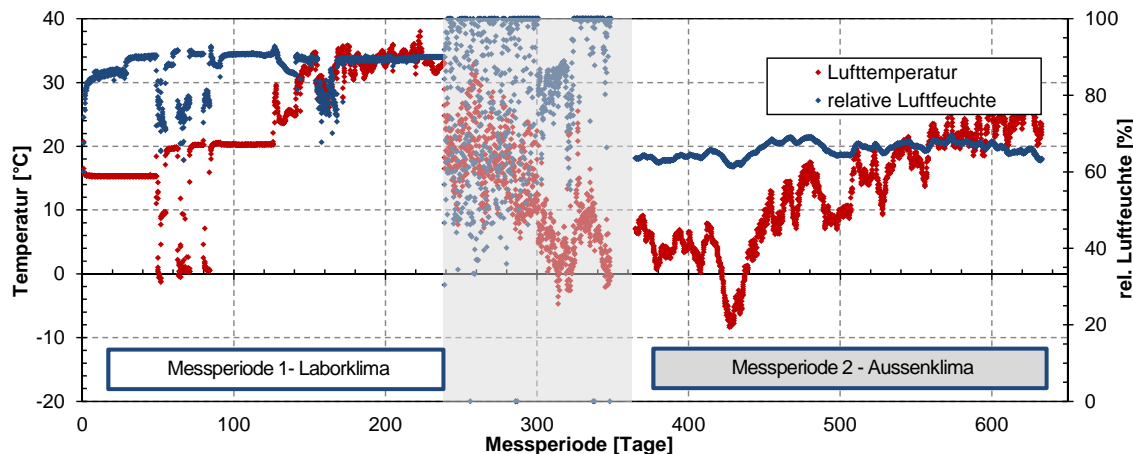


Abbildung 4-16: Messklima innerhalb der zwei untersuchten Messperioden

4.2.3.2 Holzfeuchte

Ermittlung der Holzfeuchte anhand der Sorptionsisothermenmethode

Für die Messdaten des Messsensors F_250_HLF/F_250_HLT wurde anhand der Sorptionsisothermen für Fichtenholz die sich einstellende Ausgleichsfeuchte im Holz bestimmt. Das Diagramm in Abbildung 4-17 enthält die Messdaten der Lufttemperatur und Luftfeuchte des Hohlraumes im Prüfkörper und die korrespondierende Holzfeuchte für die erste Messperiode. Deutlich erkennbar ist, dass durch die reduzierten Amplituden in der Luftfeuchte des Hohlraums gegenüber der relativen Luftfeuchte der Umgebung, ein zeitlich trägerer Verlauf im Messhohlraum stattfindet, s. Abbildung 4-17. Zusätzlich wird durch die reduzierten Messspitzen eine gute Abdichtung des Messhohlraumes bestätigt.

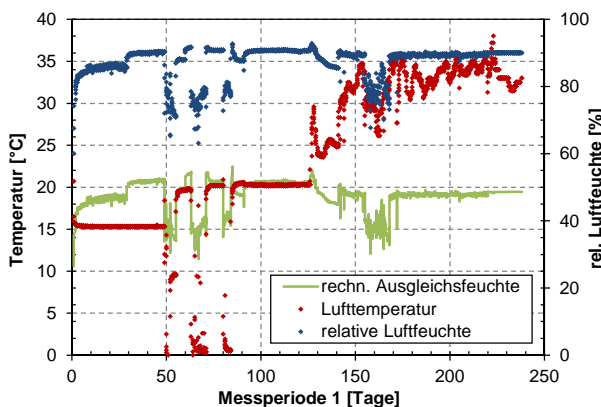


Abbildung 4-17: Rechnerische Ausgleichsfeuchte im Holz aus dem Umgebungsklima

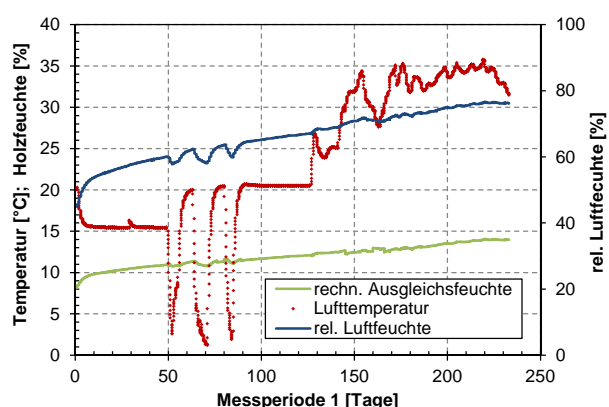


Abbildung 4-18: Holzfeuchteentwicklung am Sensor F_250 anhand der Sorptionsisothermenmethode

Vergleich der verwendeten Messtechnik

Für den Vergleich der zwei angewandten Methoden zur Erfassung der Holzfeuchte und der eingesetzten Messtechniken Gigamodul und Multisensor sind in Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 die Ergebnisse der Messsensoren F_250_HLF/F_250_HLT mit E_200_HF und A_285_HF mit B_285_HF gegenübergestellt. Als Referenz dient die Messperiode 1, die die Auffeuchtung des Prüfkörpers im Labor beschreibt. Die sich rechnerisch einzustellende Ausgleichsfeuchte im Holz zeigt ein deutlich höheres Niveau als die Messsensoren im Prüfkörperinneren. Den tendenziellen Verlauf der Auffeuchtung können die Messsensoren der Sorptionsisothermenmethode und des Gigamoduls wiedergeben. Die Messsensoren des Multisensors zeigen in beiden betrachteten Fällen zunächst einen Abfall der Holzfeuchte und erst ab ca. 120 Tagen Messperiode einen tendenziell angepassten Verlauf. Ferner ist zu beachten, dass die Messsensoren nicht exakt an den gleichen Messpositionen liegen, sondern nur benachbarte Messsensoren mit individuellen Beanspruchungssituationen und Reaktionen für einen indirekten Vergleich zur Verfügung stehen.

Die hier aufgezeigten Qualitätsunterschiede in der Messtechnik entsprechen den insgesamt erreichten Messergebnisse am Prüfkörper, vgl. hierzu die ausführlichen Diagramme im Anhang A.2 zur Holzfeuchtemessung. Im Folgenden können aus diesem Grund die Messwerte der Multisensoren nur eingeschränkt zur Bewertung und Einschätzung des Materialverhaltens des Prüfkörpers genutzt werden. Die Prüfergebnisse des Gigamoduls und der Sorptionsisothermenmethode werden demgegenüber als zuverlässig für das Forschungsvorhaben und der Anwendung zur Langzeiterfassung eingestuft.

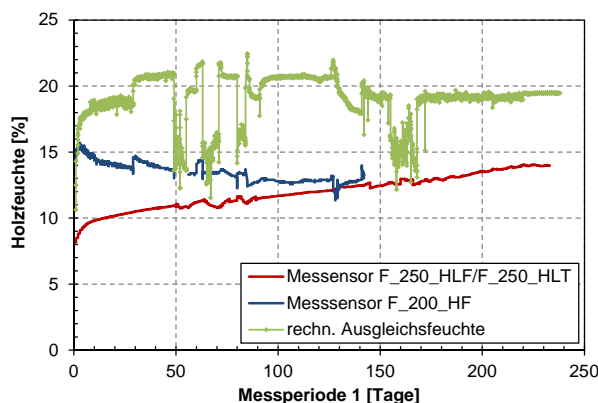


Abbildung 4-19: Vergleich von Sorptionsisothermenmethode und Widerstandsmethode

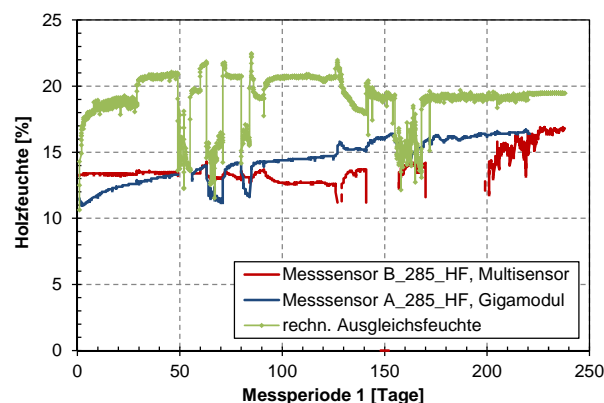


Abbildung 4-20: Vergleich für die Widerstandsmethode zwischen Gigamodul und Multisensor

Generelle Holzfeuchte-Entwicklung

Für den Messzeitraum der Auffeuchtung des Prüfkörpers konnte eine trägere Reaktion der sich einstellenden Holzfeuchte gegenüber der rechnerischen Ausgleichsfeuchte aus dem korrespondierenden Umgebungsklima verzeichnet werden, vgl. hierzu die Messergebnisse der Gruppe A der Messebene 1 in Abbildung 4-21. Innerhalb der zweiten Messperiode resultiert aus dem Aussenklima rechnerisch eine konstante Ausgleichsfeuchte, was sich ebenfalls in den Messergebnissen durch einen relativ konstanten Verlauf auf einem geringfügig höheren Niveau bestätigt, welcher sich durch die eingestellte Holzfeuchte aus dem Auffeuchtungsprozesses ergibt.

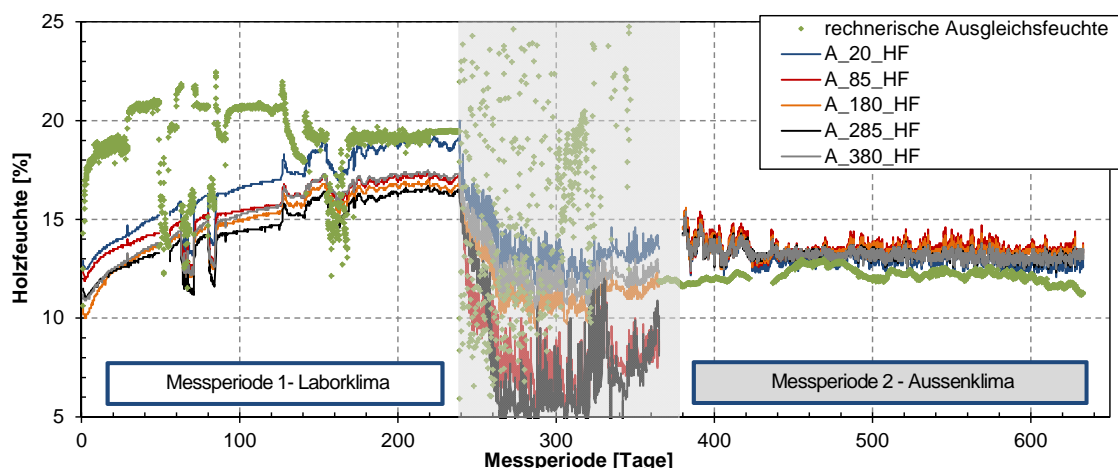


Abbildung 4-21: Gemessene Holzfeuchte der Gruppe A im Vergleich zur rechnerischen Ausgleichsfeuchte aus dem Umgebungsklima

Holzfeuchte-Entwicklung in Tangentialer-Richtung

Für die Beurteilung der Feuchteentwicklung in tangentialer Richtung wurden die Messergebnisse über die Querschnittsgeometrie des Prüfkörpers nach vier markanten Messzeiträumen der Messperiode 1 und 2 ausgewertet. Für die Messperiode 1, die Auffeuchtung des Prüfkörpers im Labor, erfolgte der Vergleich der Ausgangssituation bis hin zur maximal erreichten relativen Luftfeuchte von ca. 90 % in zwei Stufen zu den jeweiligen Temperaturniveaus von 15 °C und 20 °C, s. Abbildung 4-22. Die erfasste Reaktion des Prüfkörpers auf das aufgebraute äussere Klima ist in Abbildung 4-24 und Abbildung

4-26 durch den Verlauf der Holzfeuchteentwicklung für die Messgruppe A der Messebene 1 und der Messgruppe D für die Messebene 2 dargestellt. Die Messergebnisse der weiteren Gruppen sind im Anhang A.2.1 enthalten. Die Messergebnisse beschreiben durch die höher gemessene Holzfeuchte am Querschnittsrand gegenüber dem Querschnittsinneren einen Feuchteverlauf. Der Vergleich der Grenzkurven für den Anfangszeitpunkt (2 Tage) und der maximalen Auffeuchtung (120 Tage) zeigt, dass der absolut erreichbare Änderungsbetrag der Holzfeuchte am Querschnittsrand auch im Querschnittsinneren innerhalb der Messgruppe A vorliegt. Für die Messgruppe B, die sich in der Mitte der Prüfkörperbreite zentriert und in der gleichen Ebene von der Stirnseite aus liegt, erfolgt diese Änderung der Holzfeuchte im Querschnittsinneren bereits nicht mehr, siehe Anhang A.2.1.

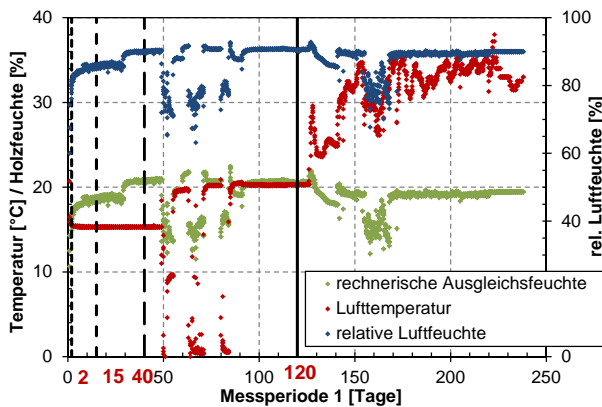


Abbildung 4-22: Messzeiträume der Messperiode 1

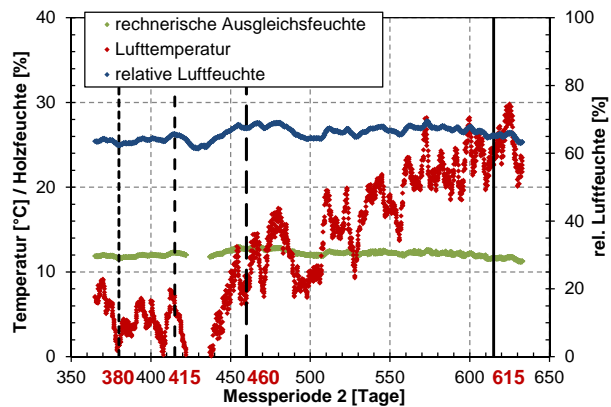


Abbildung 4-23: Messzeiträume der Messperiode 2

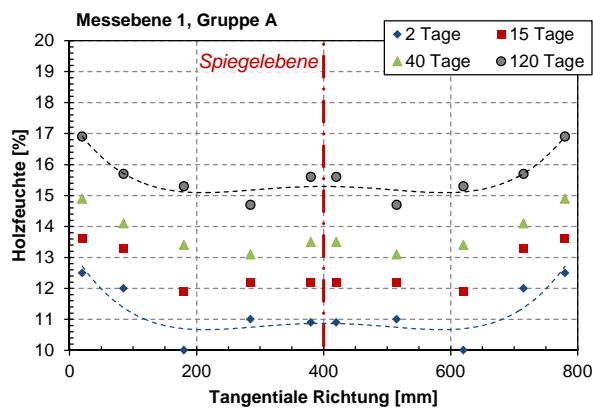


Abbildung 4-24: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe A, der Messebene 1 für die Messperiode 1

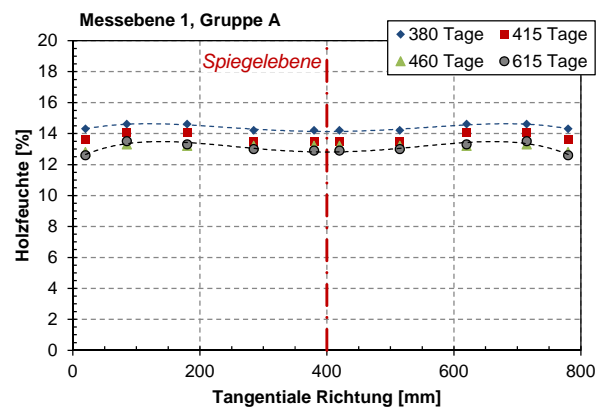


Abbildung 4-25: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe A, der Messebene 1 für die Messperiode 2

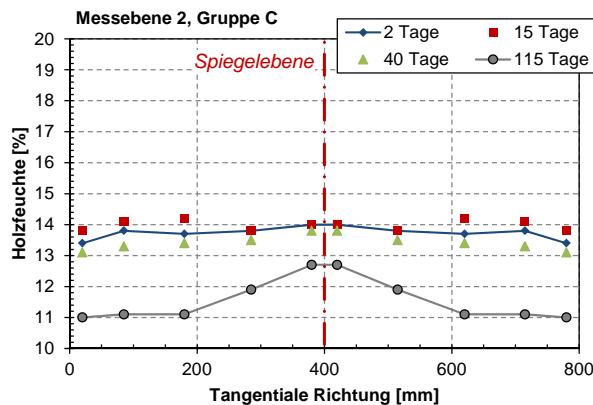


Abbildung 4-26: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe D, der Messebene 2 für die Messperiode 1

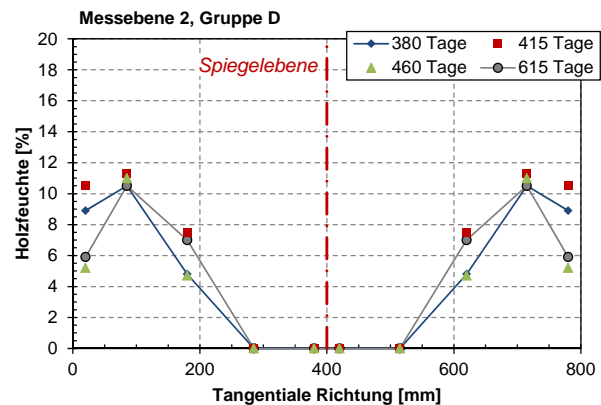


Abbildung 4-27: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe D, der Messebene 2 für die Messperiode 2

Für die Messebene 2, die von der Stirnseite im Abstand von 500 mm liegt, konnten mit der verwendeten Messtechnik keine Feuchtedifferenzen in tangentialer Richtung erfasst werden, s. Abbildung 4-26. Gleiches gilt für die Messperiode 2. Die Erfassung der Auswirkungen im Aussenklima führen hier ebenfalls zu relativ konstanten Verläufen der Holzfeuchte für die Messebene 1 wie 2, s. Abbildung 4-23, Abbildung 4-25 und Abbildung 4-27. Die absolut auftretenden Holzfeuchteänderungen treten ebenfalls im Querschnittsinneren auf. In der Auswertung der Kurven wurden die Messergebnisse mit einer Holzfeuchte von 0 % als Messfehler deklariert. Ferner können Unterschiede zwischen den Messergebnissen einer Kurve durch den diskontinuierlichen Feuchtetransport infolge der absperrenden Wirkung von Klebefugen auftreten.

Holzfeuchte-Entwicklung in radialer Richtung

Die Holzfeuchteentwicklung in radialer Richtung ist für ausgewählte Messpunkte der Messebene 1 und 2 für die gleichen definierten Zeitintervalle in Abbildung 4-28 und Abbildung 4-29 dargestellt. Die weiteren Messergebnisse für die Holzfeuchteentwicklung in radialer Richtung sind im Anhang A.2.3 aufgeführt. Für die Messsensoren der Messebene 1 mit den geringsten Abständen zur Stirnfläche des Prüfkörpers stellt sich sehr schnell ein relativ konstanter Verlauf der Holzfeuchte für jedes Messintervall ein. In der tieferliegenden Messebene 2, für die Messsensoren mit den grössten Abständen zur Stirnfläche des Prüfkörpers ist zu auch ein konstanter Verlauf der Holzfeuchte für alle Zeitintervalle vorhanden. Die Änderung in der Holzfeuchte ist hier gegenüber Messebene 1 allerdings verzögert.

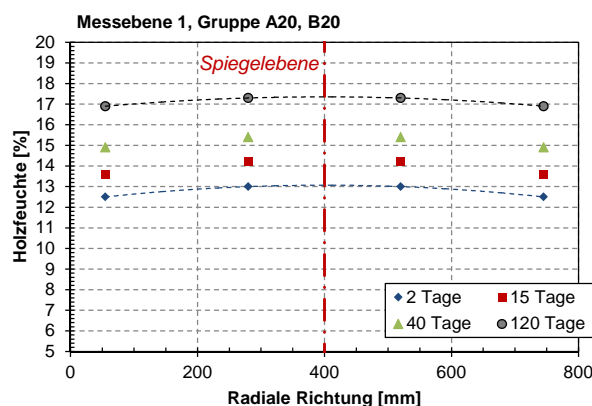


Abbildung 4-28: Holzfeuchteverlauf in radialer Richtung der Messgruppe A,B, der Messebene 1 für die Messperiode 1

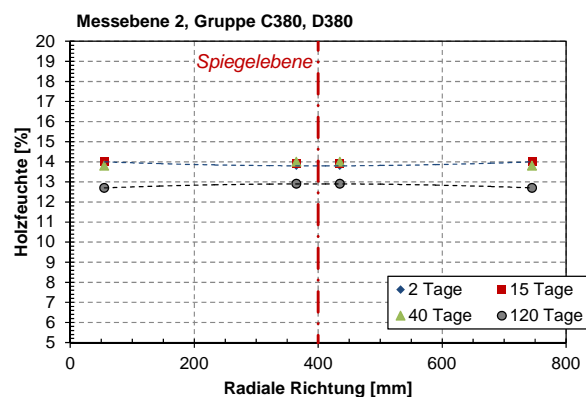


Abbildung 4-29: Holzfeuchteverlauf in radialer Richtung der Messgruppe C,D, der Messebene 1 für die Messperiode 1

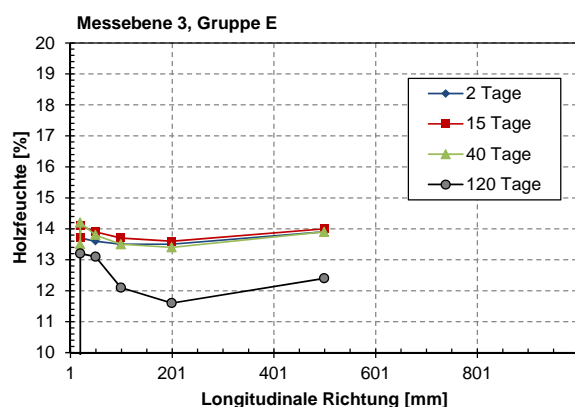


Abbildung 4-30: Holzfeuchteverlauf in longitudinaler Richtung der Messgruppe E, der Messebene 3 für die Messperiode 1

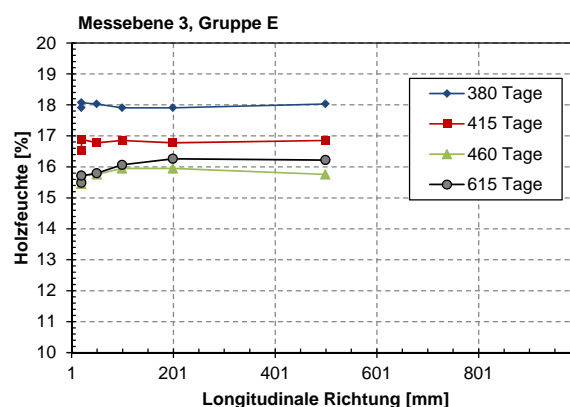


Abbildung 4-31: Holzfeuchteverlauf in longitudinaler Richtung der Messgruppe E, der Messebene 3 für die Messperiode 2

Holzfeuchte-Entwicklung in longitudinale Richtung

Für die Einschätzung der Holzfeuchteentwicklung in longitudinale Richtung dienen die Messergebnisse der Gruppen E und F der Messebene 3 für eine erste Auswertung. Die gleichen Messintervalle wie für die radiale/tangentiale Richtung wurden zugrunde gelegt. In Abbildung 4-30 und Abbildung 4-31 sind die resultierenden Holzfeuchten aufsteigend von der Stirnseite in longitudinale Richtung aufgetragen. Ein leicht erhöhter Anstieg der Holzfeuchte an der Stirnseite gegenüber dem Querschnittsinnen konnte für beide Messperioden erfasst werden.

4.2.3.3 Holztemperatur

Die Messergebnisse der Holztemperatur weisen keine Unterschiede infolge der unterschiedlichen Messpositionen im Querschnitt der Prüfkörper auf, s. Anhang A.2.5. Für den gesamten Messzeitraum liefern die Sensoren gleiche Ergebnisse und reagieren gleichzeitig auf Änderungen des Umgebungsklimas.

4.2.3.4 Dimensionsänderung - Aussenseiten

Die Dehnungsentwicklung an den Aussenseiten des Prüfkörpers wurde in radialer Richtung erfasst. In radialer Richtung resultieren, bedingt durch die Anatomie von Holz, die geringsten Zugfestigkeiten. Das Quellmass in radialer Richtung beträgt $\alpha_R = 0.16 \%$ pro 1 % Holzfeuchteänderung. Die aus der Ausgleichsfeuchte resultierende Dehnung über die gesamte Prüfkörperbreite von 800 mm können durch die gemessenen Dehnungen der Wegsensoren für die erste Messperiode nicht bestätigt werden, s. Abbildung 4-32. Die Ausdehnung respektive das Quellen des Prüfkörpers ist zeitlich verzögert und die Amplitude der Messwerte ist deutlich geringer. Für die zweite Messperiode verlaufen die gemessenen Dehnungen kongruent zu den rechnerischen Dehnungen. Die klimatische Beanspruchungssituation ist hier nicht so extrem wie in der Aufweichungsphase der Messperiode 1 und führt zu keiner zeitlichen Verzögerung.

Die infolge der klimatischen Beanspruchung hervorgerufenen geringen Dimensionsänderungen von $\varepsilon_A = 0.2 \%$ führten zu rechnerischen Querkzugspannungen von ca. $\sigma_{t,90} = 1.2 \text{ N/mm}^2$, unter Annahme eines Elastizitätsmoduls von $E_R = 600 \text{ N/mm}^2$ in radialer Richtung, Neuhaus (1981). An der Oberfläche des Prüfkörpers wurden zu diesem Zeitpunkt, Tag 80, die Rissinitiation durch die Rissensoren detektiert, vgl. Abbildung 4-32 und Anhang A.2.6. Die mittlere Querkzugfestigkeit $f_{t,90}$ vom verwendeten Brettschichtholz wurde zu diesem Zeitpunkt erstmalig überschritten. Weiterführende Rissentwicklungen respektive Rissinitiationen konnten durch die applizierte Messtechnik nicht mehr erfasst werden.

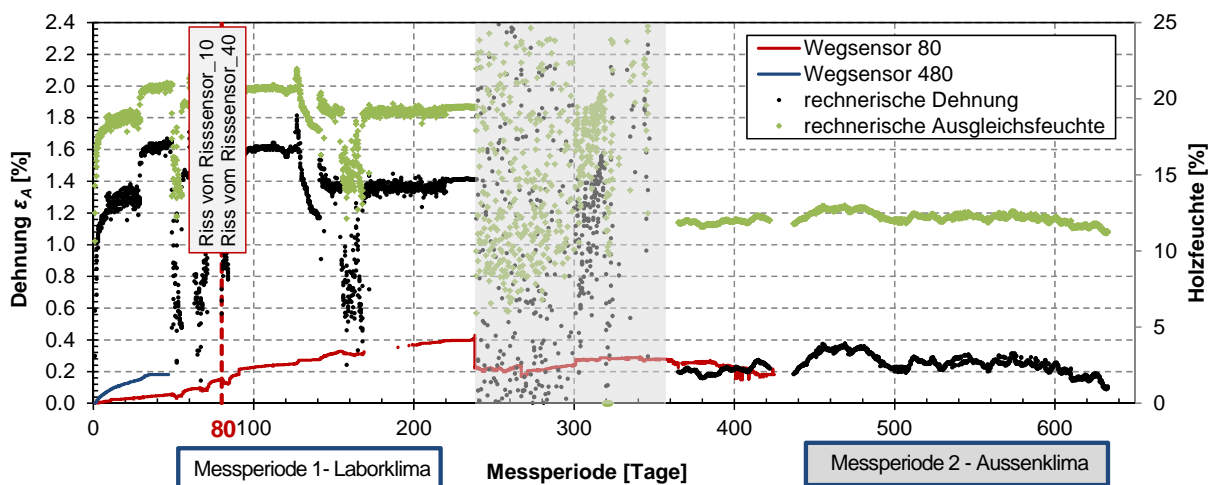


Abbildung 4-32: Gemessener und rechnerischer Dehnungsverlauf in radiale Richtung sowie Rissentstehung für den gesamten Messzeitraum

4.2.3.5 Dimensionsänderung - Querschnittsinnere

Die Dimensionsänderung im Inneren des Querschnittes in den Messebenen 1 und 2 konnte nur für den Anfangszeitraum der Messperiode 1 erfasst werden. Eine Messkontinuität über den gesamten Zeitraum konnte durch teilweise Ausfälle der Ausleseseinheit und dem Ausfall von individuellen Sensoren nicht erreicht werden. Anhand der hier erstmals gewonnenen Messergebnisse zur Dehnungsentwicklung im Querschnittsinneren eines blockverleimten Brett-schichtholzträgers können erste tendenzielle Abschätzungen der Auswirkungen der Aufwech-tung des Prüfkörpers erarbeitet werden. Die eingesetzten Fibersensoren reagieren nahezu zeitgleich auf die äusseren klimatischen Änderungen. Im Querschnittsinneren des Prüfkörpers kommt es zu einem Wechsel der Spannungs-Dehnungsbeziehungen. Die Amplituden der Messsensoren der Messebene 2 sind hierbei geringer als die in der Messebene 1, was sich durch die Lage im Querschnittsinneren des Prüfkörpers und den damit grösseren maximalen Abständen zur Oberfläche im Vergleich zur Messebene formal begründet.

Für die Einschätzung der inneren Dehnungen konnte für die Messsensoren A_200_HD, A_400_HD und B_200_HD über die Beziehung zur korrespondierenden Holzfeuchte das Schwindmass α_R in radialer Richtung bestimmt werden, vgl. Abbildung 4-34. Das ermittelte Schwindmass ist deutlich geringer als das in der SIA 265:2011 für Fichtenholz mit $\alpha_R = 0.16 \%$ pro $\Delta u = 1 \%$ Holzfeuchteänderung angegebene. Im Mittel verhält sich das Schwindmass gleichwertig zu den ebenfalls geringeren aufgezeichneten äusseren Dimensionsänderungen. Für eine generelle Abschätzung sind aber eine Erhöhung der Messtellen und die Anwendung von zuverlässigeren Messsensoren zur Erfassung der Holzfeuchte zwingend erforderlich. Die hier gewonnenen Ergebnisse geben eine erste positive tendenzielle Aussage, die mit weiterführenden Messungen unter weiteren klimatischen Beanspruchungen geprüft und gefestigt werden muss.

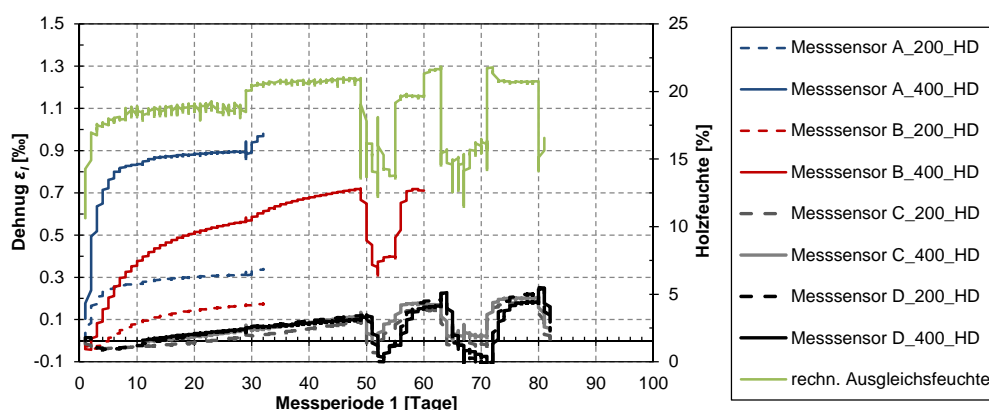


Abbildung 4-33: Innere Dehnungen der Messebene 1 und 2 für die Messperiode 1

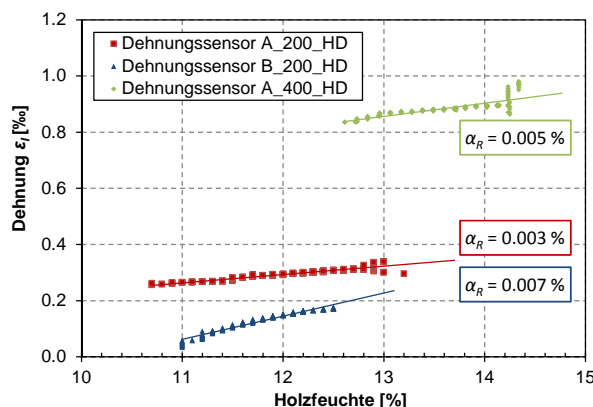


Abbildung 4-34: Holzfeuchte-Dehnungsbeziehung für die Messsensoren A_200_HD, B_200_HD und A_400_HD

Schwind-/Quellmass α_R in radialer Richtung:

$$\alpha_R = \Delta \varepsilon_i / \Delta u$$

mit:

$\Delta \varepsilon_i$ die Änderung der inneren Dehnung

Δu die Änderung der Holzfeuchte

4.3 Diskussion und Zusammenfassung der Laboruntersuchungen

Die dargelegten Messergebnisse liefern einen ersten guten Überblick über die Auswirkungen von wechselnden klimatischen Beanspruchungssituationen. Der verwendete blockverleimte Prüfkörper, der den Trägerendquerschnitt eines Brückenträgers simuliert, wurde in den zwei Messperioden zum einen einem zügigen Auffeuchtungsprozess und zum anderen dem gewöhnlichen Aussenklima ausgesetzt. Anhand der verwendeten Messtechnik konnte die Holzfeuchte, die Holztemperatur und die Holzdehnung in drei verschiedenen Messebenen im Querschnittsinneren des Prüfkörpers gemessen werden. Zusätzlich wurde die äussere Dimensionsänderung über zwei Wegsensoren, das Entstehen von Rissen und das umgebende Klima mit Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte gemessen. Insgesamt kamen 52 Messsensoren zum Einsatz.

Mit den erreichten Messergebnissen konnten bisherig formal getroffene Annahmen, dass im Querschnittsinneren die Holzfeuchteentwicklung verzögert ist und in den Randzonen eines Trägerquerschnitts erhöhte Holzfeuchten vorliegen, nachgewiesen werden. In einem zeitgleich laufenden Forschungsprojekt an der TU-München konnten hierzu gleiche Ergebnisse erreicht werden, Winter et. al (2012). Die hygroroskopische Aufnahme sowie der Feuchtetransport von Holz ist aufgrund der Anatomie von Holz in den drei spezifischen Materialachsen verschieden. Eine Differenzierung des Holzfeuchtetransportes in die Materialachsen konnte aufgrund der qualitativ unterschiedlichen Messtechnik zur Holzfeuchtemessung noch nicht erfolgen. Die aufgezeigten Messergebnisse zeigen einen deutlichen Abfall des Holzfeuchtegehaltes mit zunehmendem Abstand zum Querschnittsrand für alle drei Materialachsen.

Das gemessene Dehnungsverhalten an der Prüfkörperoberfläche zeigt im Vergleich zu den Dehnungen im Querschnittsinneren ein äquivalentes Verhalten. Die gemessenen Änderungen infolge der Auffeuchtung des Prüfkörpers in der Messperiode 1 liegen deutlich unter den rechnerisch korrespondierenden Grössen für die Dehnung. Das Quell- und Schwindmass ist ebenfalls deutlich geringer. Innerhalb des Querschnittes fand generell ein schneller gleichmässiger Temperatúrausgleich entsprechend der Aussentemperatur statt.

Die Präzision der angewandten Messtechnik sowie die Messdichte der Messsensoren gab einen ersten positiven Überblick über das Langzeitverhalten von Holz infolge wechselnder klimatischer Beanspruchungen. Für fundiertere und generelle Aussagen muss allerdings die Messstellendichte erhöht und die Qualität der Messtechnik besser abgestimmt werden. Ferner muss das Prüfprogramm mit unterschiedliche Querschnittsgeometrien und verschiedenen extremen klimatischen Beanspruchungssituationen unter Laborbedingungen ergänzt werden, um vorhandene Grenzen detailliert zu erfassen.

5 HAUPTTEIL

5.1 Brücke I: Überführung Horen

5.1.1 Grundlagen und eingesetzte Messtechnik

Die Überführung Horen befindet sich im Kanton Aargau. Die Planung oblag dem Büro Makiol & Wiederkehr und die Träger lieferte die Firma Hüscher Holzleimbau AG. Die dreifeldrige Blockholzbrückenkonstruktion überspannt 31 Meter und wurde im Juni 2008 errichtet, s. Abbildung 5-1. Die Brücke ist für eine Nutzlast von 40 Tonnen zugelassen. Die Fahrbahnbreite beträgt 5 Meter. Auf die Blockholzträger mit variablen Höhen sind Sekundärträger quer aufgelegt, welche zur Lasteinleitung und -verteilung dienen. An dieser Brücke konnten ersten insitu-Erfahrungen zur Langzeitmessung der Holzfeuchte von blockverleimten Brettschichtholzträgern erzielt werden.



Abbildung 5-1: Überführung in Horen mit blockverleimten BSH Trägern

Für die Langzeitmessung der Holzfeuchte wurden 20 Holzfeuchtesensoren gemäss dem Messstellenplan in Abbildung 5-2 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 eingesetzte Messtechnik, Multisensor mit Materialfox der Firma Scantronic, wurde vor der Blockverleimung im Holzbaubetrieb eingebaut, siehe Abbildung 5-3.

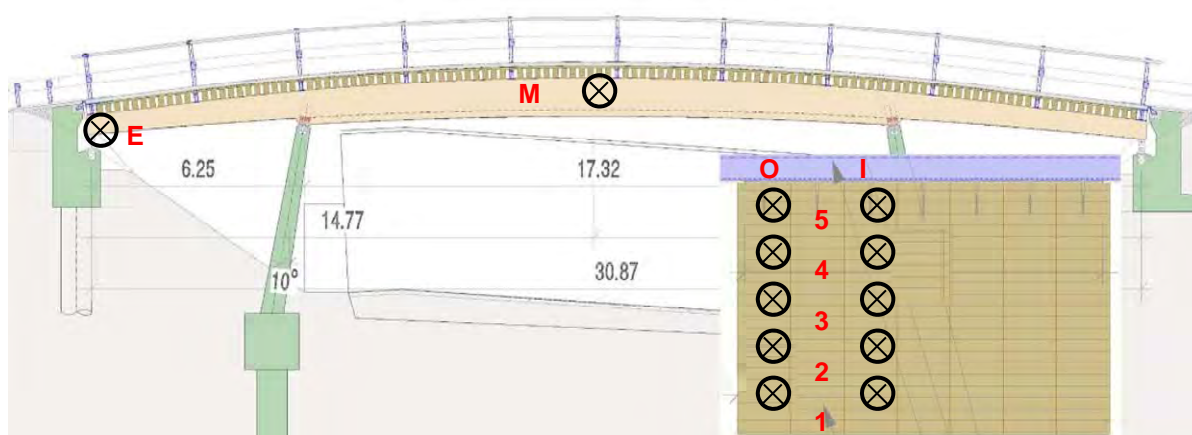


Abbildung 5-2: Messstellen-Plan für die Brücke Horen



Abbildung 5-3: Installation der Messtechnik für die Brücke Horen

5.1.2 Messergebnisse und deren Diskussion

Für einen Messzeitraum von insgesamt 24 Monaten, beginnend von Oktober 2009 bis Oktober 2011, konnten für die implementierten Feuchtemesssensoren die Entwicklungen infolge der klimatischen Wechselbeanspruchungen erfasst werden. Abbildung 5-4 zeigt die aufgezeichneten Klimasituationen sowie die rechnerisch korrespondierende Ausgleichsfeuchte im Holz für den gesamten Messzeitraum.

Die Messergebnisse der Sensoren E_O und E_I am Trägerende zeigen einen relativ konstanten Verlauf der Holzfeuchte im mittleren Bereich von 15 % - 19 % für den gesamten Messzeitraum, s. Abbildung 5-5. Die infolge der jahreszeitlich bedingten klimatischen Wechsel reflektieren sich in den Holzfeuchtemessungen sehr verzögert und nur mit geringen Änderungen der Holzfeuchte. Gleiches gilt für die Sensoren M_I und M_O im Zentrum des Brückenträgers. Die korrespondierenden Holzfeuchten konzentrieren sich hier ebenfalls in einem mittleren Messbereich von 14 % - 18 %, für die innenliegenden Sensoren M_I sogar in einem Messbereich von 14 % - 16 %, s. Abbildung 5-6.

Die in Trägermitte geringeren resultierenden Messbereiche bestätigen den nicht vorhandenen Einfluss des stirnseitigen/longitudinalen Feuchtetransportes, der auf die Holzfeuchte der Messgruppe E einen entscheidenden Einfluss hat. Die Spannweite zwischen den minimalen und den maximalen Feuchten liegen zum Vergleich in der Messgruppe M_I bei 10.6 % - 16.8 % und in der Messgruppe E_I bei 10.3 % - 19.5 %. In der Messgruppen M_O liegt der Bereich bei 10.5 % - 18.3 % und für die Messgruppe E_O bei 10.1 % - 19.4 % Holzfeuchte. Innerhalb einer Messgruppe tritt zwischen den aussen- und innenliegenden Sensoren keine Variation auf. Ein Einfluss vom Abstand quer zur Faser, radiale wie tangential Richtung konnte nicht gemessen werden.

Die erfassten Messbereiche für die Holzfeuchte im Brückenträger bestätigen im Gesamten einen Pilzbefall ungefährlichen Bereich. Der Feuchtetransport in longitudinaler Richtung sollte weiterhin beobachtet werden. Für ein dauerhaft konstruktiv geschütztes Stirnholzende sollte kein erhöhter Anstieg der Holzfeuchte auftreten.

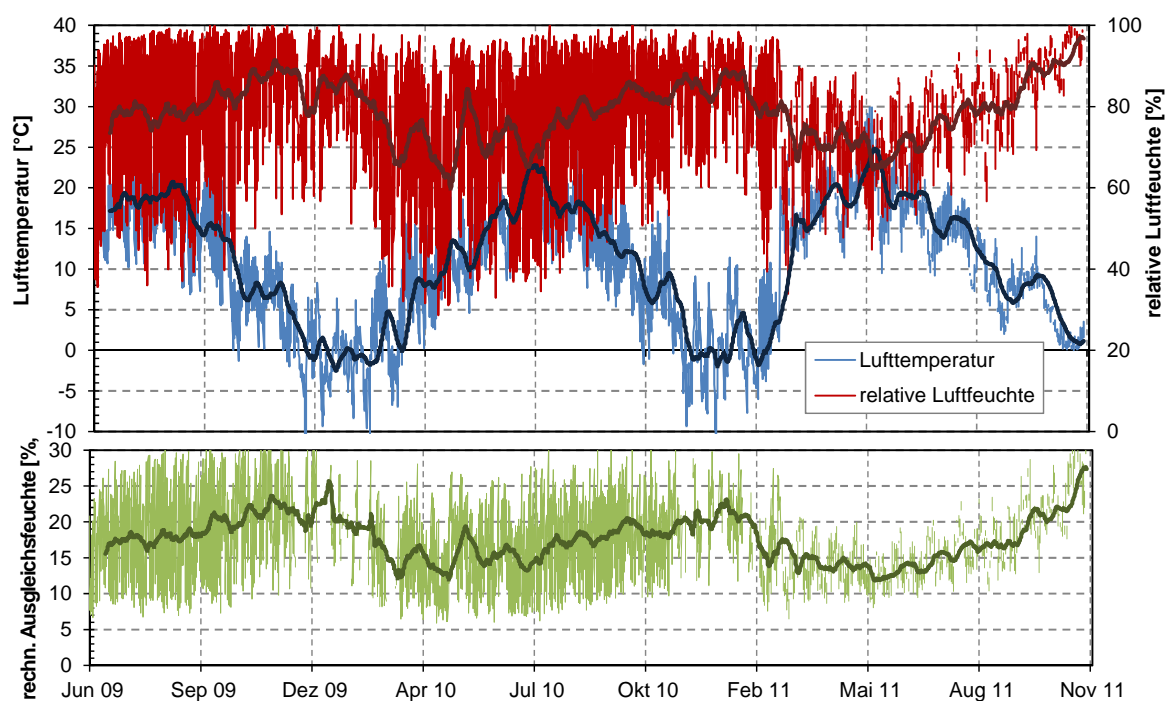


Abbildung 5-4: Klimasituation und korrespondierende rechnerische Ausgleichsfeuchte im Holz für die Brücke Horen

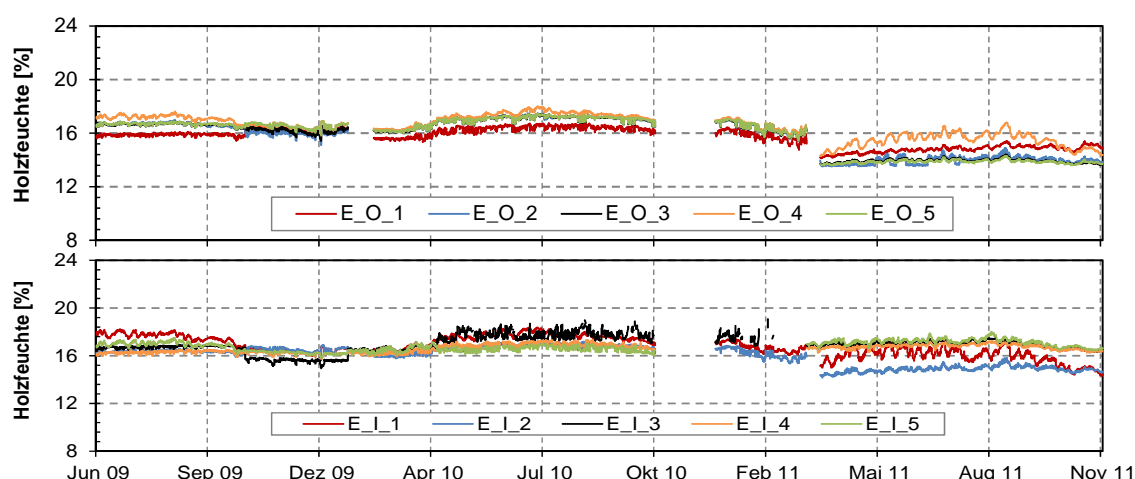


Abbildung 5-5: Holzfeuchte der Messgruppe E für die Brücke Horen

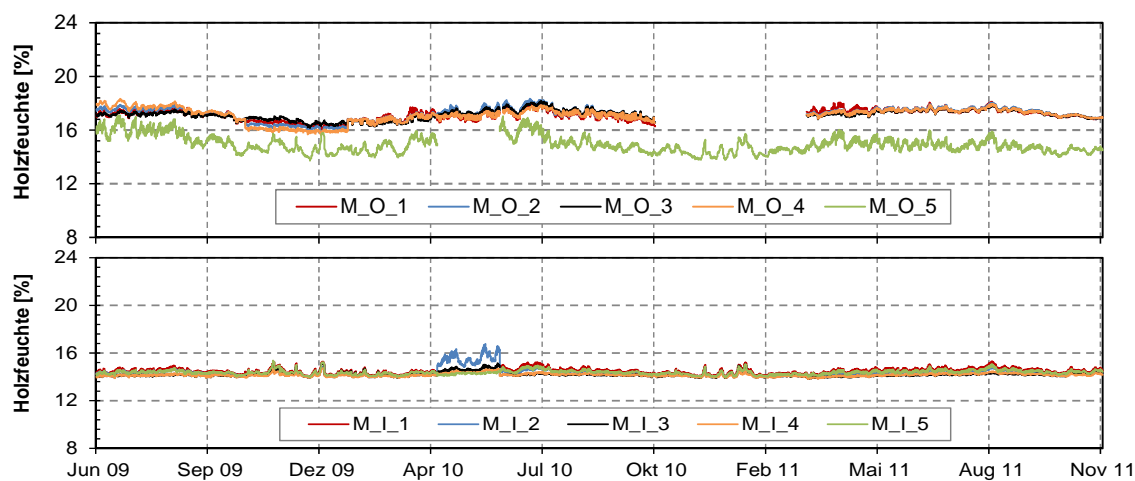


Abbildung 5-6: Holzfeuchte der Messgruppe M für die Brücke Horen

5.2 Brücke II: Muotathal

5.2.1 Grundlagen und eingesetzte Messtechnik

Die Kirchenbrücke in Muotathal aus dem Jahre 2009 ist eine Bogenbrücke, bestehend aus 2 Bogenträgern aus blockverleimtem Brettschichtholz mit je 35.2 m Länge, s. Abbildung 5-7. Den Untergurt bildet je ein HEB 500, welcher an den Bogenträgern aufgehängt ist. Die Spannweite der Brücke beträgt 32 m und die Fahrbahnbreite ist 6 m. Die Brücke ist für eine Nutzlast von 40 Tonnen bemessen worden. Der Holzbauingenieur war das Büro Pirmin Jung.



Abbildung 5-7: Bogenbrücke in Muotathal mit blockverleimten BSH-Trägern

Für die Langzeitmessung der Holzfeuchte wurde ein Messstellenplan mit insgesamt 20 Holzfeuchte-Messstellen erarbeitet. Die Messstellen konzentrieren sich bei dieser Brücke an einem Trägerende. Im Abstand von 800 mm und 2000 mm zum Trägerende wurde je eine Messgruppe E und M angeordnet. Jede Messgruppe gliedert sich in zwei parallel verlaufende Stränge zum einem an der äusseren (O) und zum anderen an der mittleren (I) Klebefuge der blockverleimten Brettschichtholzträger. In jedem Messstrang differenzieren sich die Sensoren in fünf verschiedene Höhen des Querschnittes, s. Abbildung 5-8.

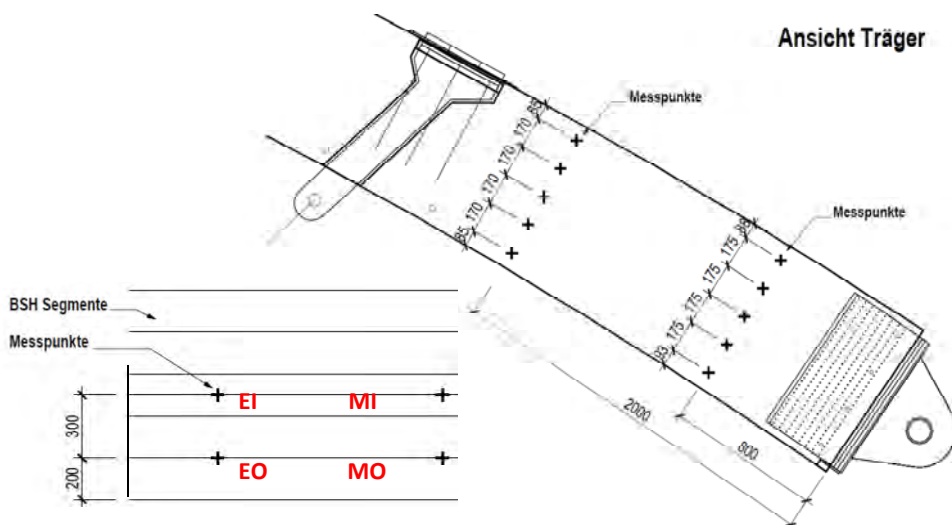


Abbildung 5-8: Messstellen-Plan Muotathal (Ansicht und Draufsicht)

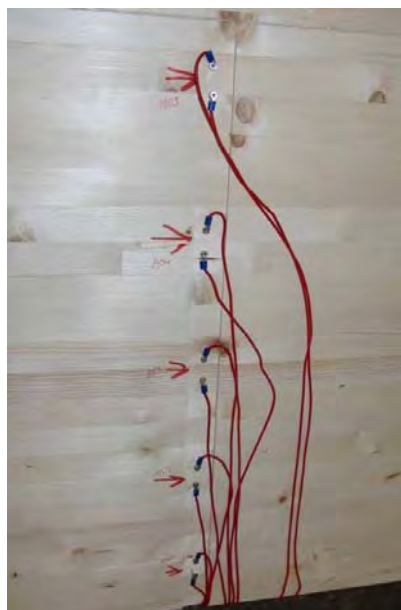


Abbildung 5-9: Installation der Messtechnik Muotathal, links Messsensoren, rechts Position der Datenlogger

Die Messtechnik wurde vor der Blockverleimung im Holzbaubetrieb (Hüsser AG) eingebaut, s. Abbildung 5-9. Als Messsensoren dienen hierbei jeweils zwei isolierte Edelstahlschrauben die im Abstand von 32 mm eingedreht wurden und einen Messpunkt bilden. Die Messdatenerfassung erfolgte mit dem Multisensor in Kombination mit dem Materialfox der Firma Scanntronik. Die Ergebnisse wurden manuell ausgelesen.

5.2.2 Messergebnisse und deren Diskussion

Die Holzfeuchteentwicklung an der Muotathalbrücke wurde über einen Messzeitraum von 24 Monaten beginnend im Oktober 2009 gemessen. Das vorhandene Aussenklima sowie die rechnerische Ausgleichsfeuchte sind in Abbildung 5-10 über den gesamten Messzeitraum dargestellt. Die in den Messgruppen E und M erfasste Holzfeuchte ist in den Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 dargestellt. Der Verlauf innerhalb einer Messgruppe folgt den jahreszeitlich bedingten Klimawechsel verzögert. Die Sensoren der Messgruppe E zeigen zu Beginn der Messreihe erhöhte Holzfeuchtwerte von bis zu 25 % an, welche sich innerhalb eines Monats auf ein tieferes Niveau anpassen. Innerhalb der Messgruppe M zeigen nur zwei der zehn Sensoren dieses Verhalten. Die anderen acht Sensoren weisen bereits zu Beginn das spätere Niveau der Ausgleichsfeuchte im Holz auf.

Im Dezember 2010 und Januar 2011 können bei diversen Messsensoren unabhängig von ihrer Positionierung innerhalb des Balkens Feuchteanstiege von bis zu 5 % beobachtet werden. Dieser Anstieg ist durch den generellen Anstieg der Luftfeuchtigkeit im Winter begründbar. Die minimalen und die maximalen Feuchten liegen bei allen Messreihen in einem analogen Bereich von 12.0 % - 22.8 %. Die Holzfeuchte liegt nie in einem für Pilzbefall gefährlichen Bereich.

Der Vergleich der durchschnittlichen Holzfeuchten der zwei Messgruppen ergibt für die Messsensoren der Gruppe E einen Wert von 17.6 % und für die Gruppe M einen Wert von 15.6 %. Über die Messdistanz von 1200 mm zwischen den Messgruppen ergibt sich ein Feuchtegefälle von ca. 2 % in longitudinaler Richtung.

Der Verlauf der Messergebnisse für die innenliegenden Stränge der Messgruppen ist konzentrierter als für die aussenliegenden Sensoren. Der Vergleich der Mittelwerte über den gesamten Messzeitraum zeigt kongruente Werte von 16.7 % respektive 16.8 %. Eine Differenzierung über die Querschnittsbreite, in radialer/tangentialer Richtung konnte nicht erfasst werden.

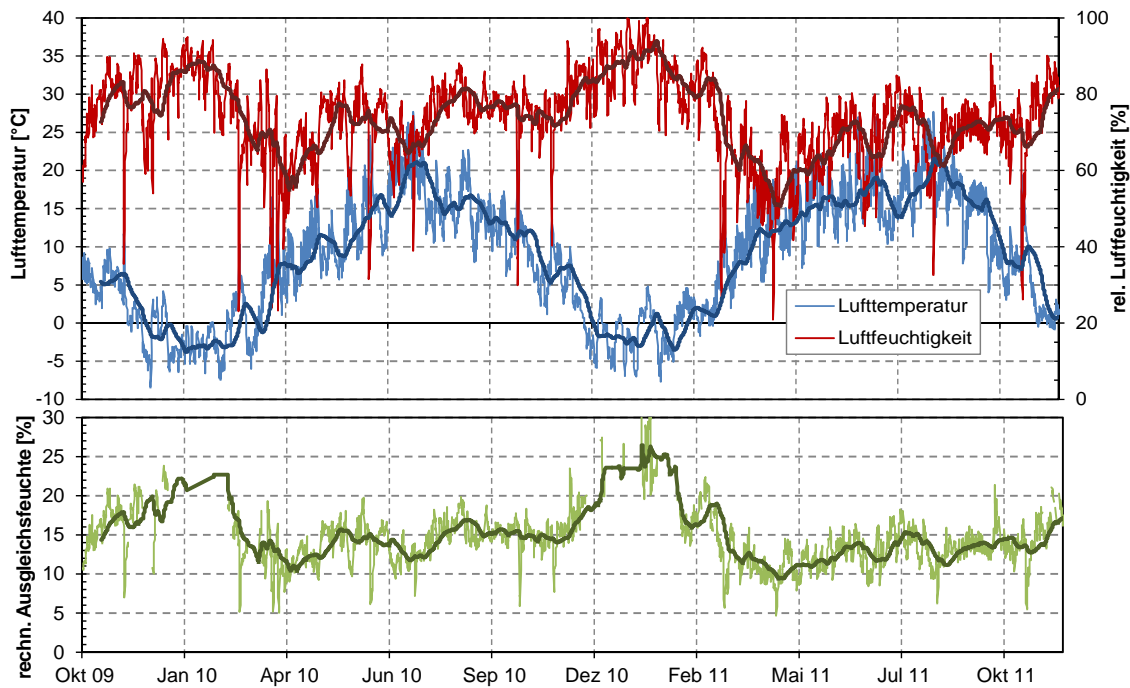


Abbildung 5-10: Klimasituation und korrespondierende Ausgleichsfeucht für die Brücke Muotathal

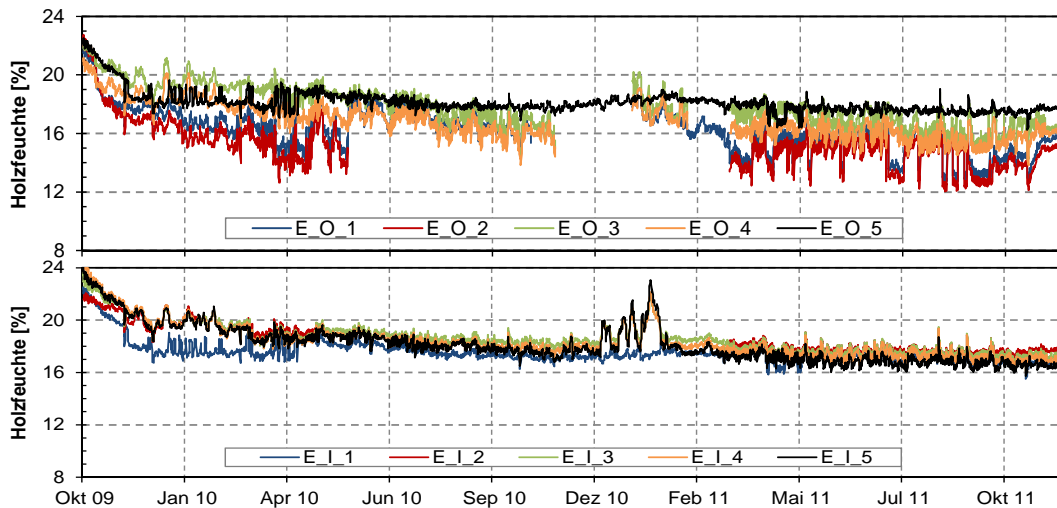


Abbildung 5-11: Holzfeuchte der Messgruppe E für die Brücke Muotathal

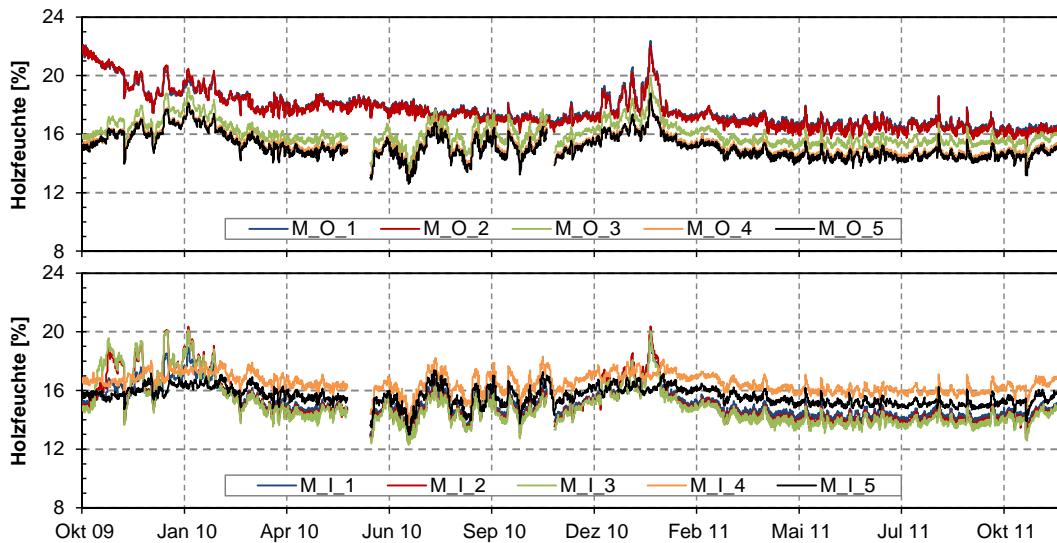


Abbildung 5-12: Holzfeuchte der Messgruppe M für die Brücke Muotathal

5.3 Brücke III: Obermatt

5.3.1 Grundlagen und eingesetzte Messtechnik

Als drittes Objekt im Rahmen des Forschungsvorhaben wurde die Brücke in Obermatt mit Messsensoren zur Überwachung der Holzfeuchteentwicklung ausgestattet, s. Abbildung 5-13. Diese Balkenbrücke aus den Jahren 2007/2008 hat eine Spannweite von 32 m und ist für eine Nutzlast von 40 Tonnen bemessen. Die Tragwerksplanung führten die Büros Paul Grunder AG und Raymond Weinmann aus. Die Obermattbrücke ist ein bestehendes Bauwerk, deshalb wurden hier alle Messsensoren nachträglich angebracht.



Abbildung 5-13: Brücke Obermatt

Der entworfene Messstellenplan für die Brücke Obermatt enthält insgesamt 16 Holzfeuchte-Messstellen, siehe Abbildung 5-14. Für die Temperaturkorrektur innerhalb der Feuchtemessung wurden an zwei Stellen zusätzliche Temperaturfühler ins Holz eingebracht. An der Brücke Obermatt erfolgte eine Differenzierung der Holzfeuchtemessungen zwischen den eingesetzten Werkstoffen, Brett-schichtholz und dem Holzwerkstoff Kerto. Die zur Bestimmung der Holzfeuchte erforderlichen Normkurven je Werkstoff wurden berücksichtigt. Abbildung 5-15 gibt einen Einblick in die an der bestehenden Brücke angebrachten Messtechnik.

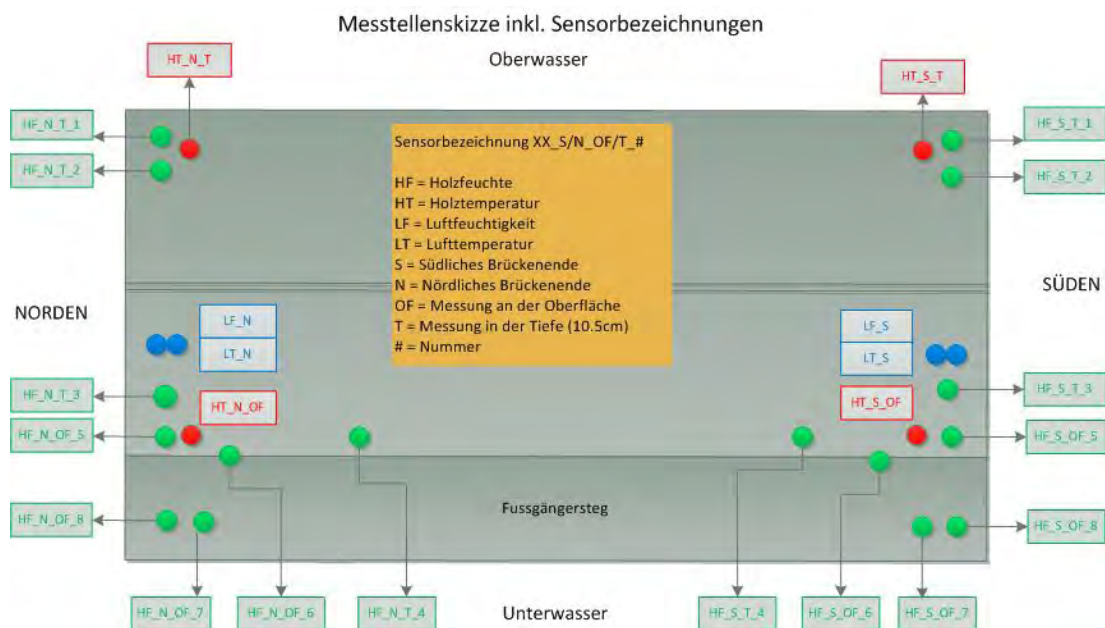


Abbildung 5-14: Messstellen-Plan Obermatt



Abbildung 5-15: Installation der Messtechnik Obermatt

Gegenüber den anderen überwachten Brücken konnte hier in Zusammenarbeit mit mageba SA eine Onlineübertragung der Messwerte erreicht werden. Hierzu wurde das remote-Sendesystem „Remote-fox“ der Firma Scantronik eingerichtet, welches für alle Messsensoren die Messdaten 1x wöchentlich per E-Mail an einen Server überträgt. Zusätzlich können alle Messergebnisse auf einer speziellen eingerichteten Webseite eingesehen werden, http://www.mageba.ch/robo_control.html (Login: rc06-om, Passwort: rc06-om-MaB). Die Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17 zeigen jeweils einen Screenshot der Webseite.

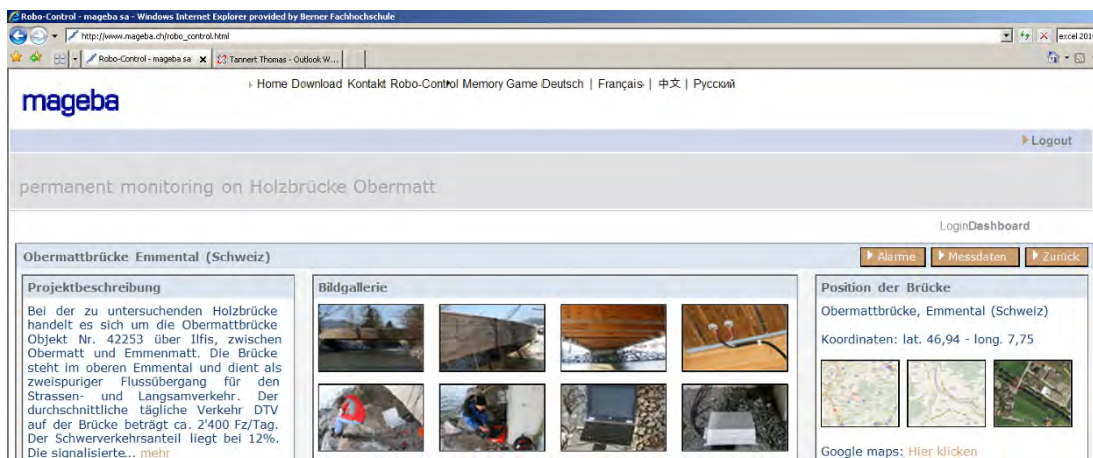


Abbildung 5-16: Screenshot webinterface Brücke Obermatt, Startseite

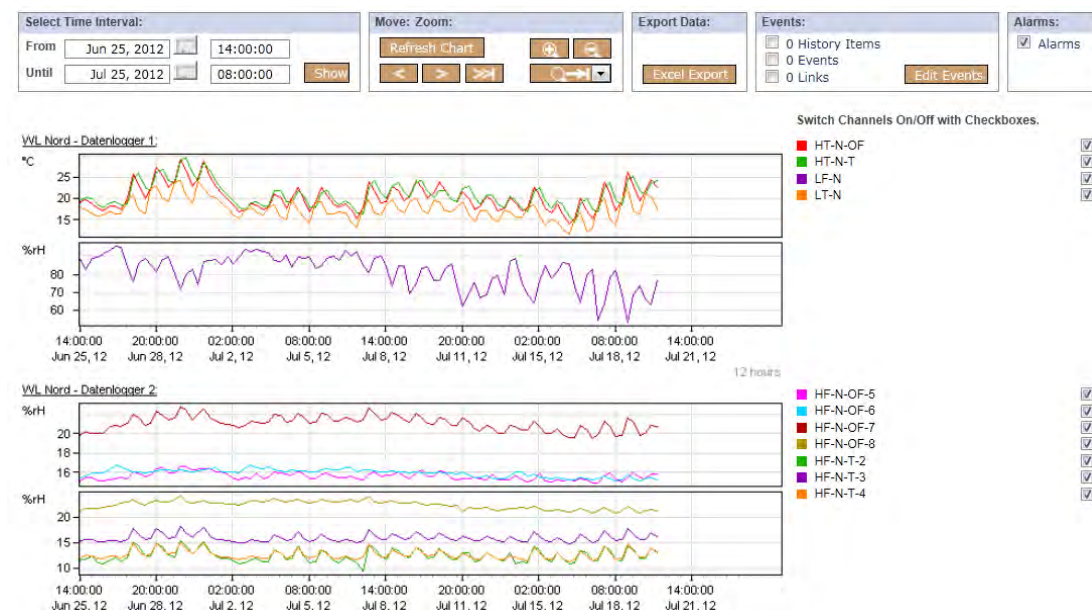


Abbildung 5-17: Screenshot webinterface Brücke Obermatt, Messwerte

5.3.2 Messergebnisse und deren Diskussion

Die an der Brücke Obermatt gewonnen Messergebnisse wurden für einen Zeitraum von insgesamt 17 Monate, beginnend im Dezember 2010, ausgewertet. Die Abbildung 5-19 zeigt die für diesen Zeitraum vorliegenden Klimasituationen und die rechnerisch einstellende Ausgleichsfeuchte im Holz. In Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21 sind für die zwei Messgruppen Nord und Süd und für die jeweiligen Messsensoren an der Oberfläche respektive in einer Tiefe von 105 mm die Holzfeuchtemessdaten zusammengefasst.

Erwartungsgemäss zeigen die Kurven der Holzfeuchte einen Verlauf, der den klimatischen Gegebenheiten der Jahreszeiten entspricht. So sind im Sommer die Holzfeuchten geringer und steigen über die Wintermonate wieder an. Dieses Verhalten ist für die oberflächlichen Sensoren (OF) der Messgruppen Nord und Süd sehr deutlich abzulesen. Die Messergebnisse der Gruppen Nord und Süd zeigen keine geografische Abhängigkeit der Holzfeuchte.

Die tieferliegenden Messsensoren (T) zeigen demgegenüber einen homogenen und kompakteren Verlauf der Holzfeuchte. Die Holzfeuchten an der Oberfläche schwanken über einen Jahresverlauf in einem Bereich von ca. 5 % während die tieferliegenden Messstellen maximal 2 % variieren. Der direkte Vergleich der mittleren Holzfeuchten zwischen den tieferliegenden Messsensoren und denen an der Oberfläche des Brettschichtholz führt zu einem Unterschied von 2.4 %. Die mittlere Holzfeuchte der tieferliegenden Messsensoren beträgt 14.9 % und für die Oberflächensensoren 17.3 %.

Der werkstoffspezifische Vergleich der Holzfeuchten zeigt, dass in diesem Objekt für Kerto (K) die Holzfeuchten im Durchschnitt tiefer sind als für Brettschichtholz. Die täglichen Schwankungen und der Verlauf über das ganze Jahr gesehen ist kongruent zu den Messungen im Brettschichtholz.

Der Messpunkt HF_N_T_1 zeigte bereits zu Beginn der Messungen im Dezember 2010 eine um ca. 8 % deutlich erhöhte Holzfeuchte von 23 % gegenüber den anderen Messsensoren der Messgruppe Nord, Abbildung 5-18. Bis Mitte Mai 2011 stieg die Holzfeuchte dieses Messpunktes auf 25 % an, während die anderen Messsensoren eine fallende Tendenz aufzeigten. Im August 2011 wurde ein extremer Feuchteanstieg auf ca. 78 % Holzfeuchte beobachtet. Aufgrund des stetig anhaltenden hohen Niveaus der Holzfeuchte wurde im November 2011 die Brücke vor Ort besichtigt. Die Überprüfung der Messsensoren und der Brückenkonstruktion zeigte, dass an dieser Stelle der vorgesehene bauliche Holzschutz nicht ausreichend war. Ein Wassereintritt infolge des Fahrbahnüberganges konnte nicht ausgeschlossen werden. Die Bauherrschaft wurde informiert und der Schadensursache wurde bereits begegnet.

Zusammenfassend liegen die gemessenen Holzfeuchtwerte, mit Ausnahme des Ausreissers HF_N_T_1, mit rund 20 % Holzfeuchte deutlich unterhalb des Fasersättigungspunktes und eine Gefährdung infolge von Pilzbefall liegt unter diesen Umständen nicht vor.

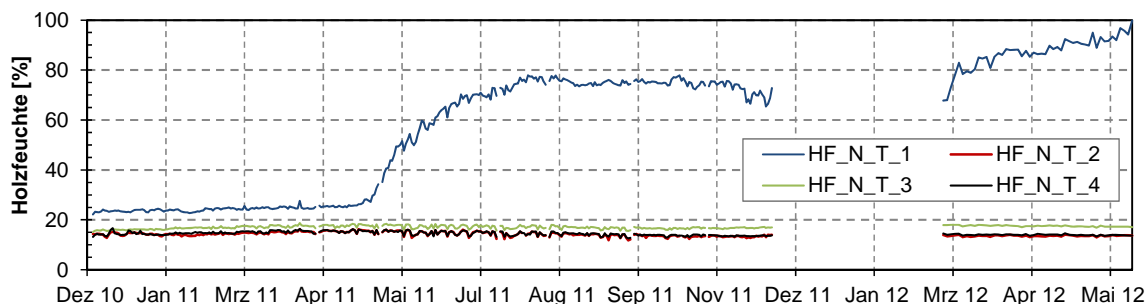


Abbildung 5-18: Holzfeuchte der Messgruppe Nord, Darstellung der Messergebnisse des Sensors HF_N_T_1

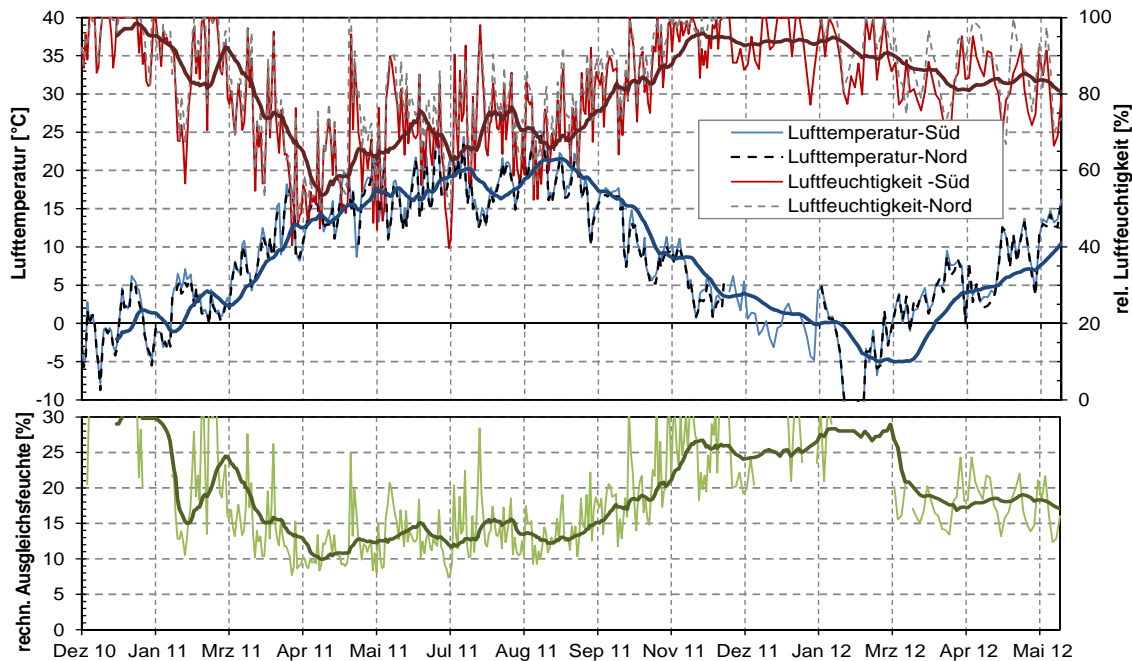


Abbildung 5-19: Klimasituation und korrespondierende Ausgleichsfeuchte für die Brücke Obermatt

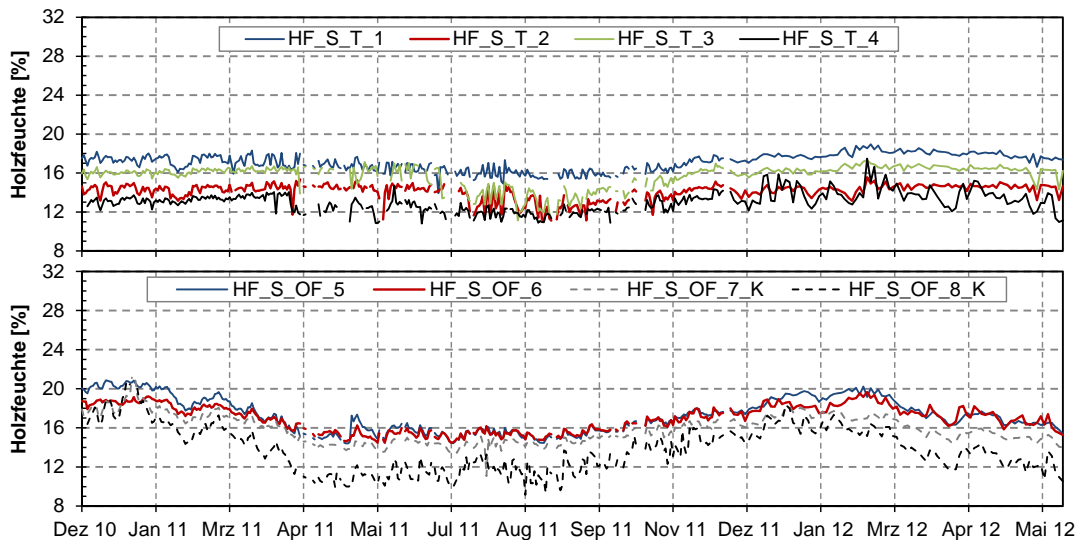


Abbildung 5-20: Holzfeuchte der Messgruppe Süd

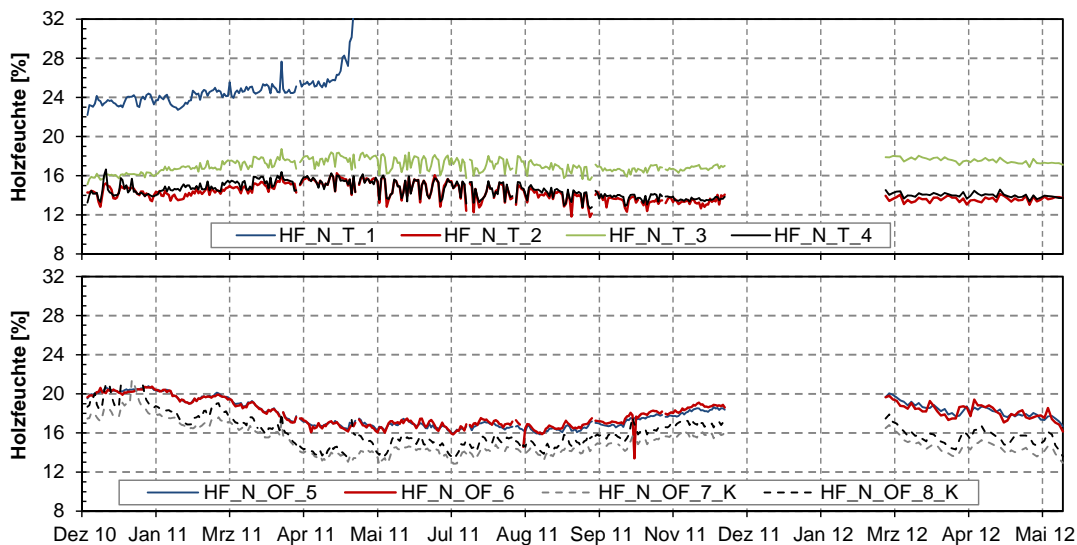


Abbildung 5-21: Holzfeuchte der Messgruppe Nord

5.4 Brücke IV: Schachenhaus

5.4.1 Generelles und eingesetzte Messtechnik

Die Schachenhaus-Brücke liegt im Emmental und führt über die Trub zwischen den Gemeinden Trubschachen und Trub. Es ist eine Holz-Beton-Verbundbau-Brücke, welche im Jahr 2000 erbaut wurde. Die Brücke hat eine Spannweite von 20.4 m und eine Fahrbahnbreite von 7 m. Die Brücke ist für eine Nutzlast von 40 t ausgelegt.



Abbildung 5-22: Nordwest-Ansicht der Schachenhausbrücke (www.hirsbrunner-holzbau.ch)

Zur Überwachung der Holzfeuchte wurde ein Messstellenplan mit acht Holzfeuchtemesssensoren und zwei Holztemperatursensoren zur späteren Temperaturkorrektur erarbeitet. Die Messstellen sind über die Fahrbahn breit verteilt und gliedern sich in Oberflächen- und Tiefensensoren. Die Tiefensensoren messen in einer Tiefe von 105 mm. Abbildung 5-23 zeigt den Messstellen-Plan für die Brücke Schachenhausen. Die Messtechnik zur Holzfeuchte ist auf der Nordost-Seite der Brücke angebracht und wurde durch zwei Sensoren zur Erfassung der Klimasituation vor Ort ergänzt. Die verwendete Messtechnik ist in diesem Fall das Gigamodul in Kombination mit dem Thermofox von der Firma Scantronic.

Messstellenskizze inkl. Sensorbezeichnungen

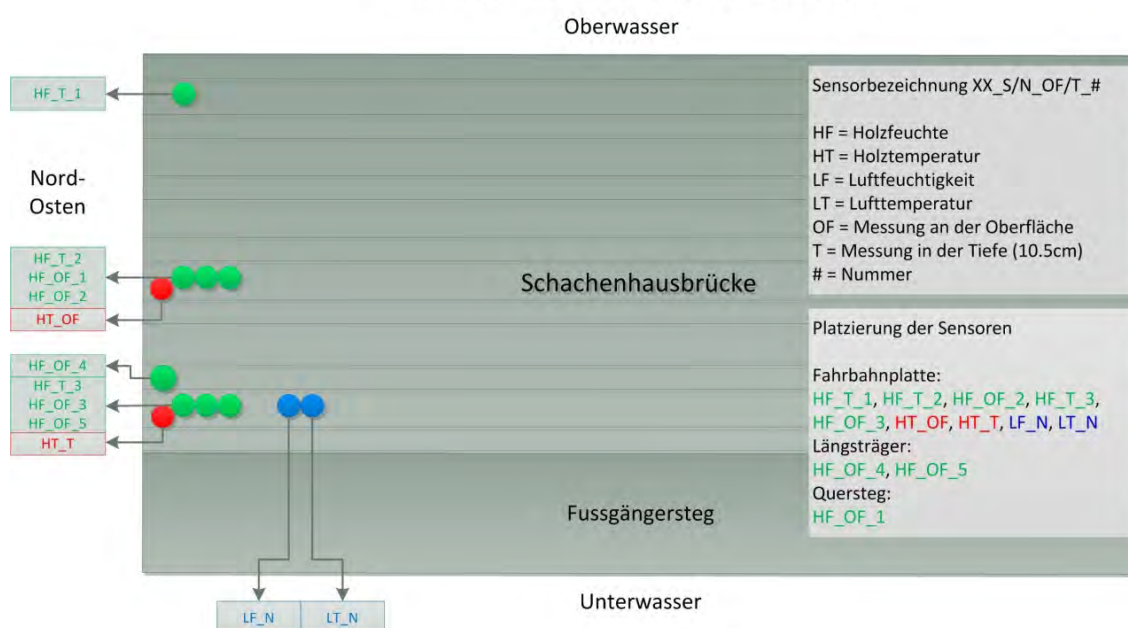


Abbildung 5-23: Messstellenplan der Brücke Schachenhausen

5.4.2 Messergebnisse und deren Diskussion

Die Überwachung der Holzfeuchteentwicklung der Brücke Schachenhausen begann im März 2011 und wurde für die nachfolgenden 9 Monate ausgewertet. Abbildung 5-24 zeigt die über diesen Zeitraum vorliegende Klimasituation und sich daraus rechnerisch ergebende Ausgleichsfeuchte im Holz. In Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26 sind die für die zwei Messtiefen gemessenen Holzfeuchten zusammengefasst. Der Vergleich der gemessenen Holzfeuchteverläufe übers Jahr folgt der rechnerischen Ausgleichsfeuchte und dem Verlauf der klimatischen Gegebenheiten. Im Sommer sinken die Holzfeuchten an der Oberfläche der Konstruktion ab und in den kalten Jahreszeiten steigen die Werte der Sensoren stärker an als für die tieferliegenden Messsensoren. Die gemessenen Holzfeuchten an der Oberfläche erhöhen sich während des Messzeitraums von Mai bis November um ca. 6 % während die tieferliegenden Messstellen geringere Schwankungen von ca. 4 % aufweisen.

Innerhalb der Messgruppen zeigen die Messsensoren an der Oberfläche einen sehr parallelen und konzentrierten Verlauf. Die zu Beginn verzeichnete Variation von 2 % reduziert sich im Messzeitraum auf 1 %. Die Messergebnisse der tieferliegenden Sensoren zeigen innerhalb der Datenreihen eine grössere Variation auf, die sich im Verlauf des Messzeitraums ebenfalls reduziert. Eine Divergenz zwischen den gemessenen Holzfeuchten der Messsensoren in der Fahrbahnplatte, in den Längsträgern und Querstegen innerhalb der Brückenkonstruktion konnte nicht erfasst werden.

Die Holzfeuchtwerte der Schachenhausbrücke liegen in einem idealen Bereich zwischen 13 % und 23 %. Die beiden äusseren Längsträger weisen farbliche Veränderungen auf, welche durch herabfließendes Wasser von der Strasse sowie teilweise von direkter Bewitterung und Spritzwasser herühren können. Diese Feuchte hat für die Holzträger bisher keine Folgen, da die Wassereinwirkung schnell wieder abtrocknen kann und die Aufnahme der Holzfeuchte in radialer/tangentialer Richtung geringer ist als in longitudinale Richtung von den Stirnseiten. Die für Brücken kritischen Stellen beim Fahrbahnübergang sind bis jetzt gut abgedichtet und schützen das anfällige Stirnholz ausreichend vor Feuchteeinflüssen.

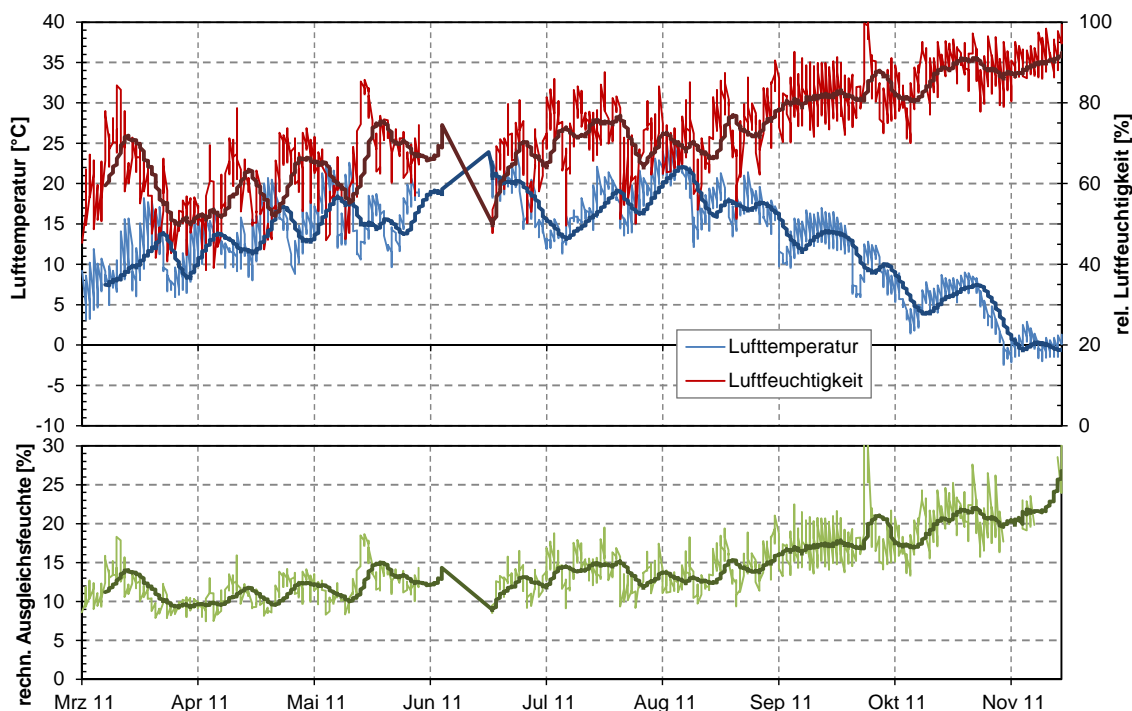


Abbildung 5-24: Klimasituation und korrespondierende Ausgleichsfeuchte für die Brücke Schachenhausen

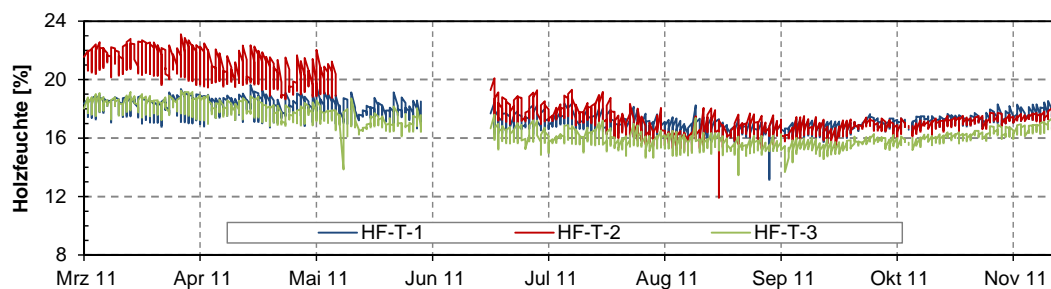


Abbildung 5-25: Holzfeuchte der tieferliegenden Messgruppe

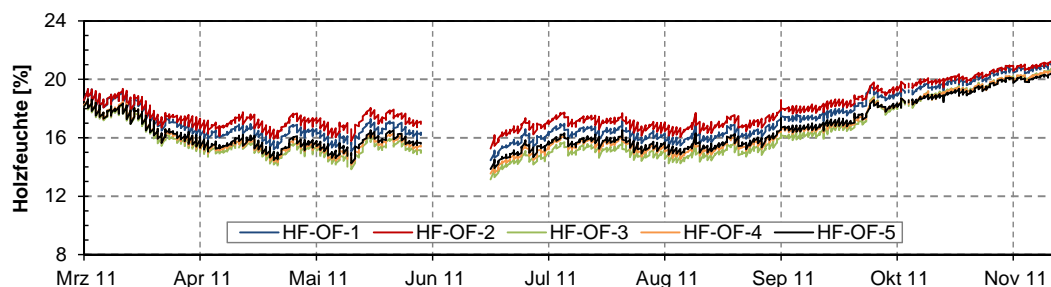


Abbildung 5-26: Holzfeuchte der Messgruppe an der Oberfläche

5.5 Zusammenfassung zu den Brückenmessungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten vier Brücken mit Messtechnik zur Erfassung der Holzfeuchteentwicklung über den jahreszeitlichen Verlauf ausgestattet werden. Die Holzbrücken liegen regional verschieden in der Schweiz. Zum einem wurde die Messtechnik vor der Errichtung in zwei Brückenkonstruktionen eingebaut und zum anderem konnte die erforderliche Messtechnik an zwei Brücken nachträglich installiert werden. Eine Brücke konnte mit einem „Remotekontrollsystem“ zusätzlich ausgestattet werden, welches die Onlineübertragung der Daten ermöglicht.

Die Holzfeuchteentwicklung an den überwachten Brücken passte sich generell an die wechselnden klimatischen Beanspruchungen an. Die regional verschieden vorliegenden Klimasituationen zeigen keine nennenswerten Unterschiede. Die Verläufe der Holzfeuchte lagen im Mittel auf dem Niveau der rechnerischen Ausgleichsfeuchte. Lokal auftretende schnelle klimatische Änderungen spiegeln sich in dem Feuchtegehalt des Holzes nur reduziert wieder. Erst langanhaltende Auffeuchtungen, wie in den Wintermonaten, führten zu einem Anstieg der Holzfeuchte in den Brückenquerschnitten. Hierbei reagieren die an den Oberflächen installierten Messsensoren zügiger als die im Querschnittsinneren tieferliegenden Sensoren. Faktoren wie die Belüftung der Brückenunterseite, Ausrichtung, Abstand zum Wasser, Schneefall o. a. können die Höhe und die Schwankungen der Holzfeuchten ebenso beeinflussen.

Die gemessenen Holzfeuchtebereiche lagen in der Regel in allen Fällen stets unterhalb des für einen Pilzbefalls gefährlichen Bereichs. Im Mittel wurde für die betrachteten Objekte eine maximale Höchstgrenze von 20 % Holzfeuchte festgestellt.

Im Projekt konnte durch das Monitoring der Holzfeuchte ein abnormaler Anstieg an einem Messsensor an der Brücke Obermatt frühzeitig erfasst werden. Durch diese regelmässige Überwachung der Holzfeuchteentwicklung und der örtlichen durchgeführten Kontrolle konnte hierdurch ein nicht ausreichender baulicher Holzschutz rechtzeitig erkannt und behoben werden. Dies bestätigt die Notwendigkeit von regelmässig durchzuführenden Überprüfungen von Brückentragwerken für eine langjährige Standzeit. Gleichzeitig zeigt es aber auch, dass mit Hilfe relativ einfach applizierter Messtechnik die Werterhaltung deutlich erhöht werden kann.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

6.1 Resümee

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war es das Ziel, die Änderungen der Holzfeuchte in blockverleimten Brettschichtholz langfristig zu erfassen. Die Auswirkungen der jahreszeitlich bedingten klimatischen Wechsel der Beanspruchungssituation resultieren in einer Veränderung der sich einstellenden Ausgleichsfeuchte im Holz. Für die Umsetzung des Forschungsvorhabens musste in einem ersten Schritt geeignete Messtechnik gewählt und definiert werden. Zur Messung der Holzfeuchte wurde die anerkannte indirekte Methode der Widerstandsmessung im Holz gewählt. Als Messsensoren bewährten sich isolierte Chromstahl-Schrauben, die sehr einfach durch die Anpassung der Schraubenlänge Messungen in unterschiedlichen Querschnittstiefen ermöglichen. Zur Messung und Aufzeichnung des Widerstandes wurden zwei verfügbare Datenloggersysteme der Firma Scantronic verwendet. Anhand der gewonnenen Langzeitmessergebnisse konnten qualitative Unterschiede zwischen den zwei Systemen festgestellt werden. Das System Gigamodul sowie die parallel eingesetzte Sorptionsisothermenmethode haben sich durch die erreichte Messkontinuität und Messgenauigkeit in diesem Forschungsvorhaben für Langzeitmessungen ausgezeichnet.

Die Messungen der Holzfeuchteentwicklung zu verschiedenen äusseren Klimabeanspruchungen unterteilen sich im Forschungsprojekt in Laborversuche an einem blockverleimten Prüfkörper und in Insitu-Messungen an nationalen Brückenkonstruktionen aus Holz. Im Rahmen der Messungen an Brückenkonstruktionen wurde sich auf die Holzfeuchteentwicklung und das vorherrschende Klima konzentriert. Demgegenüber wurden in den Laborversuchen an dem Prüfkörper zusätzlich zu den installierten Holzfeuchtemesssensoren Messtechnik zur Erfassung der äusseren Dimensionsänderungen, der Entstehung von Rissen und zur Aufnahme von inneren Dehnungen eingesetzt.

Die Auswertung der Messergebnisse der Langzeitüberwachungen von Holzbrückentragwerken ergab, dass die Holzfeuchte auf die jahreszeitlich wechselnden Klimasituationen reagiert. Die Anpassung der Holzfeuchte ist zeitlich verzögert und die Niveauunterschiede sind verhältnismässig gering. Der vorhandene Unterschied der Holzfeuchteverläufe zwischen den Messsensoren an der Oberfläche und den im Querschnittsinneren tieferliegenden Messsensoren bestätigt die formal bekannte Annahme, dass in den Randzonen eine relativ schnelle Reaktion der Holzfeuchte gegenüber dem Querschnittsinneren auftritt. Insgesamt überschreiten die gemessenen Werte im Mittel nicht 20 % Holzfeuchte und liegen demnach nie in einem für Pilzbefall kritischen Bereich. Die Langzeitmessung der Holzfeuchte im Projekt führte aber auch zum frühzeitigen Erkennen und Begegnen eines an der Brücke Obermatt erfassten abnormalen Anstieges der Holzfeuchte. Die Methodik im Projekt bestätigt zum einem, dass Brückenwerke für eine langjährige Standsicherheit regelmässig überprüft und kontrolliert werden müssen und zum anderen, dass die Werterhaltung durch ein Brückenmonitoring deutlich erhöht werden kann.

Die reduzierte Reaktion des Holzes auf wechselnde klimatische Veränderungen bestätigte sich auch in den Laborversuchen. Der hier verwendete blockverleimte Prüfkörper zeigte in der ersten Messperiode, die eine extreme Auffeuchtung widerspiegelt, ebenfalls ein niedrigeres Niveau der gemessenen Holzfeuchte gegenüber der sich rechnerisch einstellenden Ausgleichsfeuchte infolge der Klimabeanspruchung. Eine detaillierte Spezifizierung der Holzfeuchteentwicklung über die Materialachsen im Holz konnte durch die fehlende Messkontinuität und die Unterschiede in der Messqualität nicht erreicht werden. Gleiches gilt für die Beziehung zwischen der inneren und äusseren Querschnittsänderung in Bezug auf Änderungen der Holzfeuchte. Die hier im Projekt gewonnenen Messwerte über die Entwicklung der äusseren und inneren Dehnungen geben einen ersten Einblick in die Spannungs-Dehnungsbeziehung im Holz infolge von Holzfeuchtegefällen. Generell lagen die an diesem Prüfkörper erreichten Dehnungswerte sowie Ausdehnungskoeffizienten unterhalb der rechnerischen Niveaus.

6.2 Ausblick

Die im Projekt durchgeführten Messungen zur Holzfeuchteentwicklung sowie zur Änderungen der Dimensionen bestätigen die bisher nur formal angenommenen Auswirkungen. Die ersten tendenziell erreichten Verläufe der Holzfeuchte über die Querschnittsbreite geben zu dem einen Überblick zum Grad der Reaktion des Holzes. Die äusserst positiven ersten Ergebnisse müssten in weiterführenden Forschungsvorhaben durch verfeinerte Messungen mit einer höheren Messstellendichte, -genauigkeit und -kontinuität ergänzt und überprüft werden. Ferner sind die im Labor durchgeführten Prüfungen mit unterschiedlichen Prüfkörperquerschnitten und zudem mit abwechselnden extremen Klimasituationen zu ergänzen.

Zur Gewinnung von Anhaltswerten für kritische Zustände der Holzfeuchteverteilung und daraus resultierenden kritischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen respektive Rissentwicklungen im Querschnittsinneren sind noch tiefgründige und umfangreiche Prüfungen durchzuführen. Aufbauend auf den hier erreichten Ergebnissen könnten die Modellbildung und die Erarbeitung von Sensibilitätsanalysen des Holzes wichtige zukünftige Schritte sein.

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 Abteilungsleiters F+E und des Projektverantwortlichen gültig.

7.1 Umfang des Berichts

Dieser Forschungsbericht besteht aus dem Titelblatt, dem Abstract und 54 Seiten inkl. Anhang.

8 VERZEICHNISSE

8.1 Literaturverzeichnis

Brischke, C. (2007) Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufs an ausgewählten Bauteilen der Fussgängerbrücke in Essing, Arbeitsbericht, Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft.

Evans, F., Keppe, O., Dyken, T. (2006) Monitoring of Timber bridges in Norway – Results report, Norsk Treteknisk Institut Oslo, Norwegen.

Fibersensing (2012) Technologie, Produkte & Lösungen, <http://www.fibersensing.com/>

Kasal, B., Tannert, T. (2010) RILEM Technical Committee on In-Situ Assessment of Structural Timber, Advanced Materials Research Vols. 133-134, pp. 271-274.

Kießl, K., Steinbach, S. (2006) Feuchteschutz – das immerwährende Thema der Bauphysik. In WTA Almanach 2006, Bausintandes nd Bauphysik, München.

Keylwerth, R., Noack, D. (1956) Über den Einfluss höherer Temperaturen auf elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip, Holz als Roh- und Werkstoff, 14, S. 162-172.

Keylwerth, R. (1949) Einfache Kontrollmessung bei der Holz Trocknung. Holz-Zentralblatt (75), S. 307-309.

Liebold, P. (2011) Zustandserfassung bei Holzstrassenbrücken, Modularbeit, Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Biel.

Müller, A., Vogel, M. (2009) Überwachung von Holztragwerken, Baublatt Nr. 38, S. 38-39.

Niemz, P. (2005) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe IFB.

Neuhaus, F. H. (1981) Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit der Holzfeuchte, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 81-8.

Scantronik (2012) DatenloggerMesssysteme und Datenloggerzubehör, <http://www.scantronik.de/>

Schärmacher, F., Müller, A. (2012) Erfahrungen und Konsequenzen aus der Langzeitüberwachung von Holzbrücken, Brückenbau Symposium: Grünbrücken aus Holz – Wirtschaftliche Umsetzung des Generalwildwegeplans, 16. Februar, Stuttgart

Tannert, T., Müller, A., Vogel, M. (2010) Structural health monitoring of timber bridges, International Conference on Timber Bridges (ITCB 2010).

Tannert, T., Müller, A., Vogel, M. (2010) Stopping the Rot, Research into timber bridge degradation is aimed at improving structural health monitoring of these structures, Bd & e, Issue 60, pp. 72-73.

Tannert, T., Bohumil, K., Anthony, R. (2010) RILEM TC 215 In-situ assessment of structural timber: Report on activities and application of assessment methods, World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Italy.

Tannert, T., Müller, A., Vogel, M., Kehl, D. (2009) Long-term moisture measurement of block-glued-laminated elements in a timber bridge, 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-4), Zurich, Switzerland.

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

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Zeitplan für das Forschungsprojekt	10
Abbildung 4-1: Holzfeuchtemesstechnik (links) und Holzfeuchte-Sensoren (rechts)	11
Abbildung 4-2: Applizierte Riss-Sensoren bei einem Vorversuch an einer Brücke	12
Abbildung 4-3: Probekörper mit Glasfaser-Dehnungs-Sensoren, während der Herstellung (links) und nach der Blockverleimung (rechts)	13
Abbildung 4-4: Prinzipielle Darstellung des definierten Prüfkörpers von einem Brückenträger	13
Abbildung 4-5: Fertiggestellter Prüfkörper mit installierte Messtechnik	13
Abbildung 4-6: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene1, Gruppen A, B	15
Abbildung 4-7: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene 2, Gruppen C, D	15
Abbildung 4-8: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene3, Gruppen F, E	15
Abbildung 4-9: Position der Messsensoren für die Holzfeuchte für Messebene3, Gruppen E, F	15
Abbildung 4-10: Dehnungsmesssensoren im blockverleimtem Prüfkörper	16
Abbildung 4-11: Position der Messsensoren für die Dehnungen in Messebene 1	16
Abbildung 4-12: Position der Messsensoren für die Dehnungen in Messebene 2	16
Abbildung 4-13: Applizierter Wegsensor (oben) und eingesetzte Rissensoren am Prüfkörper (unten)	17
Abbildung 4-14: Position der Wegmesssensoren für die äussere Dimensionsänderung	17
Abbildung 4-15: Position der Rissensoren für die Erfassung von äusseren Dehnungen/Rissen	17
Abbildung 4-16: Messklima innerhalb der zwei untersuchten Messperioden	18
Abbildung 4-17: Rechnerische Ausgleichsfeuchte im Holz aus dem Umgebungsklima	18
Abbildung 4-18: Holzfeuchteentwicklung am Sensor F_250 anhand der Sorptionsisothermenmethode ...	18
Abbildung 4-19: Vergleich von Sorptionsisothermenmethode und Widerstandsmethode	19
Abbildung 4-20: Vergleich für die Widerstandsmethode zwischen Gigamodul und Multisensor	19
Abbildung 4-21: Gemessene Holzfeuchte der Gruppe A im Vergleich zur rechnerischen Ausgleichsfeuchte aus dem Umgebungsklima	19
Abbildung 4-22: Messzeiträume der Messperiode 1	20
Abbildung 4-23: Messzeiträume der Messperiode 2	20
Abbildung 4-24: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe A, der Messebene 1 für die Messperiode 1	20
Abbildung 4-25: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe A, der Messebene 1 für die Messperiode 2	20
Abbildung 4-26: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe D, der Messebene 2 für die Messperiode 1	20
Abbildung 4-27: Holzfeuchteverlauf in tangentialer Richtung der Messgruppe D, der Messebene 2 für die Messperiode 2	20
Abbildung 4-28: Holzfeuchteverlauf in radialer Richtung der Messgruppe A,B, der Messebene 1 für die Messperiode 1	21
Abbildung 4-29: Holzfeuchteverlauf in radialer Richtung der Messgruppe C,D, der Messebene 1 für die Messperiode 1	21
Abbildung 4-30: Holzfeuchteverlauf in longitudinaler Richtung der Messgruppe E, der Messebene 3 für die Messperiode 1	21
Abbildung 4-31: Holzfeuchteverlauf in longitudinaler Richtung der Messgruppe E, der Messebene 3 für die Messperiode 2	21
Abbildung 4-32: Gemessener und rechnerischer Dehnungsverlauf in radiale Richtung sowie Rissentstehung für den gesamten Messzeitraum	22
Abbildung 4-33: Innere Dehnungen der Messebene 1 und 2 für die Messperiode 1	23
Abbildung 4-34: Holzfeuchte-Dehnungsbeziehung für die Messsensoren A_200_HD, B_200_HD und A_400_HD	23
Abbildung 5-1: Überführung in Horen mit blockverleimten BSH Trägern	25
Abbildung 5-2: Messstellen-Plan für die Brücke Horen	25
Abbildung 5-3: Installation der Messtechnik für die Brücke Horen	26
Abbildung 5-4: Klimasituation und korrespondierende rechnerische Ausgleichsfeuchte im Holz für die Brücke Horen	27

Abbildung 5-5: Holzfeuchte der Messgruppe E für die Brücke Horen.....	27
Abbildung 5-6: Holzfeuchte der Messgruppe M für die Brücke Horen	27
Abbildung 5-7: Bogenbrücke in Muotathal mit blockverleimten BSH-Trägern	28
Abbildung 5-8: Messstellen-Plan Muotathal (Ansicht und Draufsicht)	28
Abbildung 5-9: Installation der Messtechnik Muotathal, links Messsensoren, rechts Position der Datenlogger.....	29
Abbildung 5-10: Klimasituation und korrespondierende Ausgleichsfeuchte für die Brücke Muotathal ...	30
Abbildung 5-11: Holzfeuchte der Messgruppe E für die Brücke Muotathal.....	30
Abbildung 5-12: Holzfeuchte der Messgruppe M für die Brücke Muotathal	30
Abbildung 5-13: Brücke Obermatt	31
Abbildung 5-14: Messstellen-Plan Obermatt.....	31
Abbildung 5-15: Installation der Messtechnik Obermatt.....	32
Abbildung 5-16: Screenshot webinterface Brücke Obermatt, Startseite	32
Abbildung 5-17: Screenshot webinterface Brücke Obermatt, Messwerte.....	32
Abbildung 5-18: Holzfeuchte der Messgruppe Nord, Darstellung der Messergebnisse des Sensors HF_N_T_1.....	33
Abbildung 5-19: Klimasituation und korrespondierende Ausgleichsfeuchte für die Brücke Obermatt..	34
Abbildung 5-20: Holzfeuchte der Messgruppe Süd.....	34
Abbildung 5-21: Holzfeuchte der Messgruppe Nord	34
Abbildung 5-22: Nordwest-Ansicht der Schachenhausbrücke (www.hirsbrunner-holzbau.ch).....	35
Abbildung 5-23: Messstellenplan der Brücke Schachenhausen	35
Abbildung 5-24: Klimasituation und korrespondierende Ausgleichsfeuchte für die Brücke Schachenhausen	36
Abbildung 5-25: Holzfeuchte der tieferliegenden Messgruppe.....	37
Abbildung 5-26: Holzfeuchte der Messgruppe an der Oberfläche	37

8.3 Tabellenverzeichnisse

Tabelle B-1: Messsensoren mit Zuordnung der Messtechnik	43
---	----

Anhang A: LABORVERSUCHE

A.1 Messpositionen und Messplan

Tabelle B-1: Messsensoren mit Zuordnung der Messtechnik

Messebene		Name	Position R/T/L [mm]	Messgrösse	Messgerät
Messebene 1	1	A_20_HF	745/20/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	2	A_85_HF	660/85/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	3	A_180_HF	745/180/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	4	A_285_HF	660/285/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	5	A_380_HF	745/380/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	6	A_200_HD	720/195/50	Holzdehnung	Fibersensing
	7	A_200_HT	75/195/50	Holztemperatur	Fibersensing
	8	A_400_HD	720/395/50	Holzdehnung	Fibersensing
	9	A_400_HT	75/395/50	Holztemperatur	Fibersensing
	10	B_20_HF	365/20/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	11	B_85_HF	280/85/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	12	B_180_HF	365/180/50	Holzfeuchte	Gigamodul mit Thermofox 3
	13	B_285_HF	280/285/50	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 2
	14	B_380_HF	365/380/50	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 2
	15	B_200_HD	335/195/50	Holzdehnung	Fibersensing
	16	B_400_HD	335/395/50	Holzdehnung	Fibersensing
Messebene 2	17	C_20_HF	745/20/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	18	C_85_HF	660/85/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	19	C_180_HF	745/180/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	20	C_285_HF	660/285/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	21	C_380_HF	745/380/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	22	C_200_HD	720/195/500	Holzdehnung	Fibersensing
	23	C_200_HT	75/195/500	Holztemperatur	Fibersensing
	24	C_400_HD	720/395/500	Holzdehnung	Fibersensing
	25	C_400_HT	75/395/500	Holztemperatur	Fibersensing
	26	D_20_HF	365/20/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	27	D_85_HF	280/85/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	28	D_180_HF	365/180/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 1
	29	D_285_HF	280/285/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 2
	30	D_380_HF	365/380/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 2
	31	D_200_HD	335/195/500	Holzdehnung	Fibersensing
	32	D_400_HD	335/395/500	Holzdehnung	Fibersensing
	33	D_200_HT	335/195/500	Holztemperatur	Gigamodul mit Thermofox 3
	34	D_400_HT	335/395/500	Holztemperatur	Gigamodul mit Thermofox 3
Messebene 3	35	E_20a_HF	700/580/20	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 4
	36	E_50_HF	700/580/50	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 4
	37	E_100_HF	700/580/100	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 4
	38	E_200_HF	700/580/200	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 4
	39	E_500_HF	700/580/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 4
	40	F_20a_HF	400/580/20	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 3
	41	F_20b_HF			Multisensor mit Materialfox 3
	42	F_50_HF	400/580/50	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 3
	43	F_100_HF	400/580/100	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 3
	44	F_200_HF	400/580/200	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 3
	45	F_500_HF	400/580/500	Holzfeuchte	Multisensor mit Materialfox 3
	46	F_250_HLT	450/595/250	Lufttemperatur	Thermofox 4
	47	F_250_HLF	450/595/250	Luftfeuchte	Thermofox 4
Aussenseite	48	Rissfox 1	-/0/10	Widerstand	
	49	Rissfox 2	-/0/40	Widerstand	
	50	Wegsensor1	-/0/80	Weg	Potentiometrischer Wegsensor
	51	Wegsensor 2	-/0/460	Weg	Potentiometrischer Wegsensor
	52	Hygrofox		Lufttemperatur Luftfeuchte	

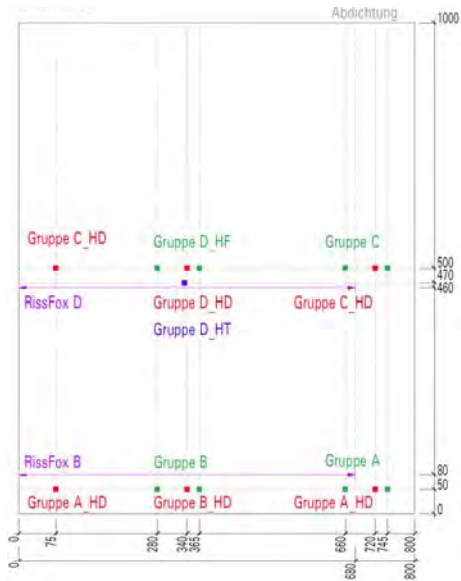


Abbildung B-1: Messgruppen A, B, C, D, RL-Ansicht

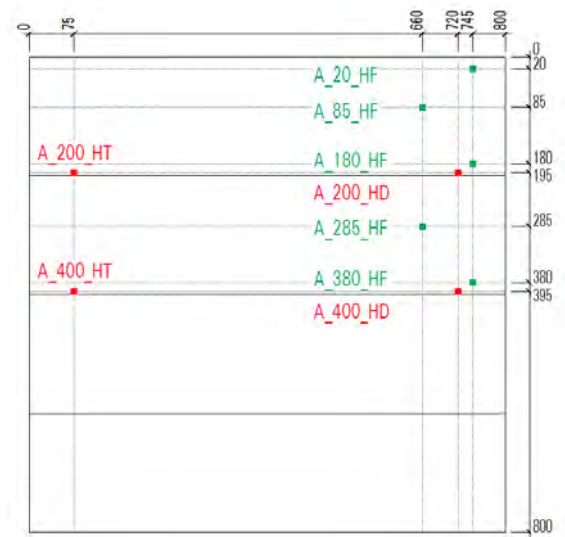


Abbildung B-2: Messgruppe Gruppe A, RT-Ansicht

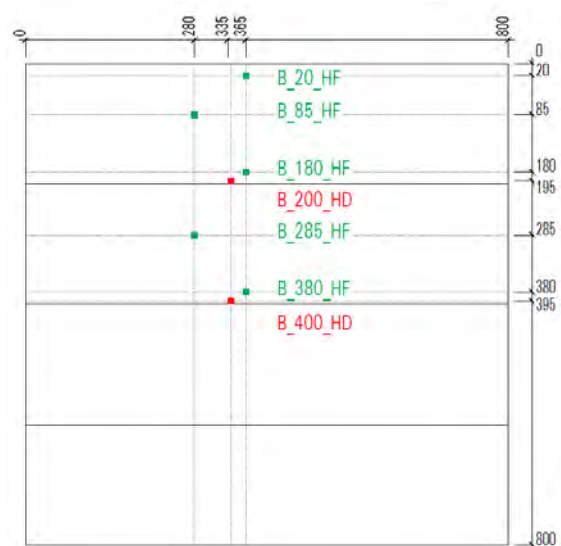


Abbildung B-3: Messgruppe Gruppe B, RT-Ansicht

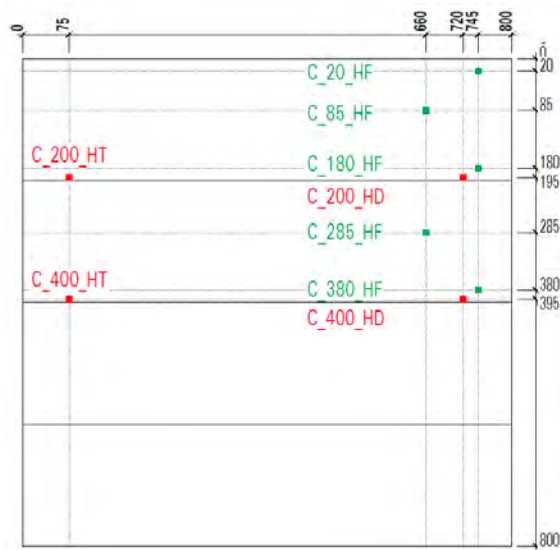


Abbildung B-4: Messgruppe Gruppe C, RT-Ansicht

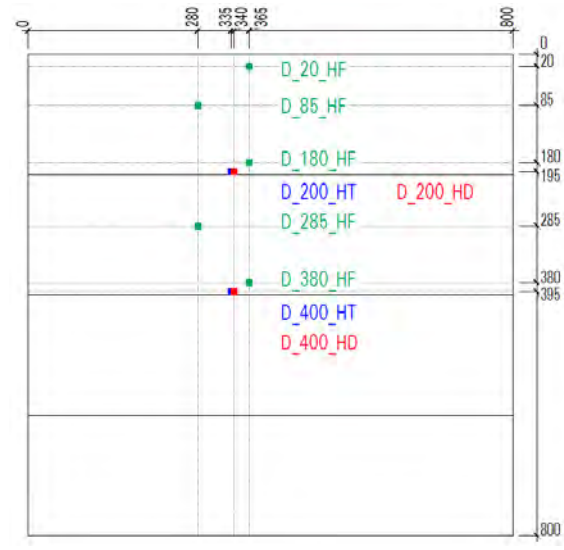


Abbildung B-5: Messgruppe Gruppe D, RT-Ansicht

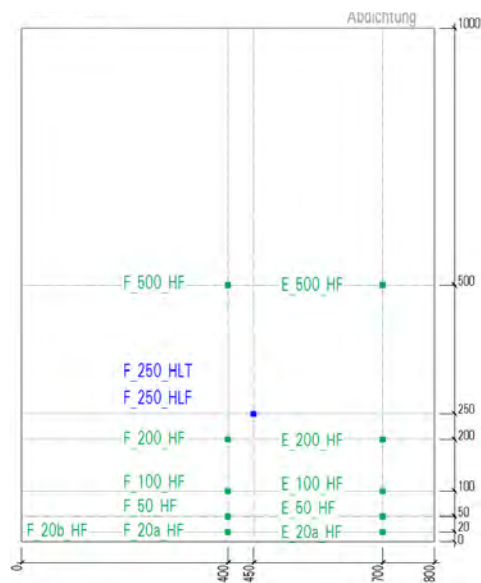


Abbildung B-6: Messgruppen E und F, RL-Ansicht

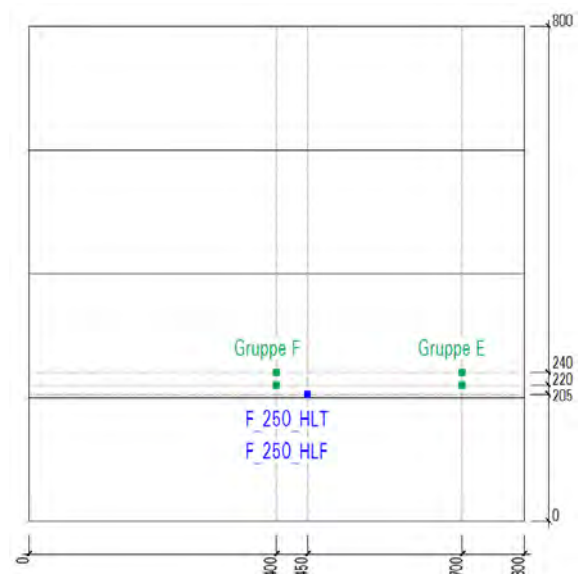
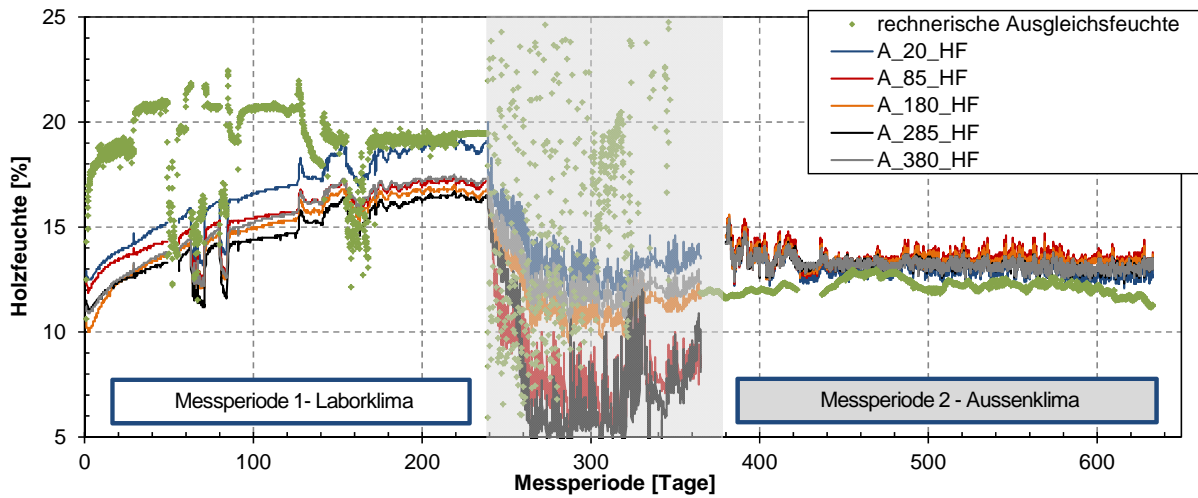


Abbildung B-7: Messgruppen E und F, RT-Ansicht

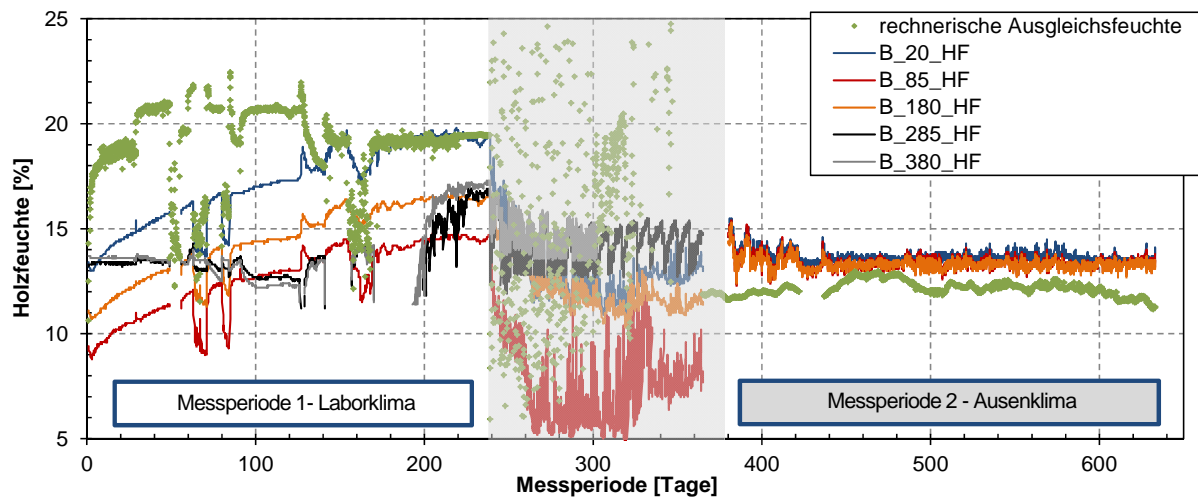
A.2 Ergebnisse zu den Labormessungen

A.2.1 Holzfeuchtemessung

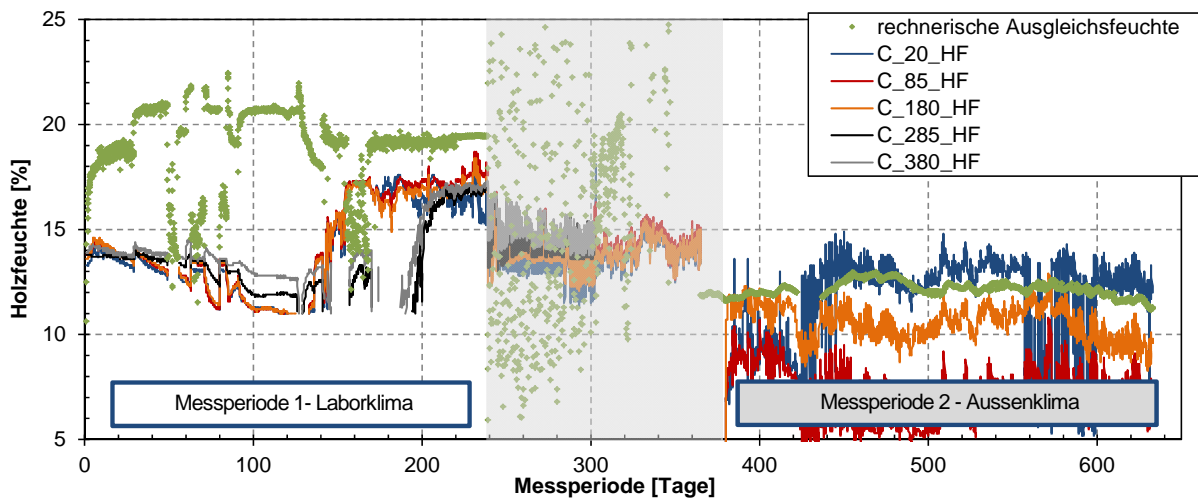
Messebene 1, Gruppe A



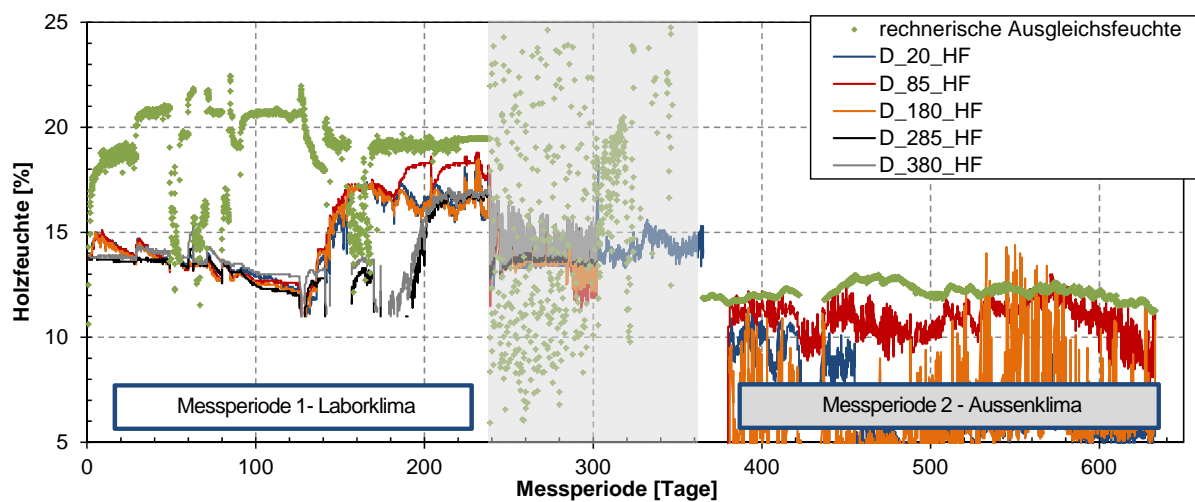
Messebene 1, Gruppe B



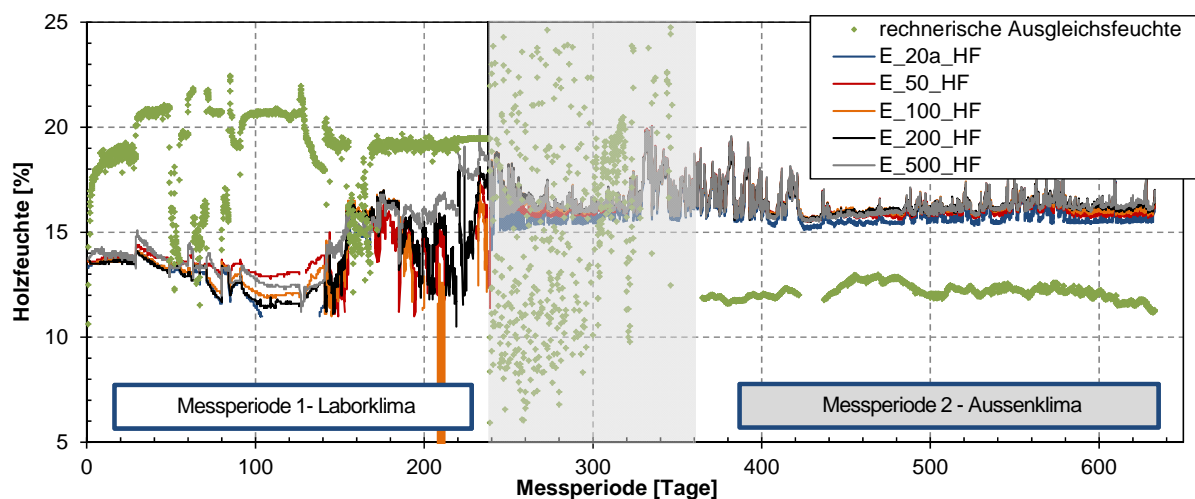
Messebene 2, Gruppe C



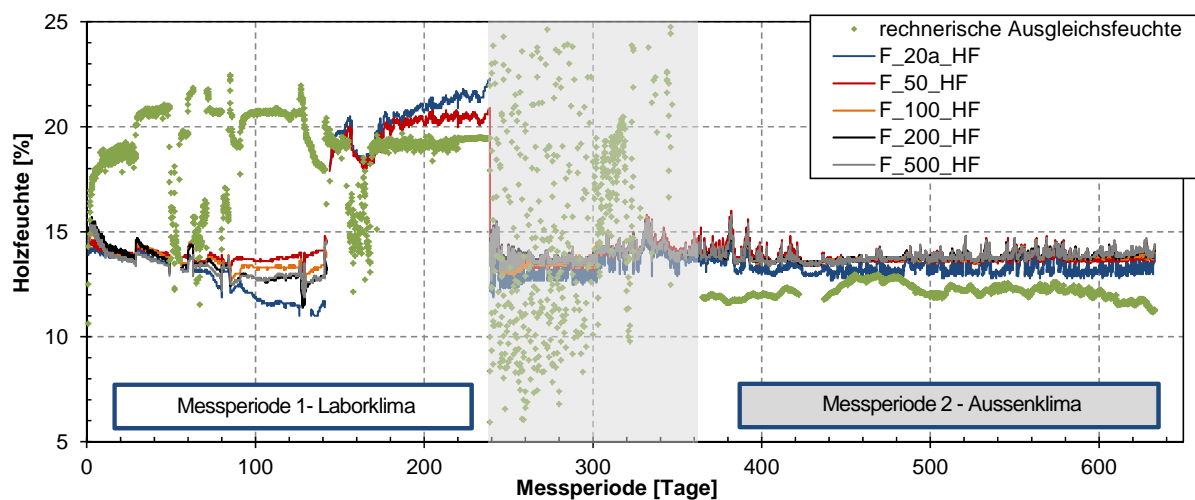
Messebene 2, Gruppe D



Messebene 3, Gruppe E

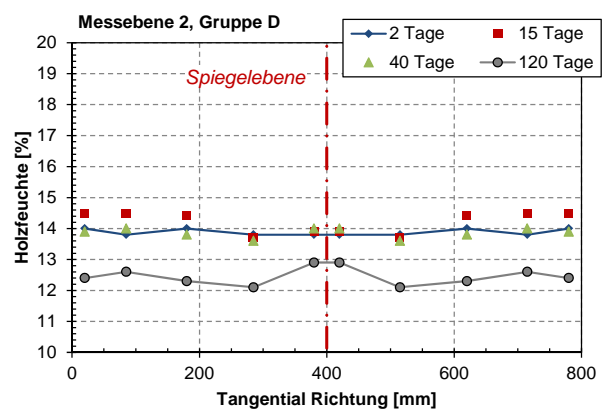
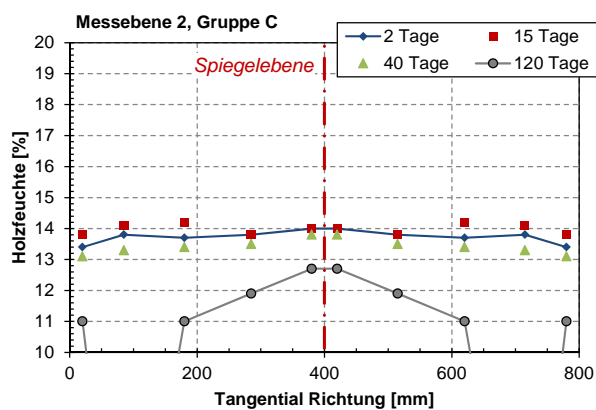
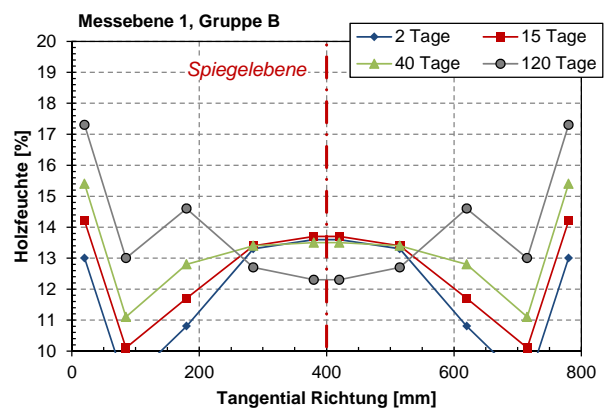
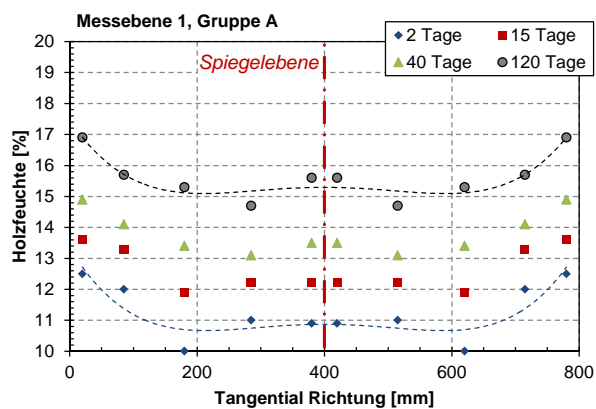
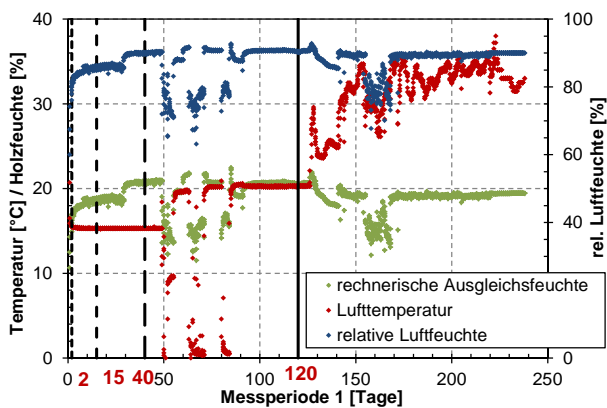


Messebene 3, Gruppe F

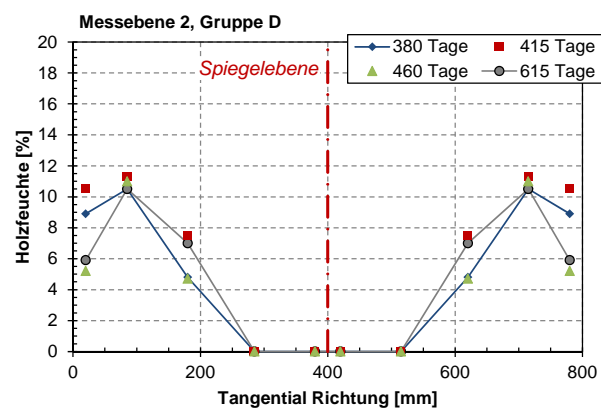
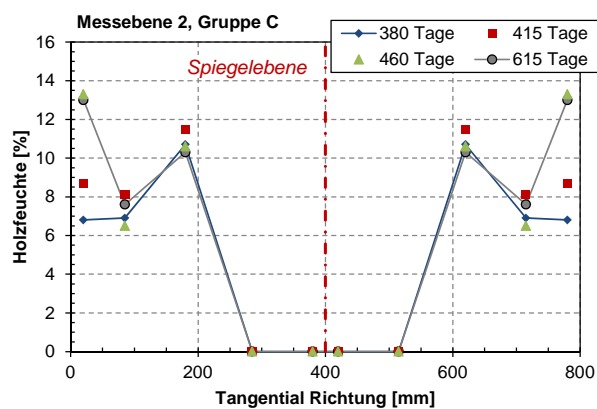
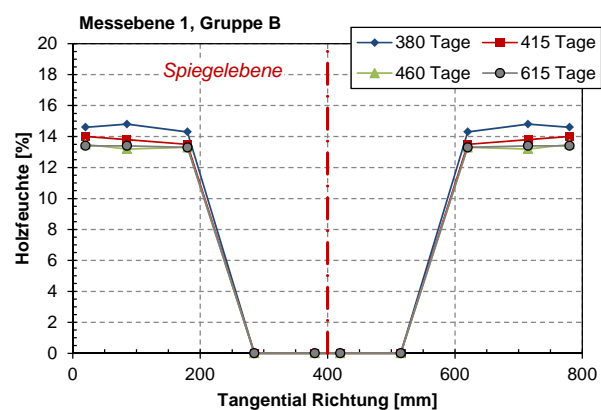
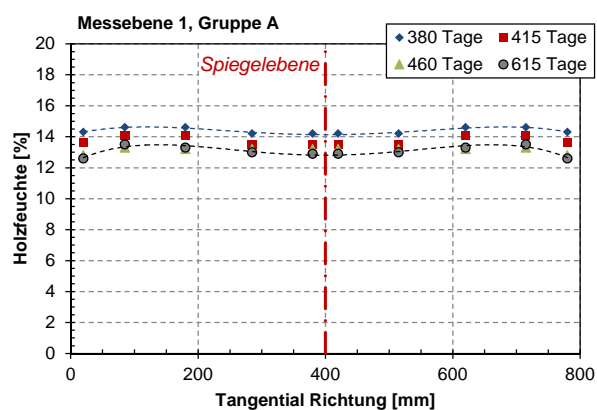
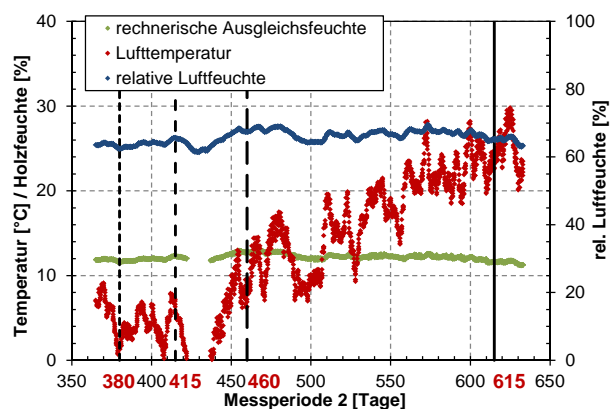


A.2.2 Holzfeuchteentwicklung in tangentialer Richtung

Messperiode 1

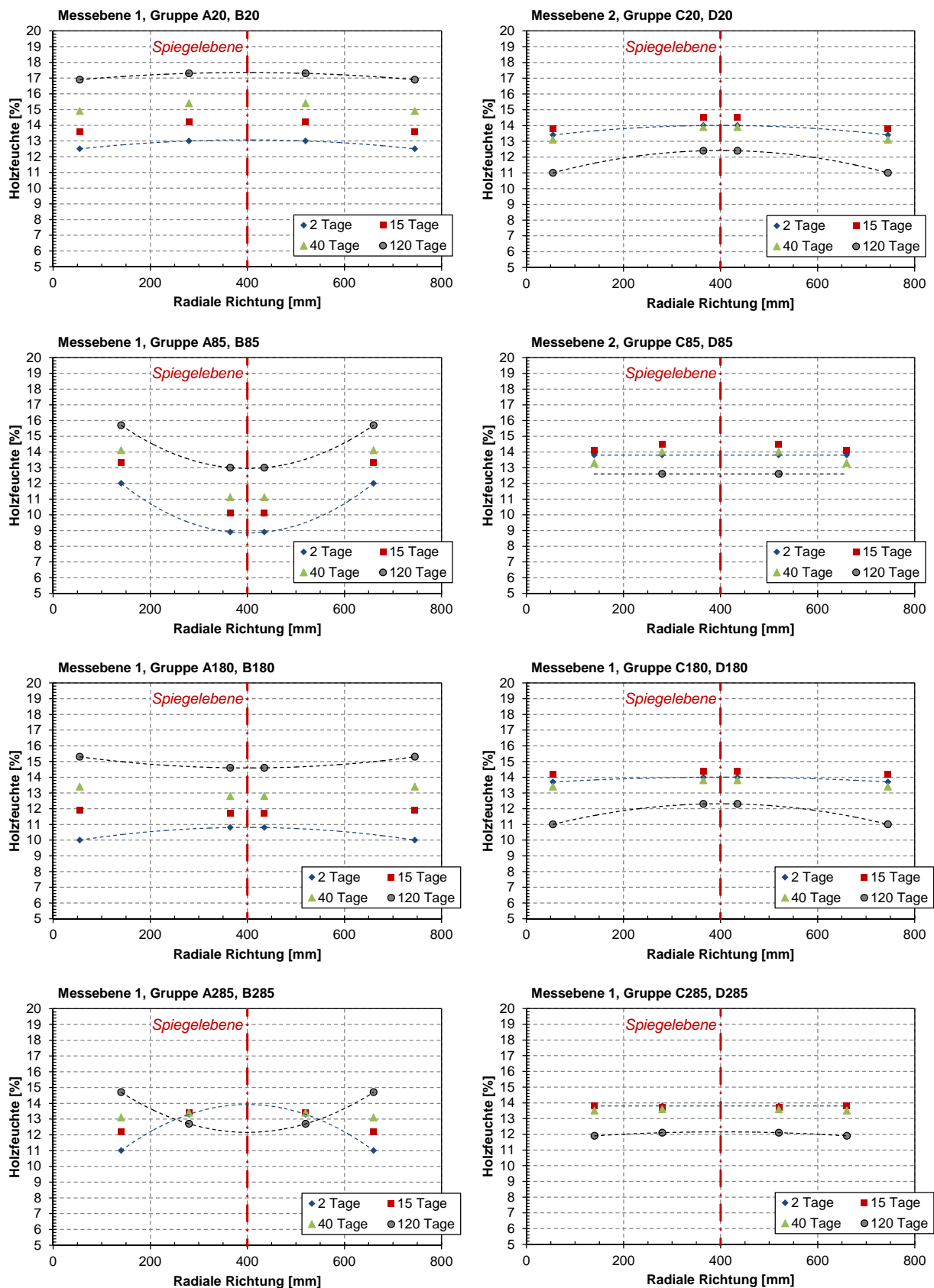


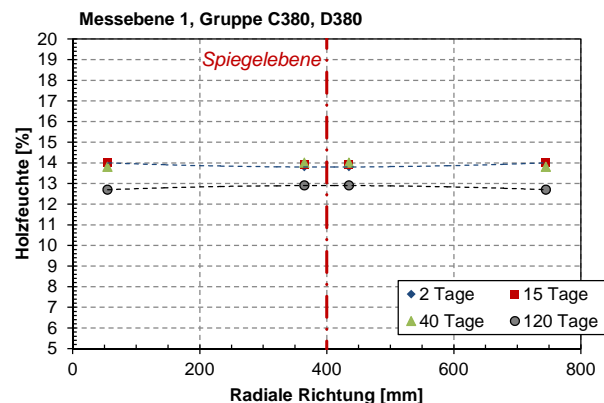
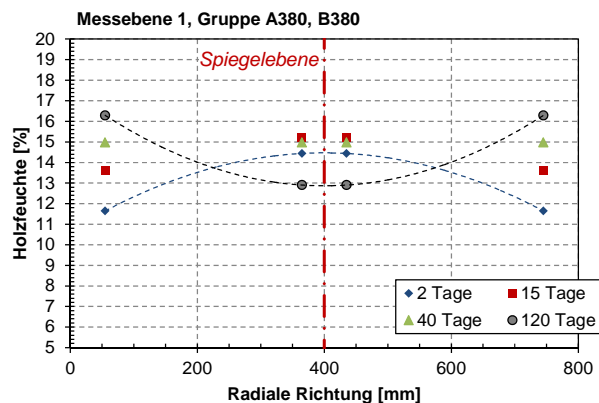
Messperiode 2



A.2.3 Holzfeuchteentwicklung in radiale Richtung

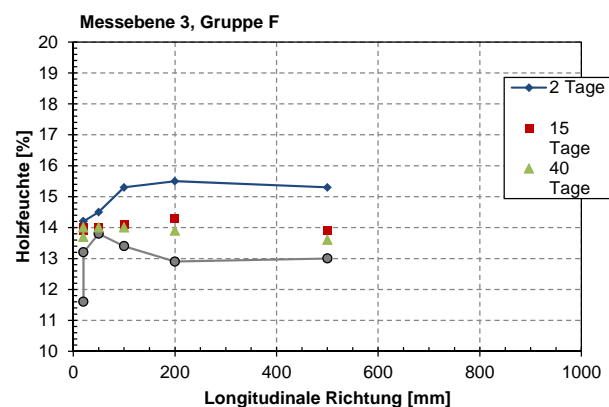
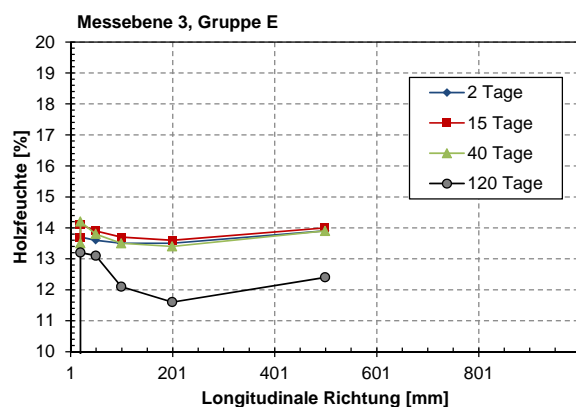
Messperiode 1



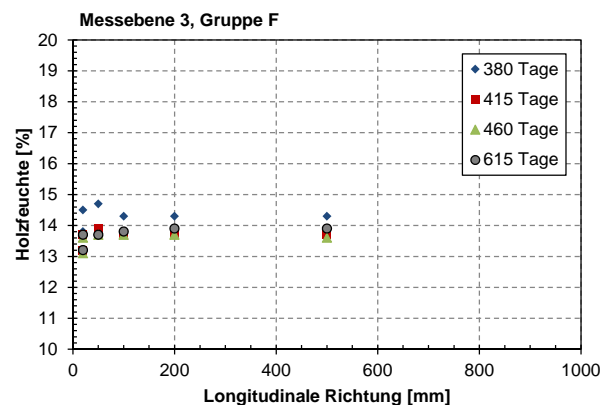
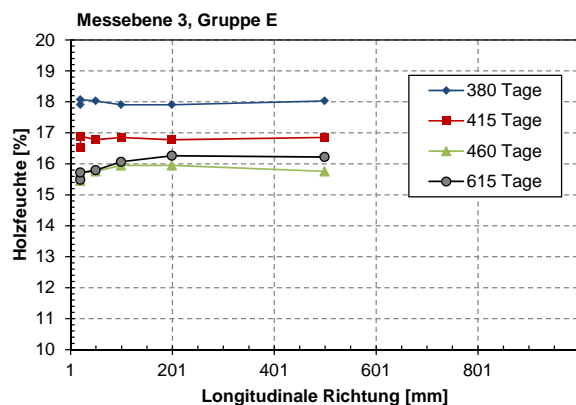


A.2.4 Holzfeuchteentwicklung in longitudinale Richtung

Messperiode 1

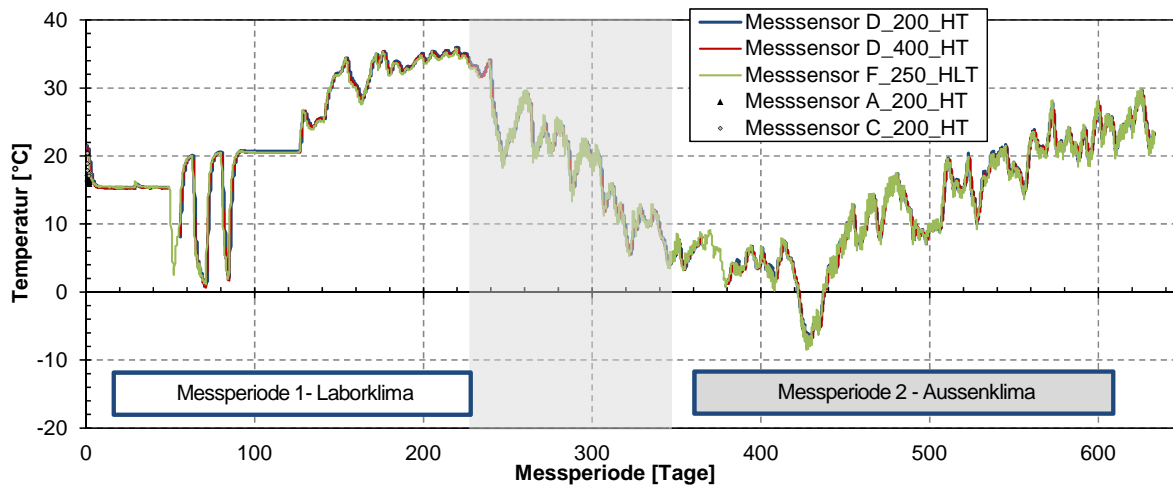


Messperiode 2

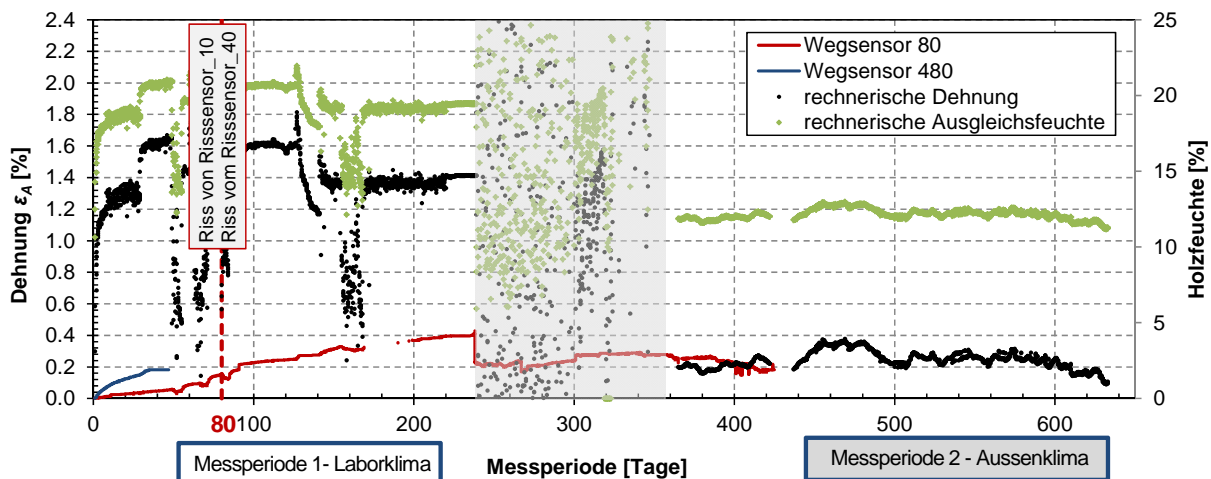


A.2.5 Holztemperatur

Messebene 1 und 2, Gruppe A, D und F

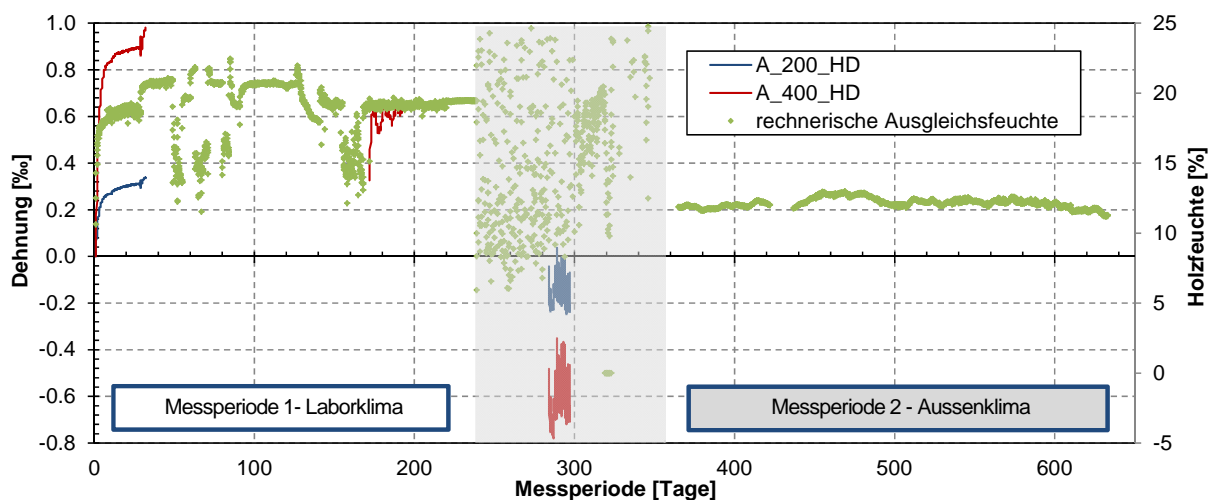


A.2.6 Dimensionsänderung - Aussenseiten

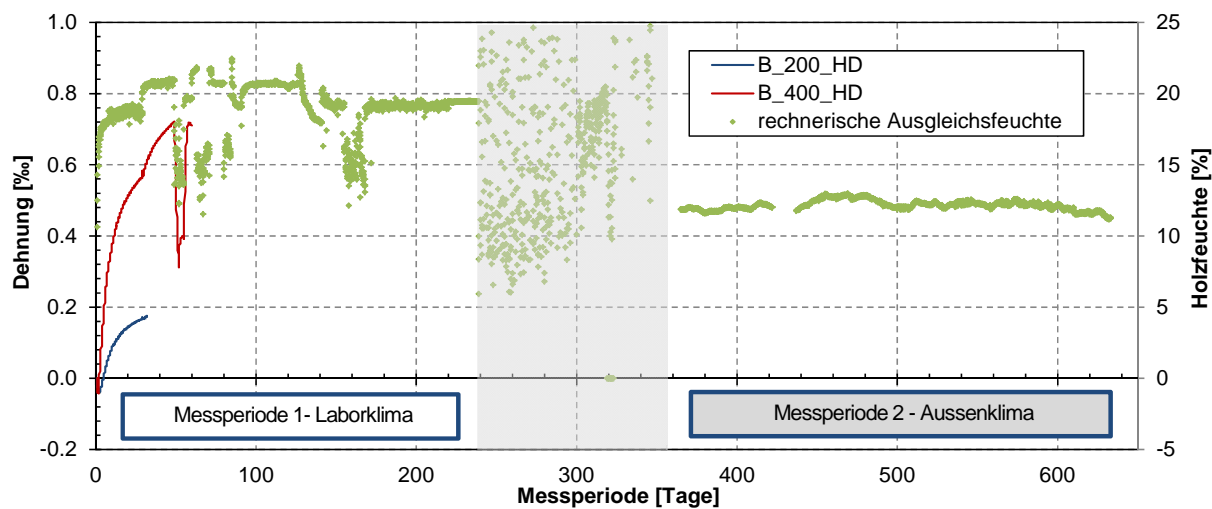


A.2.7 Dimensionsänderung - Querschnittsinnere

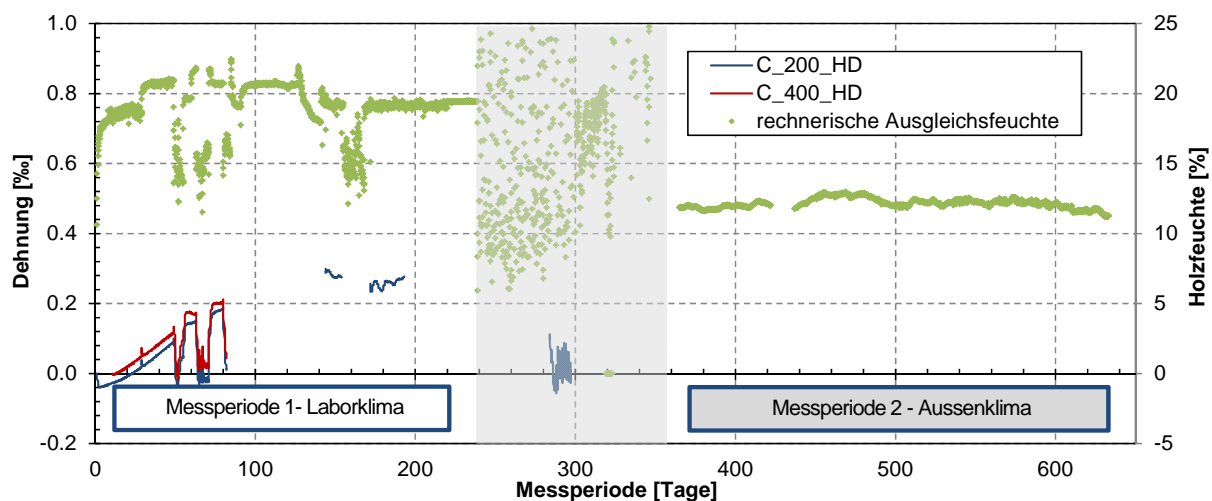
Messebene 1, Gruppe A



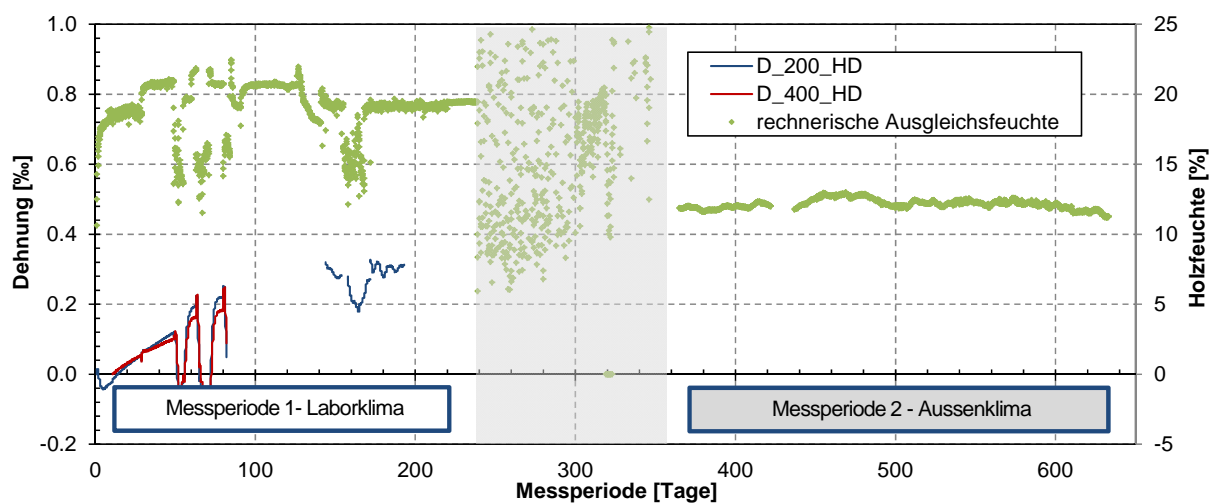
Messebene 1, Gruppe B



Messebene 2, Gruppe C



Messebene 2, Gruppe D



Anhang B: PUBLIKATION IM RAHMEN DES PROJEKTES

B.1 Veröffentlichte Beiträge

Scharmacher, F., Müller, A. (2012) Erfahrungen und Konsequenzen aus der Langzeitüberwachung von Holzbrücken, Brückenbau Symposium: Grünbrücken aus Holz – Wirtschaftliche Umsetzung des Generalwildwegeplans, 16. Februar, Stuttgart, Deutschland.

Tannert, T., Müller, A., Vogel, M. (2010) Structural health monitoring of timber bridges, International Conference on Timber Bridges (ITCB 2010), Lillehammer, Norwegen.

Tannert, T., Müller, A., Vogel, M. (2010) Stopping the Rot, Research into timber bridge degradation is aimed at improving structural health monitoring of these structures, Bd & e, Issue 60, pp. 72-73.

Tannert, T., Müller, A., Vogel, M. (2010) Structural health monitoring of timber bridges, Proceedings of Structural Faults & Repair, Edinburgh, Scotland.

Tannert, T., Bohumil, K., Anthony, R. (2010) RILEM TC 215 In-situ assessment of structural timber: Report on activities and application of assessment methods, World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Italien.

Müller, A. (2010) Erfahrungen aus Brückeninspektionen, IHB, 1. Internationale Holzbrückentage, Bad Wörishofen, Deutschland.

Müller, A., Vogel, M. (2009) Überwachung von Holztragwerken, baublatt, Nr. 38, S. 38-39.

Tannert, T., Müller, A., Vogel, M., Kehl, D. (2009) Long-term moisture measurement of block-glued-laminated elements in a timber bridge, 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-4), Zürich, Schweiz.

B.2 Vorgesehene Beiträge

Franke, B., Franke, S., Müller, A., Vogel, M., Scharmacher, F., Tannert, T. (2013): Long term monitoring of timber bridges – Assessment and results, SHATIS'13, 2nd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, 4.-6. September 2013, Trento, Italien.

Franke, B., Franke, S., Müller, A. (2013): Long term monitoring of the moisture content and their impact on glulam structures, International Rilem Conference, Materials and Joints in Timber Structures – Recent Advancement of Technology, 8.-10. Oktober 2013, Stuttgart, Deutschland.