

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Prüfbericht P17-027.1/2017

Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Fußbodenaufbauten und angrenzenden Wänden sowie von Deckenaufbauten mit natürlicher und mechanischer Trocknung nach einem Wasserschaden

Zusammenfassung der Berichte:

- Prüfbericht P17-172/2015
- Prüfbericht P17-173/2015
- Prüfbericht P17-174/2015
- Prüfbericht P17-175/2015
- Prüfbericht P17-028/2016
- Prüfbericht P17-062/2016
- IBP-Bericht HTB-022/2016

Kunde:
SV Sparkassenversicherung
Gebäudeversicherung AG
Löwentorstraße 65
70376 Stuttgart
und
Verband öffentlicher Versicherer

Stuttgart, 28. Februar 2017

1 Einleitung

Von 2014 bis 2015 wurde in vier Versuchsabschnitten das Trocknungsverhalten von Fußbodenaufbauten und angrenzenden Wänden sowie von Holzbalkendecken mit Schlacke und Lehmfüllung im Klimasimulator des Fraunhofer IBP in Stuttgart untersucht und durch Rechnersimulationen begleitet. In diesem Bericht werden die in den Teilberichten im Detail beschriebenen Untersuchungen (siehe Berichte [1] bis [6]) zusammengefasst. Es wurden zunächst vier Versuchsräume A, B, C und D innerhalb eines Klimasimulators für die Versuchsabschnitte 1 bis 3 errichtet und dann für den 4. Versuchsabschnitt erneut vier Versuchsräume E, F, G und H aufgebaut. Untersucht wurden Wände aus Porenbeton, Gipswandbauplatten, Vollziegel, Hochlochziegel und Leichtbauwände, zum Teil mit oder ohne Verfliesung und unterschiedlichen Putzen. Die unterschiedlichen Fußbodenaufbauten wie Beton/EPS-Dämmschicht/Estrich, Beton/EPS/Mineralfaser/Estrich, Beton/Mineralfaser/Estrich, Beton/Perlite/Mineralfaser/Estrich, Beton/Estrich wurden zum Teil mit und zum Teil ohne Fliesen untersucht. Während das Ziel des Versuchsabschnitts 1 war, herauszufinden, ob allein durch natürliche Trocknung die Trocknungsziele erreicht werden, kamen in den weiteren Versuchsabschnitten unterschiedliche Trocknungstechniken und Verfahren zum Einsatz. Die Prüfaufbauten wurden jeweils zur Erzeugung eines Wasserschadens bewässert und anschließend natürlich oder technisch getrocknet. Das Ziel dieser Versuchsreihen war es, Informationen über das Trocknungsverhalten der Bodenschichten, der angrenzenden Wände und der Deckenaufbauten bei der jeweils eingesetzten Trocknungsvariante und den gegebenen Randbedingungen zu erhalten. Um weitere Erkenntnisse über die Auswirkungen von Wasserschäden zu gewinnen, wurden die akustischen Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit der eingebauten Trittschalldämmplatten des Fußbodens von Raum B am Ende des 2. Versuchsabschnitts zusätzlich ermittelt. In Ergänzung zu den praktisch durchgeführten Versuchen, wurden einige der durchgeführten Laborversuche zur Bauteiltrocknung rechnerisch nachvollzogen. Die Feuchteverteilungen und Feuchtemengen wurden dabei als Randbedingungen für die Trocknungssimulationen angesetzt. Die rechnerischen Untersuchungen wurden mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP entwickelten und vielfach experimentell validierten Verfahrens zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® [7] durchgeführt. Das Programm WUFI® entspricht den Anforderungen des WTA-Merkblatts 6-2 [8] sowie der europäischen Norm DIN EN 15026 [9] für hygrothermische Simulationen.

2 Versuche

Der zeitliche Ablauf der durchgeführten Versuche kann Tabelle 1 entnommen werden.

2.1 Versuchsaufbauten

Die Versuchsaufbauten sind tabellarisch in den Tabellen 2 und 3 zusammengefasst. Bilder 1 bis 35 zeigen den Grundriss des Klimasimulators mit den vier Versuchsräumen, Schnitte mit Positionen der Messtechnik und die verschiedenen Wandtypen, Holzbalkendecken und Bodenaufbauten. Die Bilder 36 bis 42 zeigen die Techniken zur Erzeugung der Wasserschäden.

Im September 2014 wurde mit dem 1. Versuchsaufbau (Versuchsräume bzw. Aufbauten A, B, C, D) begonnen (Tabelle 2). Das Erstellen der Wandaufbauten, das Aufbringen des Estrichs, und der Aufbau der Holzbalkendecken wurden von externen Unternehmen in Absprache mit dem Auftraggeber durchgeführt. Alle anderen Arbeiten, wie die Installation der Messtechnik, wurden von Mitarbeitern des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP durchgeführt. Die Versuchsaufbauten des ersten Versuchsabschnitts wurden in Absprache mit dem Auftraggeber für den zweiten und dritten Versuchsabschnitt weiter genutzt. Mit dem 4. Versuchsaufbau wurde im Juli 2015 begonnen. Das Erstellen der Wand- und Bodenaufbauten E, F, G, H wurde auch hier wieder von externen Unternehmen durchgeführt (Tabelle 3). Der Untersuchungsumfang mit den vier Versuchsabschnitten enthielt unterschiedliche Bauteilvarianten. Bei den Wänden wurden Porenbetonsteine, Gipswandbauplatten, Vollziegel, Hochlochziegel und Leichtbauwände mit und ohne Fliesen und verschiedene Putze verwendet. Bei den Fußbodenaufbauten wurden die Kombinationen Beton/EPS/Estrich, Beton/EPS/Mineralfaser/Estrich, Beton/Mineralfaser/Estrich, Beton/Perlite/Mineralfaser/Estrich und Beton/Estrich, teilweise mit und teilweise ohne Fliesen eingebaut. Die

Deckenaufbauten bestanden aus Holzbalkendecken; einmal mit Schlackefüllung und einmal mit Lehmpelletfüllung. Die Bilder 7 bis 14 zeigen die verschiedenen Bauteilschichten der Fußböden und die Wandaufbauten der Versuchsräume A und B. Auf Bild 15 sind die beiden fertigen Aufbauten zu erkennen. In Bild 3 ist ein Schnitt durch die Deckenaufbauten der Räume C und D dargestellt. Der Deckenaufbau C enthält die Teilräume Ca und Cb (mit Schüttungen aus Hochofenschlacke und Holzkohle) und der Deckenaufbau D enthält die Teilräume Da und Db (mit Lehmpelletfüllung), die jeweils durch den mittleren Holzbalken voneinander getrennt sind. In Bild 4 sind die verschiedenen Deckenschichten von Raum D abgebildet. Bild 2 zeigt beispielhaft einen Schnitt durch Raum A mit dem Fußboden- und Wandaufbau. Die Bilder 16 bis 23 zeigen den Aufbau der beiden Deckenkonstruktionen.

Die für die Versuchsräume E, F, G und H verwendeten Materialien sind in Tabelle 3 aufgelistet. Bild 5 zeigt den Grundriss der vier Räume im Klimasimulator. Bild 6 können beispielhaft Details zu den Fußboden- und Wandaufbauten von Raum E entnommen werden. Die unterste Fußbodenschicht der Räume E, F, G und H bestand wie bei den Aufbauten A, B, C und D aus Betonplatten (Bild 7). Die darüber liegenden Fußbodenschichten waren je nach Versuchsraum unterschiedlich und sind in den Bildern 24 bis 30 abgebildet. Bild 31 zeigt eine Gesamtansicht der vier Versuchsräume E, F, G und H. Darauf sind die unterschiedlichen Wandtypen zu erkennen.

2.2 Trocknungstechnik

Die jeweiligen Trocknungsvarianten können den Tabellen 4 und 5 entnommen werden.

Während des ersten Versuchsabschnitts wurden die Prüfaufbauten natürlich, jedoch bei durch den Klimasimulator erzeugten konstanten Randbedingungen, ohne den Einsatz mechanischer Trocknungsgeräte, getrocknet. Beim zweiten, dritten und vierten Versuchsabschnitt wurden unterschiedliche mechanische Trocknungssysteme und Techniken eingesetzt.

2.3 Installation der Messtechnik

Die Bilder 32 bis 35 enthalten beispielhaft verschiedene Positionen der Feuchte- und Temperaturmessstellen in den Fußböden, Deckenaufbauten und in den Wänden.

Zur Ermittlung des massenbezogenen Feuchtegehalts kamen ca. 200 Widerstandssensoren (plus Kalibrierung) und ca. 100 Bohr- und Materialproben zum Einsatz. Die Temperaturmessung erfolgte mit 28 Thermoelementen und 30 PT-100 Sensoren. Die relative Feuchte wurde mit insgesamt 30 kapazitiven Feuchtesensoren gemessen. Insgesamt waren somit 288 Sensoren montiert, die durch die Um- bzw. Neuaufbauten teilweise wieder neu montiert werden mussten. Die Messwerterfassung erfolgte alle 15 Minuten und die Messung der massenbezogenen Feuchte mittels Widerstandssensoren erfolgte alle drei Tage.

2.4 Versuchsdurchführung

Tabelle 1 enthält die wesentlichen Daten zum zeitlichen Ablauf der jeweiligen Versuchsabschnitte. Nach der Fertigstellung der Versuchsaufbauten A, B, C und D wurden im ersten Versuchsabschnitt die beiden Räume A und B (Fußboden- und Wandaufbauten) für drei Tage bewässert (Bild 36 und 37) und anschließend für ca. vier Wochen bei einem Umgebungsklima von 20 °C und 60 % r. F. natürlich getrocknet. Anschließend wurden die Aufbauten für weitere vier Wochen getrocknet, allerdings ohne kontrollierte Klimatisierung. Die Deckenaufbauten C und D wurden über einen Zeitraum von 6,5 Stunden geflutet (Bild 41 und 42) und anschließend ebenfalls für ca. vier Wochen bei vorgegebenem Umgebungsklima (20 °C, 60 % r. F.) natürlich getrocknet. Auch hier erfolgte im Anschluss eine weitere Trocknung von ca. vier Wochen ohne Klimatisierung. Beim zweiten Versuchsabschnitt wurden die Räume A und B wieder für drei Tage überflutet. Zusätzlich wurden die Wände 4 (Porenbetonsteine/Dünnbettmörtel/Fliesen innenseitig) und 5 (Leichtbauwand mit Dämmung MW) für 22 Stunden von oben bewässert (Bilder 38 bis 40). Die Trocknung der beiden Prüfräume A und B erfolgte diesmal mechanisch über einen Zeitraum von ca. fünf Wochen (Bild 47). Nach Beendigung des Versuchs wurden die beiden Prüfräume abgebaut. Dabei wurden die aus dem Fußboden von Raum B ausgebauten

Mineralfaserplatten auf eine mögliche Verschlechterung der Trittschallminderung und eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit überprüft. Die Deckenaufbauten der Räume C und D wurden während des zweiten Versuchsabschnitts für ca. sechs Stunden bewässert und anschließend ebenfalls für ca. fünf Wochen mechanisch getrocknet. Im Anschluss wurde am Deckenaufbau D ein weiterer, dritter Versuchsabschnitt durchgeführt. Die Holzbalkendecke mit Lehmfüllung von Raum D wurde wieder für sechs Stunden bewässert und danach für ca. 5 Wochen mechanisch getrocknet. Die Trocknung erfolgte diesmal nicht kontinuierlich sondern mit einer Intervallschaltung. Details zu den eingesetzten Trocknungsvarianten während des zweiten und dritten Versuchsabschnitts können Tabelle 4 und den Bildern 47 bis 49 entnommen werden. Während der Versuche wurde die Klimaanlage des Prüfstandes mit einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 60 % betrieben. Nach Beendigung des dritten Versuchsabschnitts wurden die übrigen Aufbauten abgerissen.

Für den vierten Versuchsabschnitt wurden vier neue Prüfräume E, F, G und H im Klimasimulator des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP errichtet. Der Klimasimulator wurde auch während dieses Versuchs mit einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 60 % betrieben. Die vier Prüfräume wurden zu Beginn des Versuchs für drei Tage geflutet. Die Bilder 43 bis 46 zeigen beispielhaft die Durchfeuchtung der Wände 7 und 18 am Ende der Bewässerung. Im Anschluss daran erfolgte die Trocknung über einen Zeitraum von fünf Wochen. In der ersten Woche wurde mit den gegebenen Randbedingungen natürlich getrocknet. Ab der zweiten Trocknungswoche bis zum Ende der Trocknung kamen mechanische Trocknungsgeräte zum Einsatz. Bild 50 zeigt beispielhaft die Trocknung der Wände von Raum H. Die verschiedenen Trocknungsvarianten für die einzelnen Bauteile sind in Tabelle 5 erläutert. Nach dem Abschalten der Trocknungsgeräte wurde das Feuchteverhalten der Fußböden der Räume E, F, G und H und der Wände 11 (Raum F) und 14 (Raum G) für weitere 19 Tage messtechnisch überwacht. Während der ersten neun Tage wurde die Regelung der Klimakammer auf 20 °C/60 % r. F. eingestellt und danach abgestellt, während die Messwerterfassung noch für weitere 10 Tage die Daten aufzeichnete.

2.5 Vergleichende WUFI®-Simulationen

Bevor einige der im Labor durchgeführten Trocknungsversuche an realen Wand- und Bodenaufbauten mit Hilfe des Simulationsprogramms WUFI® simuliert wurden, wurden die Kennwerte Rohdichte, freie Wassersättigung sowie die Kapillartransportkoeffizienten der drei Steintypen Mauersteine, Hochlochziegel und Porenbetonsteinen ermittelt. Danach wurde das natürliche Trocknungsverhalten der einzelnen Steine in einer Idealsituation gemessen und mit WUFI® simuliert. Bild 68 zeigt beispielhaft den gemessenen und den nachgerechneten Feuchteverlauf der eindimensionalen Trocknung des Vollziegels bei genau definierten Randbedingungen in der Klimakammer. Dies ist sinnvoll zur Überprüfung ob die Feuchtetransportvorgänge im Material selbst gut nachvollzogen werden können. Die beiden Kurvenverläufe zeigten eine sehr gute Übereinstimmung bei eindeutig definierten Startfeuchteverhältnissen und Randbedingungen. Die gemessenen und nachgerechneten Feuchteverläufe des Porenbetonsteins und des Hochlochziegels zeigten ebenfalls jeweils eine gute Übereinstimmung. Die Kapillartransportkoeffizienten für den Trocknungsvorgang bzw. die Weiterverteilung des flüssigen Wassers sowie alle anderen relevanten hygrothermischen Stoffkennwerte sind dem IBP-Bericht HTB-022/2016 [6] zu entnehmen. Die nicht explizit gemessenen Kennwerte wurden von vergleichbaren Materialien aus der WUFI®-Materialdatenbank übernommen. Nach diesen Zusatzversuchen wurden dann die an den Versuchsaufbauten durchgeführten Trocknungsversuche rechnerisch simuliert; die Wände 3 (Mauerziegel) und 4 (Porenbeton) sowie die Fußbodenaufbauten der Prüfräume A (ohne Dämmschicht) und B (mit Dämmschicht) und den Deckenaufbau D (Lehmschüttung) des ersten Versuchsabschnitts mit natürlicher Trocknung. Des Weiteren wurde die mechanische Trocknung der Wände 16 und 17 (Mauerziegel, Kalkzementputz, Fliesen) sowie der Wand 12 (Hochlochziegel, Kalkzementputz, Fliesen) und des Fußbodenaufbaus von Raum E (mit Dämmung) aus dem vierten Versuchsabschnitt rechnerisch nachvollzogen. Als Randbedingung wurde jeweils das während der Versuche eingestellte Umgebungsklima (Temperatur und relative Feuchte) berücksichtigt. Das Verputzen von Mauerwerk führt in den Grenzbereichen zwischen den verschiedenen Materialien unter Umständen zur Ausbildung von Widerstandsschichten, wenn das Eindringen und Abbinden des Putzes in den Kapillarporen des Untergrunds diese »verstopft«. Dies kann sich positiv auswirken, wenn bei Niederschlagsabsorption der Kapillartransport über die Grenzschicht deutlich reduziert wird. Im Falle der Trocknung ist der reduzierte Kapillartransport allerdings nachteilig, da der Transport der Feuchte zur Bauteiloberfläche dann weitgehend über die vergleichsweise langsamere Diffusion erfolgen muss. Diese Behinderung kann in der Simulation durch eine »Widerstandsschicht« an der Grenze zwischen den beiden Materialien berücksichtigt werden.

Aufgrund bereits durchgeführter Untersuchungen [12] kann angenommen werden, dass sich durch das Verputzen der Ziegelsteine mit reinem Gipsputz an der Oberfläche keine Widerstandsschicht ausbildet. Bei allen anderen Putzen wird in der Nachrechnung des Trocknungsverhaltens eine Widerstandsschicht in der Simulation berücksichtigt.

3 Versuchsergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Laborversuche und der Berechnungen erläutert und anhand beispielhafter Diagramme und Abbildungen dargestellt. Die ausführlichen Versuchsergebnisse sind den einzelnen Prüfberichten zu entnehmen.

Die Bilder 37 bis 50 zeigen Fotos zu den erzeugten Wasserschäden und den Trocknungsgeräten. Die Ergebnisse der Auswertungen können auszugsweise den Bildern 51 bis 74 entnommen werden.

3.1 Ergebnisse des 1. Versuchsabschnitts, Fußboden- und Wandaufbauten der Prüfräume A und B – natürliche Trocknung

Nach Erzeugung eines Wasserschadens in den beiden Versuchsräumen A und B wurde das natürliche Trocknungsverhalten bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen von 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchte zunächst über einen Monat untersucht. Nach einer weiteren Trocknungsperiode von einem Monat bei Laborrandbedingungen erfolgte eine weitere Auswertung der Materialfeuchtegehalte.

Die beiden Schichten des Bodenaufbaus in Raum A, die Rohbetonschicht und der Verbundzementestrich mit Fliesenabdeckung waren auch nach zwei Monaten natürlicher Trocknung nass.

Die drei Schichten des Bodenaufbaus in Raum B, die Rohbetonschicht, die Trittschalldämmschicht aus Mineralfaser und der Zementestrich mit Fliesenabdeckung waren nach zwei Monaten natürlicher Trocknung ebenfalls noch nass.

Wand 1 in Raum A und Wand 6 in Raum B, aufgebaut mit Gipswandbauplatten waren nach einem Monat natürlicher Trocknung oberflächlich abgetrocknet, jedoch zeigten alle Sensoren in der Wand im unteren Bereich Werte von ca. 60 M-% bis 70 M-%. Die mittleren Feuchtegehalte lagen am Ende der Bewässerung zwischen 80 M-% bei Wand 1 und 87 M-% bei Wand 6. Nach einem weiteren Trocknungsmonat sanken die Feuchtegehalte der Wände auf ca. 13 M-%. Das heißt es wurden nahezu die Ausgangsfeuchtegehalte der Platten vor dem Wasserschaden von ca. 10 M-% erreicht. Bild 51 zeigt beispielhaft den Feuchteverlauf mittig in Wand 6, in den Messpunkten 21 (Höhe: 40 cm), 22 (Höhe: 30 cm), 23 (Höhe: 20 cm) und 24 (Höhe: 10 cm).

Wand 2 in Raum A und Wand 5 in Raum B, aufgebaut als Leichtbauwände mit Gipskartonplatten außen und innen und zwischenliegender Mineralwolldämmung waren bereits nach einem Monat natürlicher Trocknung weitgehend getrocknet. Vermutlich verblieben im Bereich der Metallschiene im Sockelbereich noch geringe Feuchtemengen zurück. Eine Setzung des Dämmstoffs im Inneren konnte nicht festgestellt werden.

Wand 3 in Raum A, aufgebaut mit Vollziegeln und Gipsputz innenseitig war nach einem Monat natürlicher Trocknung von 5,4 M-% auf 1,9 M-% getrocknet und nach einem weiteren Monat Trocknung bei 1,5 M-%, so dass auch hier nahezu Anfangsfeuchtegehalte von ca. 1 M-% erreicht wurden.

Wand 4 in Raum B, aufgebaut mit Porenbetonsteinen, Zementputz und innenseitigen Fliesen war nach einem Monat natürlicher Trocknung von 13,8 M-% auf 8,6 M-% und nach einem weiteren Trocknungsmonat auf 6,7 M-% getrocknet. Damit lagen die Werte zwar nahe dem mittleren Ausgangsfeuchtegehalt von 4,4 M-%, hatten diesen am Ende der natürlichen Trocknung aber noch nicht erreicht.

3.2 Ergebnisse des 1. Versuchsabschnitts, Deckenaufbauten mit Schlacke- und Lehmfüllung der Prüfräume C und D – natürliche Trocknung

Die Holzbalkendecken C (Schlackefüllung) und D (Lehmpelletfüllung) wurden über einen Zeitraum von ca. 6 Stunden Leitungswasser ausgesetzt und somit ein Wasserschaden mit weitgehender Durchfeuchtung an den beiden Holzbalkendecken erzeugt. Danach erfolgte die erste Trocknungsperiode über eine Dauer von ca. einem Monat bei einem Umgebungsklima von 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchte. Danach wurde die Trocknungsdauer um einen weiteren Monat ohne Simulation des Umgebungsklima verlängert.

Holzbalkendecke C, Balkenzwischenräume mit Schlackefüllung:

Die Unterseite der Holzbalkendecke C war halbseitig mit Gipsputz und halbseitig mit Kalkzementputz verputzt. Diese waren bereits nach der ersten Trocknungsperiode getrocknet.

Die beiden Schüttungen aus Hochofenschlacke und Holzkohle in den beiden Balkenzwischenräumen waren nach vier Wochen natürlicher Trocknung nach dem Wasserschaden immer noch feucht. Dies zeigten die Feuchtegehalte der Balsaholzplättchen, die in die Schüttungen integriert waren: 18 M-% Ausgangsfeuchtegehalt, 100 M-% nach dem Wasserschaden, 83 M-% nach einem Monat natürlicher Trocknung und 68 M-% nach zwei Monaten natürlicher Trocknung. Der Feuchteverlauf der Schüttungen in den Teilräumen Ca und Cb auf dem Niveau von Ebene 3 ist in Bild 52 dargestellt. Der Teilraum Ca wurde im Mittel nicht komplett nass und zeigt somit am Ende der Trocknung einen niedrigeren Feuchtegehalt als der Teilraum Cb.

Die Holzbalkenköpfe waren vom Wasserschaden nicht betroffen.

Die Längsseiten des mittleren Holzbalkens hatten einen Feuchtegehalt beim Einbau von 14 M-%, nach dem Wasserschaden 27 M-%, nach einem Trocknungsmonat ca. 23 M-% und nach zwei Monaten 24 M-%. Damit waren die Holzbalken durch den Wasserschaden nicht sehr stark feuchtebelastet und lagen nach den Trocknungsphasen noch 3 M-% bis 4 M-% über dem für Holz häufig genannten Grenzwert von 20 M-%.

Holzbalkendecke D, Balkenzwischenräume mit Lehmpelletfüllung:

Die Unterseite der Holzbalkendecke D mit Blindboden war halbseitig mit Gipsputz und halbseitig mit Kalkzementputz verputzt. Diese waren bereits nach der ersten Trocknungsperiode getrocknet.

Die beiden Schüttungen aus Lehmpellets in den beiden Balkenzwischenräumen waren sowohl nach einem Monat wie auch nach zwei Monaten natürlicher Trocknung nach dem Wasserschaden immer noch nass. Dies zeigten die Feuchtegehalte der Balsaholzplättchen, die in die Schüttungen integriert waren: 19 M-% Ausgangsfeuchtegehalt, 100 M-% nach dem Wasserschaden, 99 M-% nach einem Monat natürlicher Trocknung und 98 M-% nach zwei Monaten natürlicher Trocknung. Bild 52 zeigt den Feuchteverlauf der Teilräume Da und Db während der natürlichen Trocknung.

Der Blindboden des Deckenaufbaus D war weder nach einem noch nach zwei Monaten natürlicher Trocknung vollständig getrocknet. Die Ausgangsfeuchte vor Bewässerungsbeginn lag bei 15 M-%, nach dem künstlich erzeugten Wasserschaden war der Feuchtegehalt im Mittel auf 58 M-% angestiegen und am Ende der vierwöchigen Trocknung lag der Feuchtegehalt bei ca. 33 M-%. Nach weiteren vier Wochen Trocknung sank der mittlere Feuchtegehalt im Blindboden noch etwas ab, auf einen Wert von ca. 27 M-%. Somit lag der mittlere Feuchtegehalt am Ende des Versuchs oberhalb des für Holz häufig genannten Grenzwerts von 20 M-%.

Die Holzbalkenköpfe der Holzbalken waren auch hier nicht vom Wasserschaden betroffen.

Die Längsseiten des mittleren Holzbalkens hatten einen Feuchtegehalt beim Einbau von 15 M-%, nach dem Wasserschaden von 74 M-%, nach einem Trocknungsmonat ca. 50 M-% und nach zwei Monaten 47 M-%.

Damit waren die Holzbalken durch den Wasserschaden feuchtebelastet und nach den Trocknungsphasen deutlich über dem für Holz häufig genannten Grenzwert von 20 M-%.

3.3 Ergebnisse des 2. Versuchsabschnitts, Fußboden- und Wandaufbauten der Prüfräume A und B – mechanische Trocknung

Die Fußböden der zwei Versuchsräume A und B wurden erneut über einen Zeitraum von drei Tagen mit Wasser geflutet und somit ein Wasserschaden erzeugt. Danach wurden die Versuchsräume für ca. fünf Wochen mechanisch getrocknet. Anschließend wurde das Trocknungsverhalten bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen von 20 °C, 60 % relativer Luftfeuchte noch für weitere fünf Tage überwacht.

Die beiden Schichten des Bodenaufbaus in Raum A, die Rohbetonschicht und der Verbundzementestrich mit Fliesenabdeckung waren auch nach ca. fünf Wochen mechanischer Trocknung noch nass.

Die Rohbetonschicht von Raum B hatte am Ende der Trocknung einen mittleren Feuchtegehalt von 2,4 M-%. Der Feuchtegehalt sank während der Trocknung von 5,0 M-% um 2,6 M-%. Der Feuchtegehalt der Trittschalldämmung aus Mineralfaser (gemessen an Balsaholzplättchen) lag am Ende der Trocknung bei einem Mittelwert von 9,0 M-%, während er unmittelbar nach der Bewässerung noch 100 M-% betrug. Der Feuchtegehalt des Zementestrichs mit Fliesenabdeckung ist von 9,6 M-% im nassen Zustand auf einen Mittelwert von 7,2 M-% am Trocknungsende gesunken.

Wand 1 in Raum A und Wand 6 in Raum B, aufgebaut mit Gipswandbauplatten, zeigten am Ende des Versuchs aufgrund der unterschiedlichen Trocknungsvarianten auch etwas unterschiedliche Trocknungsergebnisse. Die Feuchtwerte von Wand 1 lagen am Ende der Trocknung zwischen ca. 9 M-% und 24 M-%. Auf der Innenseite der Wand wurden gute Trocknungsergebnisse erreicht, während in der Mitte und im äußeren Bereich noch etwas höhere Feuchtwerte auftraten, d. h. es wurden zumindest an der Wandinnenseite nahezu die Werte der Gleichgewichtsfeuchte von ca. 10 M-% erreicht. Bei Wand 6 lagen die Feuchtwerte in einem etwas höheren Bereich, zwischen ca. 19 M-% und 33 M-%. Bild 53 kann beispielhaft der Feuchteverlauf mittig in Wand 6, in den Messpunkten 21 (Höhe: 40 cm), 22 (Höhe: 30 cm), 23 (Höhe: 20 cm) und 24 (Höhe: 10 cm) entnommen werden.

Bei Wand 2 in Raum A und Wand 5 in Raum B, aufgebaut als Leichtbauwände mit Gipskartonplatten außen und innen und zwischenliegender Mineralwolldämmung zeigten die Messwerte bereits nach etwa zwei Wochen, dass die Wände annähernd trocken waren. Am Ende der Trocknungsphase waren die beiden Wände bis auf einen Messpunkt von Wand 2 weitgehend getrocknet und lagen ungefähr auf dem Niveau der Gleichgewichtsfeuchte von 10 Digits. Lediglich im unteren Bereich von Wand 2 wurden auch am Ende des Versuchs noch erhöhte Werte gemessen, was darauf zurückzuführen ist, dass bei Wand 2 keine direkte mechanische Trocknung zum Einsatz kam. Im Bereich der Metallschiene im Sockelbereich blieben noch geringe Feuchtemengen zurück. Außerdem wurden an den Gipskartonplatten im Sockelbereich schwarze Flecken, vermutlich Schimmelpilze, festgestellt. Die zusätzliche Bewässerung von oben bei Wand 5 für ca. 22 Stunden führte zu einem zwischenzeitlichen starken Anstieg der Feuchte. Wie bereits beschrieben, war die Wand trotzdem bereits vor dem Ende des Versuchs annähernd trocken. Eine Setzung des Dämmstoffs im Inneren konnte nicht festgestellt werden.

Wand 3 in Raum A, aufgebaut mit Vollziegeln und Gipsputz innenseitig war am Trocknungsende im Bereich der oberen beiden Messreihen mit Werten zwischen 0,6 M-% und 0,8 M-% komplett getrocknet und somit im selben Bereich, wie die Gleichgewichtsfeuchte am Versuchsende. Im unteren Wandbereich bis ca. 20 cm oberhalb des Fußbodens waren die Feuchtwerte am Ende des Versuchs noch etwas höher, zwischen 0,9 M-% und 1,7 M-%. Unmittelbar nach der Bewässerung lag der Feuchtegehalt im Mittel noch bei ca. 5 M-%.

Die Wand 4 in Raum B, aufgebaut mit Porenbetonsteinen, Zementputz und innenseitigen Fliesen, hatte nach der Flutung einen mittleren Feuchtegehalt von ca. 14,1 M-%. Am Ende der mechanischen Trocknung lagen die Feuchtwerte zwischen 0,8 M-% und 4,2 M-%. Sechs Tage nach der Bewässerung am Fußboden von Raum B wurde die Wand 4 zusätzlich über einen Zeitraum von ca. 22 Stunden von oben bewässert. Dies führte zu einem zwischenzeitlichen Feuchteanstieg auf bis zu ca. 70 M-%. Bis zum Ende des Versuchs sind

die Feuchtegehalte alle wieder gesunken und lagen nahe dem Feuchtegehalt der mittleren Gleichgewichtsfeuchte von 2,5 M-%.

Nach dem Ende des zweiten Versuchsabschnitts wurden die beiden Prüfräume A und B abgebaut. Die aus dem Boden von Raum B ausgebauten Mineralfaserplatten wurden auf eine mögliche Verschlechterung der Trittschallminderung und eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit überprüft.

Die Messung der Trittschallminderung erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 10140-1 bis 5. Bei der entnommenen Probe des Dämmstoffes konnte keine Verschlechterung der bewerteten Trittschallminderung festgestellt werden. Für den Fall, dass als Folge des Austrocknens bei einem Schadensfall eine sichtbare Reduzierung der Aufbauhöhe erkennbar wäre, könnte die Trittschallminderung dennoch beeinträchtigt werden.

Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte gemäß der Prüfnorm DIN EN 12667 [7] und der Produktnorm DIN EN 13162 [8]. Die in Raum B eingesetzten Mineralfaserdämmplatten hatten am Ende des Versuchs etwa dieselbe, sogar eine etwas niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufzuweisen, als unbenutzte Vergleichsproben im Lieferzustand.

3.4 Ergebnisse des 2. Versuchsabschnitts, Deckenaufbauten mit Schlacke- und Lehmfüllung der Prüfräume C und D – mechanische Trocknung

Die beiden Deckenaufbauten der Versuchsräume C und D wurden über einen Zeitraum von ca. 6 Stunden Leitungswasser ausgesetzt und somit ein Wasserschaden mit weitgehender Durchfeuchtung an den beiden Holzbalkendecken erzeugt. Danach erfolgte die Trocknungsperiode mit verschiedenen Trocknungsgeräten über eine Dauer von ca. fünf Wochen bei einem Umgebungsklima von 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchte.

Holzbalkendecke C, Balkenzwischenräume mit Schlackefüllung:

Die Unterseite der Holzbalkendecke C war halbseitig mit Gipsputz und halbseitig mit Kalkzementputz verputzt. Beide Unterseiten waren nach der Trocknungsperiode getrocknet.

Die Schüttungen in den beiden Balkenzwischenräumen aus Hochofenschlacke mit Holzkohle vermischt waren nach fünf Wochen mechanischer Trocknung nach dem Wasserschaden trocken. Dies zeigten die Feuchtegehalte der Balsaholzplättchen, die in die Schüttungen integriert waren: 65 M-% Ausgangsfeuchtegehalt, 79 M-% nach dem Wasserschaden und 11 M-% nach einem Monat mechanischer Trocknung. Der Feuchteverlauf der Schüttungen in den Teilräumen Ca und Cb auf dem Niveau von Ebene 3 ist in Bild 54 dargestellt. Der Teilraum Ca wurde im Mittel nicht komplett nass und zeigt somit am Ende der Trocknung einen niedrigeren Feuchtegehalt als der Teilraum Cb.

Die Holzbalkenköpfe hatten vor der Bewässerung einen mittleren Feuchtegehalt von 29 M-%, nach der Flutung lag der Wert mit 28 M-% ungefähr auf demselben Niveau. Durch den Einsatz der Trocknungsgeräte sank der Feuchtegehalt an der Stirnseite des Holzbalkens im Mittel auf 20,4 M-%.

Die Längsseiten des mittleren Holzbalkens hatten vor der Flutung einen Feuchtegehalt von 25 M-%, nach dem Wasserschaden von 24 M-% und nach der Trocknung ca. 15 M-%. Damit lag der Feuchtegehalt am Ende des Versuchs unter dem für Holz kritischen Wert von 20 M-%.

Holzbalkendecke D, Balkenzwischenräume mit Lehm pelletfüllung:

Die Unterseite der Holzbalkendecke D mit Blindboden war halbseitig mit Gipsputz und halbseitig mit Kalkzementputz verputzt. Diese waren nach der Trocknungsperiode getrocknet.

Die beiden Schüttungen aus Lehm pellets in den beiden Balkenzwischenräumen waren am Ende der Trocknung im Mittel immer noch nass. Dies zeigten die Feuchtegehalte der Balsaholzplättchen, die in die

Schüttungen integriert waren: 99 M-% Ausgangsfeuchtegehalt, 100 M-% nach dem Wasserschaden und 53 M-% nach ca. fünf Wochen mechanischer Trocknung. Der Feuchteverlauf der Teilräume Da und Db während der mechanischen Trocknung ist in Bild 54 dargestellt.

Der Blindboden des Deckenaufbaus D war nach dem ca. fünfwöchigen Einsatz der Trocknungsgeräte getrocknet. Die Ausgangsfeuchte vor Bewässerungsbeginn lag bei 27 M-%, nach dem künstlich erzeugten Wasserschaden war der Feuchtegehalt im Mittel auf 49 M-% angestiegen und am Ende der Trocknung lag der Feuchtegehalt bei ca. 12 M-% und somit unterhalb dem für Holz häufig genannten Grenzwert von 20 M-%.

Die Holzbalkenköpfe hatten vor der Bewässerung einen mittleren Feuchtegehalt von 23 M-%, nach der Flutung lag der Wert mit 21 M-% ungefähr auf demselben Niveau. Nach dem Einsatz der Trocknungsgeräte stieg der Feuchtegehalt an der Stirnseite des Holzbalkens im Mittel noch geringfügig an, auf einen Wert von 25 M-%.

Die Längsseiten des mittleren Holzbalkens hatten einen Feuchtegehalt vor der Bewässerung von 49 M-%, nach dem Wasserschaden von 80 M-% und am Ende der mechanischen Trocknung von ca. 14 M-%. Damit war der Feuchtegehalt an den Längsseiten des Holzbalkens nach der Trocknungsphase deutlich gesunken und unter dem für Holz häufig genannten Grenzwert von 20 M-%.

3.5 Ergebnisse des 3. Versuchsabschnitts, Deckenaufbau mit Lehmfüllung des Prüfraums D – mechanische Intervalltrocknung

Der Deckenaufbau des Versuchsraums D wurde über einen Zeitraum von ca. 6 Stunden erneut Leitungswasser ausgesetzt und somit ein Wasserschaden mit weitgehender Durchfeuchtung an der Holzbalkendecke erzeugt. Danach erfolgte die Trocknung im Intervallbetrieb mit verschiedenen Trocknungsgeräten über eine Dauer von ca. fünf Wochen bei einem Umgebungsklima von 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchte. Die Trocknung des Deckenabschnitts Da erfolgte mit einer 12-Stunden ein/aus Intervallschaltung der Trocknungsgeräte. Die Trocknung des Deckenabschnitts Db erfolgte mittels 6-Stunden ein/aus Intervalltrocknung. Für die Trocknung der Holzbalkendecken von unten wurden IR-Heizpaneele zur Erzeugung einer Oberflächentemperatur von ca. 100 °C eingesetzt.

Holzbalkendecke D, Balkenzwischenräume mit Lehm pelletfüllung:

Die Unterseite der Holzbalkendecke D mit Blindboden war halbseitig mit Gipsputz und halbseitig mit Kalkzementputz verputzt. Diese waren nach der Trocknungsperiode getrocknet.

Die beiden Schüttungen aus Lehm pellets in den beiden Balkenzwischenräumen waren am Ende der Trocknungsphase ausreichend getrocknet. Dies zeigten die Feuchtegehalte der Balsaholzplättchen, die in die Schüttungen integriert waren: 30 M-% Ausgangsfeuchtegehalt, 100 M-% nach dem Wasserschaden und 12 M-% nach ca. fünf Wochen mechanischer Trocknung. Bild 55 zeigt den Feuchteverlauf innerhalb der Lehm pelletschüttung auf dem Niveau von Ebene 3. In Bild 56 werden die Ergebnisse der mechanischen Trocknung des zweiten und des dritten Versuchsabschnitts miteinander verglichen. Das Trocknungssystem des dritten Versuchsabschnitts, IR-Strahlungsheizung von unten und Zuführung von trockener Luft von oben im Intervallbetrieb, zeigt bessere Trocknungsergebnisse als die Trocknung des zweiten Versuchsabschnitts. Allerdings müssen hier auch die unterschiedlichen Temperaturen der IR-Heizplatten mit einer ca. 50°C Oberflächentemperatur an der Unterseite beim zweiten Versuchsabschnitt zu ca. 100°C Oberflächentemperatur beim dritten Versuchsabschnitt beachtet werden.

Der Blindboden des Deckenaufbaus D war nach dem ca. fünfwöchigen Einsatz der Trocknungsgeräte getrocknet. Die Ausgangsfeuchte vor Bewässerungsbeginn lag bei 15 M-%, nach dem künstlich erzeugten Wasserschaden war der Feuchtegehalt im Mittel auf 39 M-% angestiegen und am Ende der Trocknung lag der Feuchtegehalt bei ca. 9 M-%.

Die Holzbalkenköpfe hatten vor der Bewässerung einen mittleren Feuchtegehalt von 18 M-%, nach der Flutung lag der Wert bei ca. 27 M-% und nach dem Einsatz der Trocknungsgeräte war der Feuchtegehalt an der Stirnseite des Holzbalkens im Mittel leicht gesunken, auf einen Wert von 24 M-%.

Die Längsseiten des mittleren Holzbalkens hatten einen Feuchtegehalt vor der Bewässerung von 15 M-%, nach dem Wasserschaden von 76 M-% und am Ende der mechanischen Trocknung von ca. 9 M-%. Damit waren die Längsseiten des Holzbalkens nach der Trocknungsphase deutlich gesunken und der Feuchtegehalt lag unter dem für Holz häufig genannten Grenzwert von 20 M-%.

3.6 Ergebnisse des 4. Versuchsabschnitts, Fußboden- und Wandaufbauten der Prüfräume E, F, G und H – mechanische Trocknung mit anschließender Überwachung des Feuchteverhaltens nach Abschalten der Trocknungsgeräte

Nach den vorangegangenen drei Versuchsabschnitten wurde im vierten Versuchsabschnitt das Trocknungsverhalten von Fußbodenaufbauten mit angrenzenden Wänden der vier Versuchsräume E, F, G und H im Klimasimulator des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Stuttgart untersucht. Die Fußböden wurden über einen Zeitraum von drei Tagen mit Wasser geflutet und somit ein Wasserschaden erzeugt. Während der einwöchigen Aufbauarbeiten der Trocknungsgeräte fand eine natürliche Trocknung statt und danach wurden die Versuchsräume noch ca. vier Wochen mechanisch getrocknet bei einem Umgebungsklima von 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchte.

Ergebnisse Bodentrocknung

Die Rohbetonschicht von Raum E hatte am Ende der Trocknung einen mittleren Feuchtegehalt von 2,2 M-%. Unmittelbar nach der Bewässerung lag der Feuchtegehalt noch bei 3,5 M-%. Der Feuchtegehalt der Fußbodendämmung, bestehend aus einer Schicht EPS-Dämmung und einer Schicht Mineralfaserdämmung (gemessen an Balsaholzplättchen), lag am Ende der Trocknung bei einem Mittelwert von 13,7 M-% und war damit trocken (≤ 20 M-% des Balsaholzplättchens), während er unmittelbar nach der Wässerung noch 100 M-% betrug. Der Feuchtegehalt des Zementestrichs ist von 9,6 M-% im nassen Zustand auf einen Mittelwert von 5,4 M-% am Trocknungsende gesunken.

Die Rohbetonschicht von Raum F hatte am Ende der Trocknung einen mittleren Feuchtegehalt von 5,8 M-%. Am letzten Tag der Wässerung hatte die Betonschicht noch einen mittleren Feuchtegehalt von 5,2 M-%. Hier fand also kaum Trocknung in der Betonebene statt, da im Fußboden von Raum F keine mechanischen Trocknungsgeräte eingesetzt wurden. Raum F blieb ohne Fußbodendämmung. Der gemittelte Feuchtegehalt des Zementestrichs lag am Ende der Trocknungsphase bei 6,3 M-%. Nach der Erzeugung des Wasserschadens betrug der mittlere Feuchtegehalt noch 9,6 M-%.

Die Rohbetonschicht von Raum G hatte am Ende der Trocknung einen mittleren Feuchtegehalt von 3,1 M-%. Am Ende der Bewässerung betrug der Feuchtegehalt noch 5,1 M-%. Der Feuchtegehalt der Fußbodendämmung aus zwei Schichten EPS-Dämmung (gemessen an Balsaholzplättchen) lag am Ende der Trocknung bei einem Mittelwert von 16,5 M-%, während er unmittelbar nach der Wässerung noch 75,4 M-% betrug und sich somit um ca. 59 M-% verringert hatte. Hier kann von trockenen Dämmschichten ausgegangen werden. Der Feuchtegehalt des Zementestrichs ist von 9,6 M-% im nassen Zustand auf einen Mittelwert von 4,1 M-% am Trocknungsende gesunken.

Die Rohbetonschicht von Raum H hatte am Ende der Trocknung einen mittleren Feuchtegehalt von 2,5 M-%. Vom letzten Tag der Wässerung bis zum Ende der Trocknung sank der Feuchtegehalt von 6,0 M-% um 3,5 M-%. Der Feuchtegehalt der Fußbodendämmung aus einer Schicht Perlitschüttung und einer Schicht Mineralfaserdämmung (gemessen an Balsaholzplättchen) lag am Ende der Trocknung bei einem Mittelwert von 14,1 M-%, während er unmittelbar nach der Wässerung noch 79,5 M-% betrug und sich somit um 65,4 M-% verringert hatte. Somit kann von einer trockenen Dämmschicht ausgegangen werden. Der gemittelte Feuchtegehalt des Zementestrichs lag am Ende der Trocknungsphase bei 2,7 M-%. Nach der Wässerung betrug der mittlere Feuchtegehalt noch 9,6 M-%.

Bild 57 zeigt beispielhaft die Feuchteverteilung zwischen den Dämmschichten im Fußboden (gemessen an Balsaholzplättchen in M-%) der Räume E, G und H am Ende der Bewässerung. Der Fußboden von Raum F blieb ohne Fußbodendämmung. In Bild 58 ist die Abnahme der Feuchteverteilung in den Dämmschichten im Fußboden der Räume E, G und H nach ca. vier Wochen mechanischer Trocknung zu erkennen. Bild 59 zeigt den Feuchteverlauf innerhalb der Fußbodendämmschichten über die gesamte Trocknungsdauer.

Ergebnisse Wandtrocknung

Die Wände 7, 8 und 9 in Raum E, aufgebaut mit Porenbetonsteinen und Gipsputz innenseitig, zeigten am Ende des Versuchs aufgrund der unterschiedlichen Trocknungsvarianten unterschiedliche Trocknungsergebnisse. An Wand 9 wurden Werte zwischen 0,9 M-% und 3,7 M-% ermittelt. Bei Wand 7 lagen die Werte zwischen 1,2 M-% und 7,9 M-% und bei Wand 8 zwischen 1,2 M-% und 6,5 M-%. Bild 63 zeigt beispielhaft den Feuchteverlauf von Wand 7 in einer Tiefe von ca. 30 mm und einer Höhe von 40 cm, 30 cm, 20 cm und 10 cm oberhalb des Fußbodens. Im oberen trockenen Bereich der Wände wurden Feuchtegehalte von im Mittel ca. 4,2 M-%, ermittelt. Bei Wand 9 lagen alle Feuchtegehalte unterhalb der im oberen Bereich ermittelten Gleichgewichtsfeuchte von 4,2 M-%. Im Übergangsbereich Wand Boden waren bei den drei Wänden auf Thermografieaufnahmen noch Feuchteanzeichen festzustellen.

Bei den Wänden 10, 11 und 12 in Raum F, aufgebaut aus Hochlochziegeln, Kalkzementputz und innenseitigen Fliesen, stieg die Feuchte über den gesamten Messbereich bis zu einer Höhe von ca. 40 cm. Am Ende der Trocknungsphase lagen die gemessenen Feuchtegehalte der drei Wände ungefähr auf dem gleichen Niveau mit Werten zwischen 0,9 M-% und 1,5 M-% bei Wand 10, 1,1 M-% bis 1,8 M-% bei Wand 11 und 1,6 M-% bis 1,9 M-% bei Wand 12. Die im oberen trockenen Wandabschnitt gemessenen Feuchtegehalte betragen zum Vergleich im Mittel 0,3 M-%.

Die Wände 13, 14 und 15 in Raum G, aufgebaut ebenfalls mit Hochlochziegeln, Kalkzementputz und innenseitigen Fliesen, zeigten am Ende des Versuchs ähnliche Ergebnisse wie die Wände von Raum F. Am Trocknungsende lagen die Feuchtwerte von Wand 13 zwischen 1,2 M-% und 1,6 M-%, von Wand 14 zwischen 1,4 M-% und 1,8 M-% und von Wand 15 zwischen 1,1 M-% und 1,6 M-%. Der Wert der im trockenen Wandbereich ermittelten Gleichgewichtsfeuchte betrug 0,3 M-%.

Die Wände 16, 17 und 18 in Raum H, aufgebaut mit Mauerziegeln, Kalkzementputz und innenseitigen Fliesen waren am Trocknungsende im Bereich der unteren beiden Messreihen teilweise noch nass. Der Feuchtegehalt von Wand 16 war auf Höhe der unteren beiden Sensorreihen zwischen 0,9 M-% und 2,2 M-%, bei Wand 17 zwischen 0,4 M-% und 5,3 M-% und bei Wand 18 zwischen 0,3 M-% und 13,1 M-%. Die Wände 16 und 17 waren im Bereich der oberen beiden Sensorreihen gut getrocknet mit Werten zwischen 0,4 M-% und 1,0 M-%. Wand 18 hatte auch hier noch erhöhte Feuchtwerte zwischen 1,0 M-% und 2,3 M-%. Teilweise lagen am Ende der Trocknungsphase die Messwerte der Wände von Raum H unterhalb bzw. innerhalb der Größenordnung der im trockenen Wandbereich ermittelten Gleichgewichtsfeuchte von 0,5 M-%. Im Sockelbereich, insbesondere bei den Wänden 17 und 18, wurden noch erhöhte Feuchtwerte festgestellt.

Bild 61 zeigt die Feuchteverteilung in den Wänden der Räume E, F, G und H nach dem Ende der Bewässerung und Bild 62 die Feuchteverteilung am Trocknungsende.

Feuchteverhalten nach Abschalten der Trocknungsgeräte

Fußbodenaufbauten

Um Informationen zur Frage zu gewinnen, wie nach einer mechanischen Trocknung der Trocknungserfolg festgestellt werden kann, wurde nach Abschalten der Trocknungsgeräte der Feuchteverlauf im Fußboden durch kapazitive Feuchtesensoren und Temperatursensoren überwacht. Bei den Räumen E und H befand sich ein Sensor jeweils mittig in der Dämmschicht. Die Sensordaten wurden automatisch alle 15 Minuten über eine Dauer von 19 Tagen erfasst. Der Klimasimulator, in dem die Testräume aufgebaut waren, wurde während der ersten neun Tage bei ca. 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchte betrieben. Danach wurde die Klimatisierung abgeschaltet. Hierbei zeigte sich nach Abschaltung der Trocknungsgeräte ein Anstieg der Feuchte, der vermutlich zum einen auf die Abkühlung der Bauteile und einem damit einher gehenden

Anstieg der relativen Luftfeuchte zurückzuführen ist. Zum anderen wurden die Prüfräume auf wasserdampfdiffusionsdichten Teichfolien aufgebaut, die eine zusätzliche Abtrocknung über die Decke, wie im realen Bauwerk meist üblich, verhinderte. Bild 60 zeigt den Anstieg der relativen Feuchte in den Dämmschichten der Räume E (Sensor zwischen Mineralfaserdämmplatte und EPS-Platte) und H (Sensor zwischen Mineralfaserdämmplatte und Perliteschüttung) nach dem Trocknungsende.

Wände

Wie bei den Fußböden der Prüfräume wurde auch teilweise bei den Wänden das Feuchteverhalten nach dem Ende der mechanischen Trocknung überwacht. Die messtechnische Überwachung erfolgte an den Wänden 11 (Hochlochziegel, Raum F) und 14 (Hochlochziegel, Raum G) über einen Zeitraum von 19 Tagen; die ersten neun Tage mit einem Umgebungsklima von 20 °C und 60 % relativer Feuchte, die restliche zehn Tage ohne Klimatisierung. Hierbei zeigte sich nach Abschaltung der Trocknungsgeräte ein Anstieg der im Bohrloch des Mauerwerks gemessenen relativen Feuchte bei F von 66 % r. F. auf 76 % r. F. und bei G von 53 % r. F. auf 80 % r. F., der vermutlich auf die Abkühlung der Bauteile und einem damit einher gehenden Anstieg der relativen Luftfeuchte zurückzuführen ist.

Ein Anstieg der relativen Feuchte in den getrockneten Bauteilen nach dem Abschalten der Trocknungsgeräte ist auch wegen der langsamen Umverteilung von Restfeuchte zu erwarten. Der Feuchteanstieg läuft bei den untersuchten Wand- und Fußbodenaufbauten ziemlich rasch gegen einen Grenzwert, der deutlich unterhalb von 90 % r. F. bleibt. Verglichen mit der zulässigen Grenzluftfeuchte von 95 % r. F. im Bereich der Originalbausubstanz hinter Innendämmsystemen nach WTA 6-4 [13] ist die Feuchtesituation auch nach dem Ausschalten der Trocknungsgeräte als unkritisch zu bewerten. Außerdem ist davon auszugehen, dass auch die verbleibende Restfeuchte weiter austrocknet. Die Gefahr von Schimmelpilzwachstum ist unter diesen Bedingungen nicht gegeben.

3.7 Ergebnisse der hygrothermischen Bauteilsimulationen mit WUFI®

Die Nachberechnung des Trocknungsverlaufs von separat in einer Klimakammer nach Befeuchtung gelagerten Steinen zeigt, dass die Feuchte-transportvorgänge sowohl in den homogenen Vollziegeln (Bild 68) und im Porenbeton wie auch im Hochlochziegel mit dem WUFI®-Simulationsprogramm gut rechnerisch simuliert werden können. Hier sind der anfängliche Wassergehalt sowie die Randbedingungen genau bekannt und die Trocknung erfolgt eindimensional. Die Genauigkeit der gemessenen Trocknungskurve ist aufgrund der Wägung deutlich besser als bei den durch Widerstandsmessungen ermittelten Feuchtegehalten der massiven Baustoffe, die bekannter Weise große Unsicherheiten aufweisen. Zuverlässigere Messmethoden für die Feuchte in den Materialien sind allerdings nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar.

Die Laborversuche weisen ausgeprägte mehrdimensionale Einflüsse auf. Diese machen sich bei der Befeuchtung der Wände von unten und von den Seiten bzw. durch die Fliesenfugen bemerkbar. Bei den Fußböden erfolgt die Befeuchtung von oben. Bei den Leichtbauteilen dringt das Wasser durch Löcher und Spalten ein und verteilt sich mit Sicherheit nicht gleichmäßig im Bauteil. In allen Fällen ist daher von einer sehr inhomogenen Feuchteverteilung bei Start der Trocknungsversuche auszugehen, die nur teilweise durch die verschiedenen Messpunkte erfasst werden konnte. Soweit bekannt, wurde die Anfangsfeuchteverteilung in der Simulation vereinfacht schichtweise über die Bauteildicke berücksichtigt. Innerhalb der Schichten mussten mangels weiterer Informationen homogene Bedingungen angenommen werden.

Bild 69 zeigt beispielhaft den Wandaufbau von Wand 3 in Raum A (Mauerziegel, Gipsputz) und die Positionen der Feuchtesensoren in einer Höhe von 10 cm, 20 cm und 30 cm. In diesen Punkten erfolgte die Nachberechnung. Die Messpunkte in 30 cm Höhe zeigten keine Auffeuchtung mehr. In Bild 70 ist als Beispiel der gemessene, der berechnete und der verschobene Feuchteverlauf im Messpunkt 14 während der natürlichen Trocknung dargestellt. Die Messung zeigt einen verzögerten Trocknungsstart durch eventuelles Restwasser unter der Konstruktion, das nachgesaugt werden konnte. Die Verschiebung des berechneten Feuchteverlaufs zeigt ähnliche Ergebnisse wie die Messungen. Eine weitere Analysemöglichkeit durch die Simulation ist die Bilanzierung der Feuchteströme über die Oberflächen. Bei Wand 3 erfolgten ca. 50 % der Trocknung über die verputzte Innenoberfläche und 50 % über die Rückseite der Wand. Die Berechnungsergebnisse der Porenbetonwand mit Zementputz und Fliesen an der Innenseite (Wand 4)

weichen von den Messwerten der Laborversuche ab. Die Messwerte in den ersten zwei Wochen der Messung deuten darauf hin, dass die Befeuchtung der Wand mehrdimensional und inhomogen erfolgte. Die Abweichungen zwischen den Messwerten und den Berechnungen an einzelnen Messpunkten kann mit Ungenauigkeiten der Widerstandsmessung im Oberflächenbereich bzw. mit stehendem Wasser unter dem Bauteil zusammenhängen. Auch in den Hohlräumen des Fliesenklebers (Auftrag mit Zahnpachtel) konnte gegebenenfalls etwas flüssiges Wasser verbleiben. Diese Effekte werden in der Berechnung nicht berücksichtigt. Der Verlauf des Wassergehalts in den Fußbodenaufbauten der Räume A und B blieb während der natürlichen Trocknung und erwartungsgemäß auch in der Nachberechnung konstant. Es kam in beiden Fällen lediglich zu einer Umverteilung der Feuchte im Fußbodenquerschnitt. In Bild 71 sind die Positionen der Messpunkte im Deckenaufbau D (Lehmpelletfüllung) dargestellt. Bild 72 zeigt beispielhaft den berechneten Verlauf des Wassergehalts in der Lehmschüttung im Vergleich zu den Messwerten, sowohl für den Bereich a als auch für den Bereich b. Der Wassergehalt ist in Prozent der freien Wassersättigung angegeben, da in der Berechnung die Lehmschüttung ausgewertet wird, die Messung allerdings an Balsaholzplättchen erfolgte und somit ein direkter Vergleich der Wassergehalte nicht möglich ist. Es zeigt sich, dass im Bereich a laut Messung keine Trocknung der Lehmschüttung zu erkennen ist, im Bereich b dagegen kommt es zu einer leichten Trocknung. Dieses Verhalten kann auch in der Berechnung gut nachvollzogen werden. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ist hier sehr gut.

Die Nachrechnung des Feuchteverhaltens der Wände 16 (hier Wand 1) und 17 (hier Wand 2) (jeweils Mauerziegel mit Kalkzementputz und Fliesen an der Innenseite) während der mechanischen Trocknung mit IR-Heizplatten ergab an den Messpunkten 34, nahe an der ungefliesten Wandrückseite in einer Höhe von 10 cm über dem Fußboden eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung (Bild 73 und 74). Die Trocknungsdauer und der Endwert werden in der Berechnung gut abgebildet. Bei Wand 2 stieg der Wassergehalt zu Beginn der Messung stärker an als bei der Berechnung. Ab Anfang November stimmen die gemessenen und berechneten Wassergehalte dann gut überein. An den anderen Messpunkten, vor allem in der Nähe der Fliesen stimmen die Messwerte und die berechneten Werte nicht immer gut überein. Ein Vergleich der Messwerte der beiden identischen Vollziegelwände in der Messachse in 20 cm Höhe, bei denen im einen Fall die Wand trocken bleibt und im anderen Fall Wassersättigung erreicht wird, belegt sehr gut, dass die Auffeuchtung und damit auch die Trocknung von realen Bauteilen mehrdimensionalen Effekten und Einflussfaktoren unterworfen sind, die auch in der Praxis nicht immer gleich ablaufen. Die Analyse der Feuchteströme über die Oberflächen hat ergeben, dass nur ca. 8 % der Trocknung über die geflieste Innenoberfläche (bei hohen Oberflächentemperaturen) erfolgt. Die restlichen ca. 92 % der Trocknung erfolgen über die Rückseite der Mauerziegelwände. Die Berechnung des Feuchteverlaufs der Wand 12 aus Hochlochziegeln mit Kalkzementputz und Fliesen an der Innenseite während der mechanischen Trocknung mittels Folienzelt und vorgetrockneter Luft erzielte eine teilweise gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Wie bei allen anderen Nachberechnungen ist auch die Übereinstimmung beim tiefsten Messpunkt am besten. In der Berechnung erfolgt aufgrund der eher dichten Fliesenoberfläche kaum eine Trocknung nach innen. Infolgedessen sind die Feuchtegehalte an den beiden ersten Messpunkten jeweils noch etwas höher als an der weiter außen liegenden Position. Bei der Messung verlief die Trocknung auch an diesen beiden Punkten ähnlich schnell. Dasselbe gilt auch für die Messpunkte in 20 cm Höhe, auch hier trocknet die Wand in der Berechnung zu Beginn etwas schneller, die Wassergehalte am Ende des Messzeitraums bleiben aber 1 M-% bis 3 M-% höher als in der Messung. Die Übereinstimmung am tiefsten Messpunkt in 11 cm Tiefe ist wiederum am besten. Zusätzlich zu den Wänden wurde auch die mechanische Trocknung des Fußbodenaufbaus mittels Unterbodentrocknungssystems des Versuchsraums E nachgerechnet. Bezüglich des Feuchteverlaufs im Beton ergibt sich in der Messung eine langsame Trocknung, während bei der Simulation sogar ein leichter Anstieg der Feuchte zu verzeichnen ist. Bei der Unterestrichtrocknung ist in der Simulation die Luftdurchströmung auf die Mineralwollschicht beschränkt, während die EPS-Dämmung luftdicht und fugenfrei darunter liegt. In der Realität könnte über die Fugen der EPS-Platten auch ein gewisser Luftstrom unter diese Ebene gelangen und im Unterschied zur Simulation eine Trocknung des Betons ermöglichen. Ohne die dampfbremsende EPS-Schicht würde auch in der Berechnung eine Trocknung der Betonschicht stattfinden. Die Nachberechnung des Feuchteverlaufs in der Dämmschicht und im Estrich während der mechanischen Trocknung zeigt jeweils ähnliche Trocknungsverläufe wie bei der Messung. Der berechnete Feuchteverlauf innerhalb der Dämmschicht scheint allerdings wesentlich schneller zu verlaufen als bei der Messung. Dabei ist zu beachten, dass die Messung an Balsaholzplättchen erfolgte und die Trocknung der Holzplättchen aufgrund von deren Sorptionsfähigkeit etwas langsamer erfolgt als es bei der Mineralwolle ohne Holzplättchen in der Berechnung der Fall ist.

Abweichungen zwischen Messung und Berechnung machen sich besonders bei den Wänden nahe an den Oberflächen (z. B. Fliese-Fugen-Bereich) und bei den Leichtbauteilen in den Bereichen der Schüttung und am Holzbalken bemerkbar. Gründe hierfür sind, neben Inhomogenitäten und ungleichmäßiger Anfangsverteilung der Feuchte, auch eventuell vorhandene lösliche Salze, die die elektrische Widerstandsmessung beeinflussen. Weiter innen in den Bauteilen sind die Feuchteunterschiede weniger ausgeprägt, so dass die Austrocknung in der Simulation hier meist gut mit den gemessenen Verhältnissen übereinstimmt. Damit sind an dieser Position zuverlässige Aussagen über die Trocknungsdauer und die erreichten Endwerte innerhalb der Trocknungsphasen möglich. Da die Trocknung im Kernbereich eines Bauteils die eigentlich maßgebliche Größe für den Erfolg einer Trocknungsmaßnahme darstellt, erscheinen die etwas größeren Abweichungen an den Messpunkten näher an den Oberflächen nicht so problematisch, zumal im Zweifel von einer homogenen Durchfeuchtung der Materialien ausgegangen werden sollte.

Auch die beschleunigte technische Trocknung kann bei bekannten Bedingungen in der Simulation mit gleich guter Genauigkeit wie die natürliche Trocknung nachvollzogen werden.

4 Resultate und mögliche Konsequenzen

In vier Versuchsabschnitten wurden an 8 Versuchsräumen, 18 unterschiedlichen Wandaufbauten, 6 unterschiedlichen Fußbodenaufbauten und zwei Holzbalkendecken mit 4 Gefachen, die Trocknungsverläufe bei natürlicher und mechanischer Trocknung über einen Zeitraum von ca. zwei Jahren messtechnisch untersucht. Danach wurden die Trocknungsverläufe per Rechnersimulation mit dem Programm WUFI® (Wärme Und Feuchte Instationär) nachvollzogen. Im Folgenden sind die Versuchsergebnisse und mögliche Konsequenzen in Kurzform zusammengefasst.

Resultate Trocknungsversuche:

Trocknungsversuche an Bodenaufbauten:

Die Trocknung von gefliesten Böden durch die Fugen der Fliesen war nicht erfolgreich.
→ Die Fliesen sollten für die Trocknung entfernt werden.

Die nach Wasserschaden und Trocknung ausgebaute Mineralfaser-Wärme- und Schallschutzdämmmatte behält unverändert ihre Wärmeleitfähigkeit und unverändert die Schallschutzeigenschaften.
→ Ein Rückbau auf Basis der Untersuchungsergebnisse wäre nicht erforderlich. Im realen Fall kann jedoch aufgrund von Verunreinigungen, Pilzen, Bakterien etc. eine Desinfektion oder ein Rückbau erforderlich werden.

Die Unterestrichtrocknungen waren erfolgreich bei folgenden unter dem Estrich angeordneten Dämmschichtkombinationen:

EPS/Mineralwolle

EPS/EPS

Perlite/Mineralwolle

→ Aufgrund der Versuchsergebnisse wäre hier kein Ausbau erforderlich.

Bei der Unterestrichtrocknung der Dämmschichten trockneten die Dämmschichten, nicht aber der Estrich.
→ Deshalb ist eine Verbesserung der Estrichtrocknung in Kombination mit der Dämmschichttrocknung erforderlich.

Auch die Feuchtegehalte der Rohdecke (Betonplatten) waren nach der Unterestrichtrocknung noch deutlich oberhalb die Ausgangswerte.

→ Eine Verbesserung der Unterestrichtrocknung mit Trocknung der Rohdecke ist wünschenswert und sollte weiter untersucht werden.

Trocknungsversuche an Holzbalkendecken mit Schlackeschüttung und mit Lehmfüllung:

Die Versuche zeigten eine erfolgreiche Trocknung der Schlackeschüttungen. Auch die Trocknung der lehmgefüllten Holzbalkendecken war im dritten Anlauf mit hoher Temperatur von unten und warmem Luftstrom von oben im Intervallbetrieb erfolgreich.

→ Die Trocknung einer Lehmfüllung mit hoher Temperatur von unten und Luftstrom von oben sollte in der Praxis auf ihre Anwendbarkeit überprüft werden.

Trocknung von Leichtbauwänden:

Es wurde trotz Wasserschadens keine Setzung der Mineralfaser im Zwischenraum der Leichtbauwände festgestellt.

→ Eine Trocknung war möglich, jedoch bleibt die Gefahr der Schimmelbildung an den Gips-Kartonplatten, sofern nicht unmittelbar getrocknet wird.

Trocknung von massiven Wänden:

In den Versuchsabschnitten konnten Leichtbetonwände, Hochlochziegelmauerwerke, Mauern mit Mauerziegeln sowie Gipswandbauplatten mit IR-Strahlungsheizplatten erfolgreich getrocknet werden. Auch die Trocknung der Wände mit Hilfe von Folienzelten mit und ohne Trocknungsbohrungen funktionierte.

→ Es sollte abgewogen werden, welche Trocknungstechnik einfacher, kostengünstiger und geräuschärmer ist.

IR-Strahlungsheizplatten führten im Intervallbetrieb zu fast gleichen Trocknungsergebnissen wie IR-Heizplatten mit konstanter Heizleistung.

→ Dieses Verhalten sollte weiter im Hinblick auf Stromkostensparnis durch Intervallheizung mit IR-Heizplatten wie auch bei intervallgeschalteter Lufttrocknung untersucht und gegebenenfalls genutzt werden.

Die Trocknung einseitig gefliester Wände war mit IR-Strahlungsplatten erfolgreich.

→ Jedoch ist die Trocknung von beidseitig gefliesten oder diffusionsdichten Wänden nicht möglich. Dies geht aus den Rechnersimulationen hervor.

Bei allen Versuchen gab es verbleibende Feuchte im Übergang Wand/Boden.

→ Die Trocknungssysteme sollten für die Trocknung des Übergangs Wand/Boden weiterentwickelt werden.

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist bei den unterschiedlichen Wandtypen verschieden.

→ Die Trocknungsdauer je Wandtyp/Material sollte weiter erforscht werden, so dass eventuell eine verkürzte Trocknungsdauer bei bestimmten Wandtypen erreicht werden kann.

Die Trocknungsdauer mit IR-Strahlungsheizungen ist abhängig von der Oberflächentemperatur der zu trocknenden Wand.

→ Eine Verkürzung der Trocknungsdauer könnte durch Festlegung optimaler nicht materialschädigender Oberflächentemperaturen erreicht werden.

Resultate Hygrothermische Bauteilsimulation mit dem Programm WUFI®:

Die Nachrechnung der Trocknungsverläufe einzelner Mauersteine in der Klimakammer (natürliche Trocknung) zeigte, dass mit den bekannten Start- und Randbedingungen die Feuchtetransportvorgänge sehr gut nachvollzogen werden konnten.

→ Damit könnte man zukünftig eine Abschätzung des Trocknungsverhaltens und der Trocknungsdauer vorab mit WUFI® durchführen.

Die Simulation des Trocknungsverlaufs des Vollziegelmauerwerks mit Gipsputz (natürliche Trocknung) und anderer Steintypen führte zu dem Ergebnis, dass

→ abgesehen von temporären Abweichungen durch die Simulation eine recht zuverlässige Aussage über die Dauer der Trocknung und die Feuchteverteilung über die Tiefe des Mauerwerks möglich ist.

Die Simulation des Trocknungsverlaufs der Vollziegelwände mit Trocknung mittels IR-Heizplatten u. a. führte zum Ergebnis, dass die Übereinstimmung an den tieferen Messpositionen am besten ist. Hier liegen offensichtlich auch beim Versuch homogenere Verhältnisse vor. An den Messpunkten direkt unter den Fliesen sind die Abweichungen deutlich größer.

→ Ziel: Rechnerbasierte Auswahl der Trocknungstechnik und Abschätzung der Trocknungsdauer.

Vorschlag für weiterführende Untersuchungen:

Als Basis für die Optimierung der technischen Bautrocknungen werden die folgenden weiteren Schritte vorgeschlagen:

Rechnerische Parameterstudien und Validierungsmessungen zur Erforschung und Optimierung von Trocknungsdauer und Trocken-Algorithmen in Abhängigkeit der Temperatur, von Trocknungs-, Heiz- Intervalldauer, in Abhängigkeit des Wandaufbaus, des Materials und von unterschiedlichen Wanddicken.

Damit könnten Empfehlungen für die Durchführung von Trocknungen erarbeitet oder ergänzt werden.

5 Literatur

- [1] Prüfbericht P17-172/2015, Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Fußbodenaufbauten und angrenzenden Wänden mit natürlicher Trocknung nach einem Wasserschaden, Stuttgart, 1. Juli 2015, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [2] Prüfbericht P17-173/2015, Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Deckenaufbauten mit Schlacke- und Lehmfüllungen nach Wasserschaden mit natürlicher Trocknung, Stuttgart, 9. Juli 2015, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [3] Prüfbericht P17-174/2015, Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Fußbodenaufbauten und angrenzenden Wänden mit mechanischer Trocknung nach einem Wasserschaden, Stuttgart, 21. Juli 2015, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [4] Prüfbericht P17-175/2015, Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Deckenaufbauten nach Wasserschaden mit mechanischer Trocknung, Stuttgart, 23. Juli 2015, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [5] Prüfbericht P17-028/2016, Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Fußbodenaufbauten und angrenzenden Wänden mit mechanischer Trocknung nach einem Wasserschaden, Stuttgart, 15. Februar 2016, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [6] IBP-Bericht HTB-022/2016, Trocknungsverhalten bei Feuchteschäden – Hygrothermische Bauteilsimulationen, Valley, 28. Juli 2016, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [7] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [8] WTA-Merkblatt 6-2-14/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Dezember 2014.
- [9] DIN EN 15026:2007-07 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Beuth Verlag, Berlin.

- [10] DIN EN 12667:2001-05 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001-05 Beuth-Verlag, Berlin.
- [11] DIN EN 13162:2015-04 Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13162:2012+A1:2015 Beuth-Verlag, Berlin.
- [12] Bednar, T.: Beurteilung des Feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Dissertation Technische Universität Wien 2000.
- [13] WTA Merkblatt 6-5-14/D: Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. April 2014.

Hinweis:

Das Ergebnis bezieht sich ausschließlich auf den geprüften Gegenstand.

Dieser Prüfbericht besteht aus 17 Seiten Text, 6 Tabellen und 74 Bildern.

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

Stuttgart, 28. Februar 2017/JL

Abteilungsleiter


Prof. Dr.-Ing. Hartwig Künzel



Bearbeiter


Dipl.-Ing. (FH) Andreas Zegowitz

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf der Versuche.

Zeitraum	Versuchsbeschreibung
11/2014 – 01/2015	1. Versuchsabschnitt Räume A, B, C, D, natürliche Trocknung
11/2014 – 01/2015	1. Versuchsabschnitt Räume C und D mit Holzbalkendecken, natürliche Trocknung
01/2015 – 03/2015	2. Versuchsabschnitt Räume A und B, mechanische Trocknung
01/2015 – 03/2015	2. Versuchsabschnitt Räume C und D mit Holzbalkendecken, mechanische Trocknung
04/2015 – 05/2015	3. Versuchsabschnitt Raum D, Holzbalkendecke mit Lehm pellets, mechanische Trocknung
10/2015 – 11/2015	4. Versuchsabschnitt Räume E, F, G und H, mechanische Trocknung
11/2015 – 12/2015	Ergänzender Versuch zum 4. Versuchsabschnitt, Feuchteverhalten nach Abschalten der Trocknungsgeräte

Tabelle 2: Aufbau der Prüfräume A, B, C und D.

Räume A und B	
Einbauort	Materialbezeichnung
Wand 1/6 Raum A/B	Gipswandbauplatten DIN 18163
	Kleber Classic Weiss 90 EN 12860
	Gips-Kartonplatten DIN 18180
	Dämmung (MW): Trennwand-Platte Akustic TP1; 0,04 W/mK
Wand 2/5 Raum A/B	Gips-Kartonplatten DIN 18180
	Dämmung (MW): Trennwand-Platte Akustic TP1; 0,04 W/mK
Wand 3 Raum A	Vollziegel MZ NF
	Zementmörtel
Wand 4 Raum B	Porenbeton Plansteine
	Dünnbettmörtel DIN V 18580 für Porenbeton
	Fliese innenseitig
Boden Raum A	Fliese
	Zementestrich Fertigmischung
	Betonplatten
	Teichfolie
Boden Raum B	Fliese
	Zementestrich Fertigmischung
	Trennfolie
	Dämmung (MW): Akustic EP3 Estrich-Dämmplatte; 0,04 W/mK
	Dämmstreifen
	Betonplatten
	Teichfolie
Räume C und D	
Einbauort	Materialbezeichnung
Holzbalkendecke Raum C	Fichtenholz (Dielen)
	Fichtenholz (Querbalken)
	Schlacke / Holzkohle (Schüttung)
	Schutzbahn (Polyolefin)
	Fichtenholz (Putzträgerlattung)
	Rippenstreckmetall (Putzträger)
	Kalkzementputz
	Gipsputz
Holzbalkendecke Raum D	Fichtenholz (Dielen)
	Fichtenholz (Querbalken)
	Lehmwickel (Schüttung)
	Schutzbahn (Polyolefin)
	Fichtenholz (Blindboden)
	Fichtenholz (Putzträgerlattung)
	Schilfrohr (Putzträger)
	Kalkzementputz
	Gipsputz

Tabelle 3: Aufbau der Prüfräume E, F, G und H.

Räume E, F, G und H	
Einbauort	Materialbezeichnung
Wand 7/8/9 Raum E	Porenbetonstein
	Porenbetonkleber
	Gipsputz HP 100
Boden Raum E	Zementestrich (schwimmend) 50 mm
	Trennfolie
	Mineralfaserdämmplatte EP1 25 mm
	EPS-Dämmplatte 25 mm
	Betonplatten
	Teichfolie
Wand 10/11/12 Raum F	Hochlochziegel Plan-T
	Poroton-T-Dünnbettmörtel
	Kalkzement/Grundputz MEP
	Fliesen innenliegend
	Fliesenkleber: Flexkleber
Boden Raum F	Zementestrich als Verbundestrich 50 mm
	Betonplatten
	Teichfolie
Wand 13/14/15 Raum G	Hochlochziegel Plan-T
	Poroton-T-Dünnbettmörtel
	Kalkzement/Grundputz MEP
	Fliesen innenliegend
	Fliesenkleber: Flexkleber
Boden Raum G	Zementestrich (schwimmend) 50 mm
	Trennfolie
	EPS-Dämmplatten 2 x 30 mm
	Betonplatten
	Teichfolie
Wand 16/17/18 Raum H	Mauerziegel
	Zementmörtel ZM 92
	Kalkzementputz
	Fliesen innenliegend
	Fliesenkleber: Flexkleber
Boden Raum H	Zementestrich (schwimmend) 50 mm
	Trennfolie
	Mineralfaserdämmplatte EP 3 12 mm
	40 mm Perlitschüttung
	Betonplatten
	Teichfolie

Tabelle 4: Trocknungsvarianten der Räume A, B, C und D während des 2. und 3. Versuchsabschnitts.

1. Versuchsabschnitt		
Natürliche Trocknung		
2. Versuchsabschnitt		
Einbauort		Trocknungsmethode
Raum A	Fußboden	IR-Heizplatten
	Wand 1	Adsorptionstrocknung (Wandflächentrocknung)
	Wand 2	keine Trocknungsmaßnahme
	Wand 3	Adsorptionstrocknung (Wandflächentrocknung)
Raum B	Fußboden	Trocknung im Unterdruck über Bohrloch im Fußboden
	Wand 4	IR-Heizplatten
	Wand 5	Adsorptionstrocknung im Überdruck
	Wand 6	Heizplatte (über gesamte Wandfläche)
Raum C	Raum Ca	IR-Heizplatte
		Trocknung im Unterdruck mittels Turbine
	Raum Cb	Trocknung im Unterdruck mittels Turbine
Raum D	Raum Da	IR-Heizplatte
		Trocknung im Unterdruck mittels Turbine
	Raum Db	Trocknung im Unterdruck mittels Turbine
3. Versuchsabschnitt (Intervalltrocknung)		
Einbauort		Trocknungsmethode
Raum D	Raum Da	IR-Heizplatte
		Trocknung im Unterdruck mittels Turbine
	Raum Db	IR-Heizplatte
		Adsorptionstrocknung mit geringem Überdruck ohne Zusatzheizung

Tabelle 5: Trocknungsvarianten der Räume E, F, G und H während des 4. Versuchsabschnitts.

4. Versuchsabschnitt		
	Einbauort	Trocknungsmethode
Raum E	Fußboden	Unterestrichtrocknung
	Wand 7	Adsorptionstrocknung (Wandflächentrocknung)
	Wand 8	IR-Heizplatten (IRES)
	Wand 9	IR-Heizplatten (Ensama)
Raum F	Fußboden	keine Trocknung
	Wand 10	IR-Heizplatten (IRES)
	Wand 11	IR-Heizplatten (IRES)
	Wand 12	Adsorptionstrocknung (Wandflächentrocknung)
Raum G	Fußboden	Unterestrichtrocknung
	Wand 13	IR-Heizplatten (IRES) mit IR- Ecktrocknungsplatte
	Wand 14	Adsorptionstrocknung (Wandflächentrocknung)
	Wand 15	IR-Heizplatten (Ensama)
Raum H	Fußboden	Unterestrichtrocknung
	Wand 16	IR-Heizplatten (IRES)
	Wand 17	IR-Heizplatten (IRES)
	Wand 18	Adsorptionstrocknung (Wandflächentrocknung)

Tabelle 6: Legende für die nachfolgenden Zeichnungen (Bilder 1 bis 6 und 32 bis 35).

A	Raum A
B	Raum B
a	Abschnitt a innerhalb eines Prüfraums
b	Abschnitt b innerhalb eines Prüfraums
Bal	Balken
Bb	Blindboden
Bet	Beton
C	Raum C
D	Raum D
E	Raum E
Eps	hier: Bezeichnung der Widerstandssensoren in der Dämmschicht unabhängig vom tatsächlich eingesetzten Dämmmaterial
Es	Estrich (Kürzel der kapazitiven Feuchtesensoren)
Est	Estrich (Kürzel der Widerstandssensoren)
F	Raum F
F	kapazitiver Feuchtesensor
G	Raum G
H	Raum H
MW	Mineralwolle
P	Position
rF	relative Feuchte
S	Schnitt
Schü	Schüttung
T	Temperatur
W	Wand
	kapazitiver Feuchtesensor
	Widerstandssensor
	Thermoelement

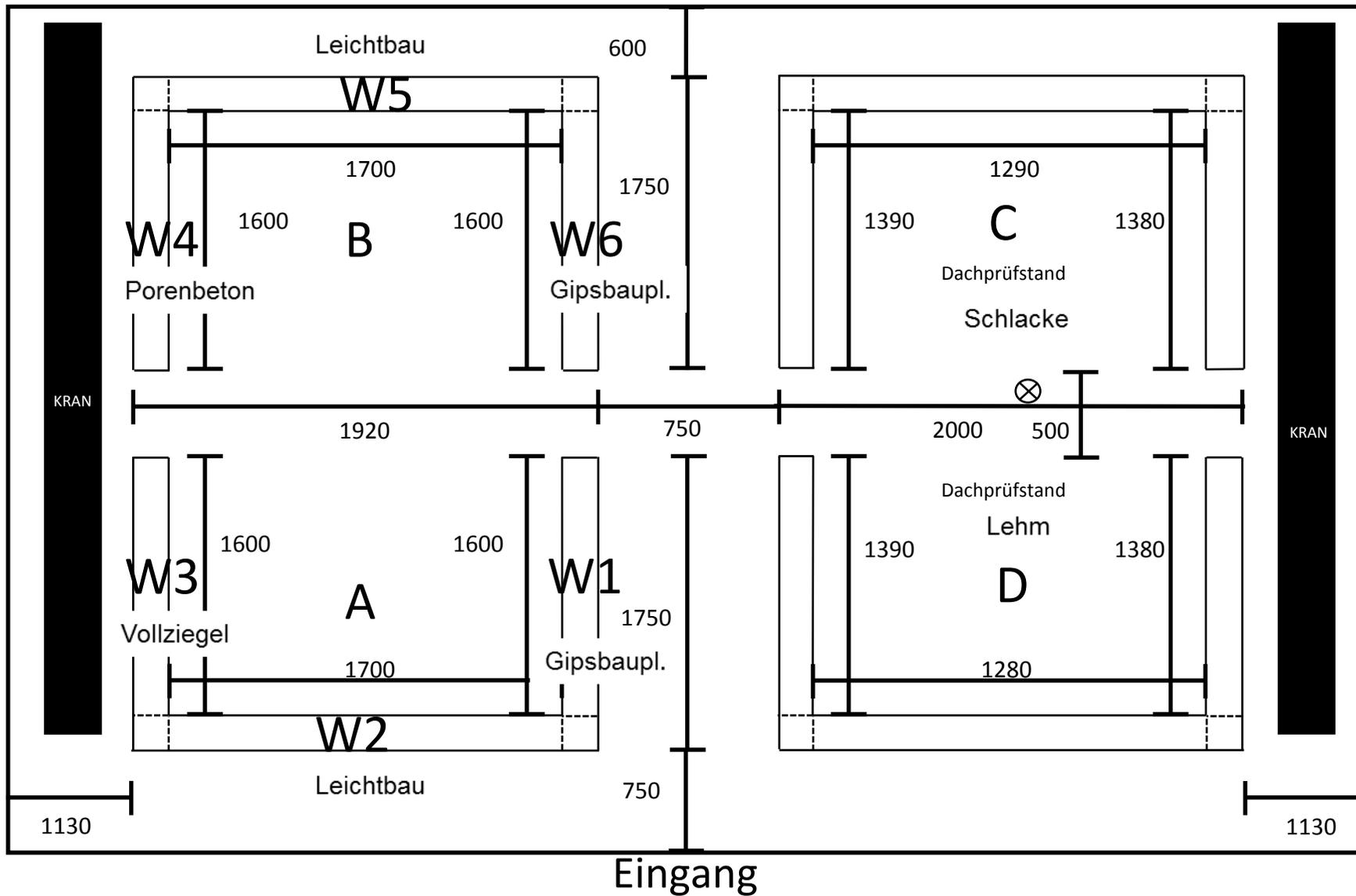


Bild 1: Ansicht der Versuchsräume A bis D mit den entsprechenden Abmessungen.

Bodenaufbau Raum A, Schnitt W1/W3

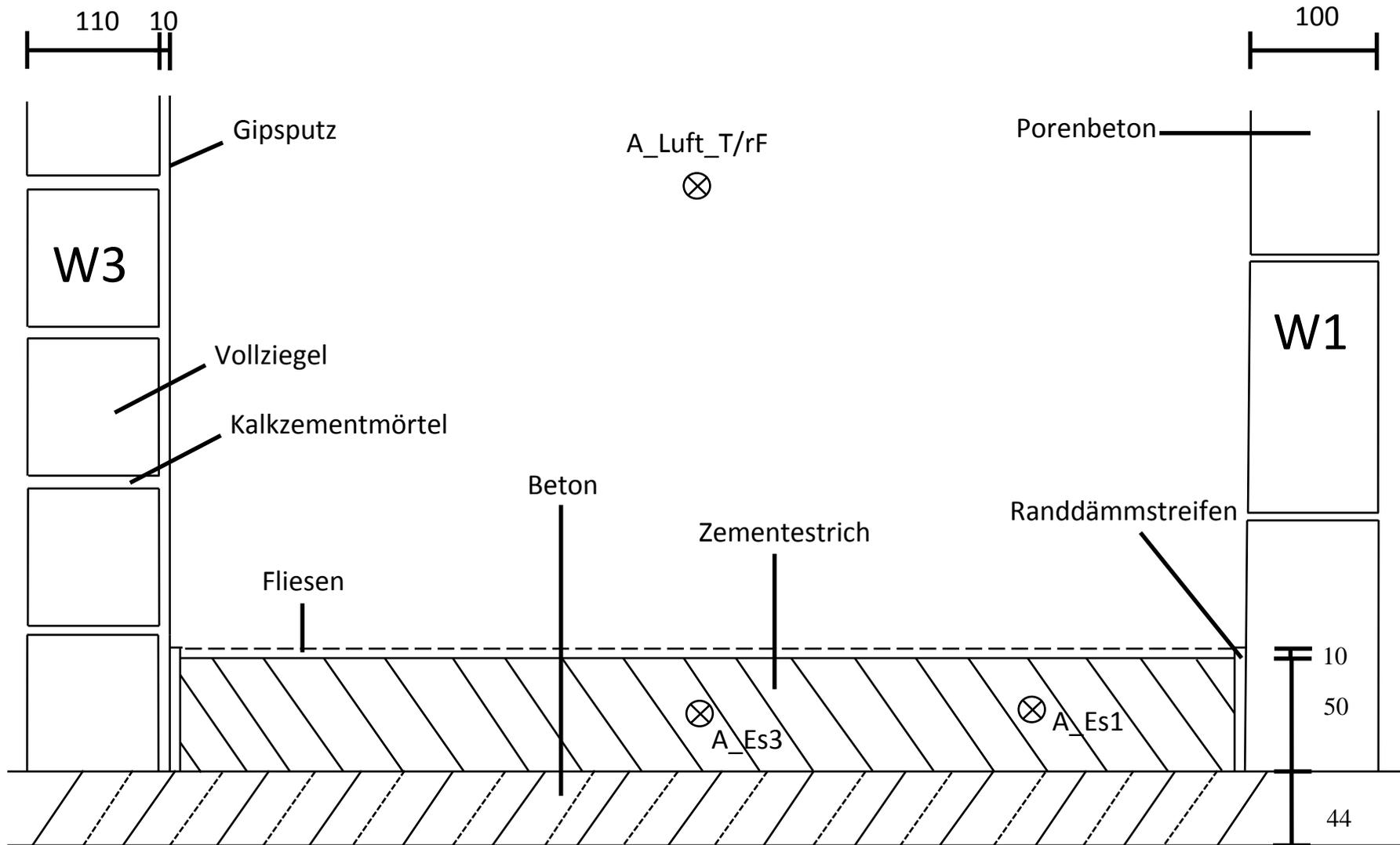


Bild 2: Beispielhafte Darstellung: Schnitt W1/W3 durch den Versuchsraum A mit den einzelnen Bauteilebenen und den kapazitiven Messsensoren in der Raummitte und im Fußboden.

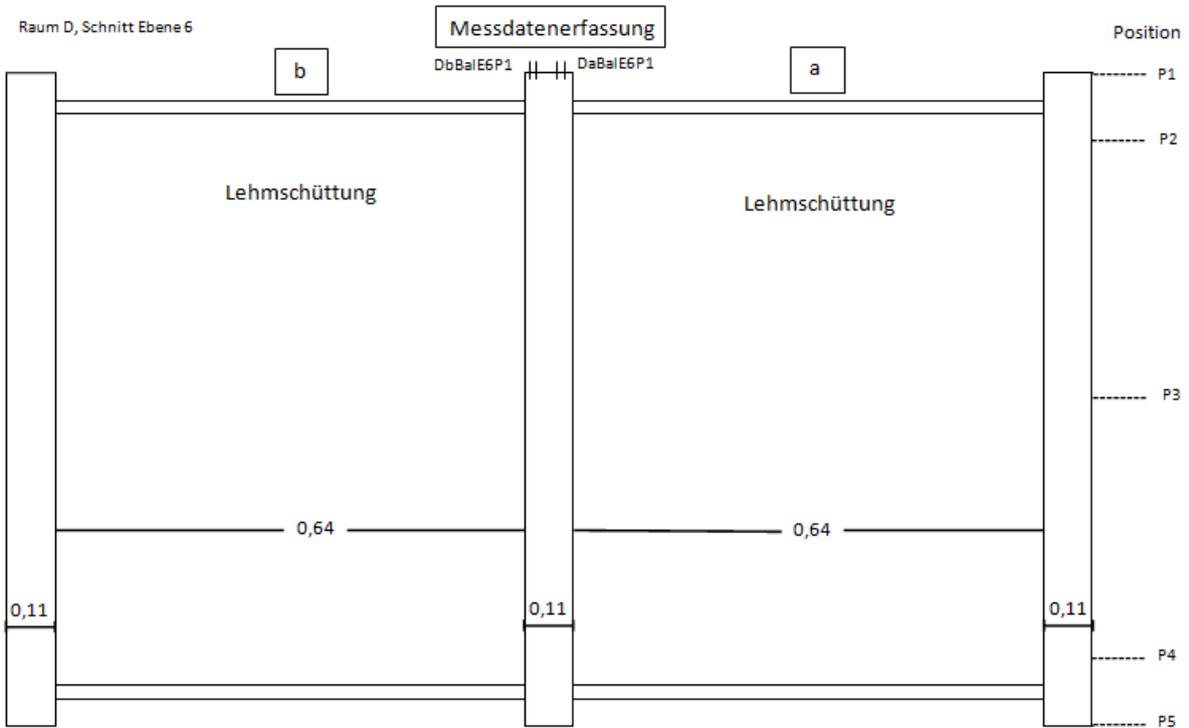
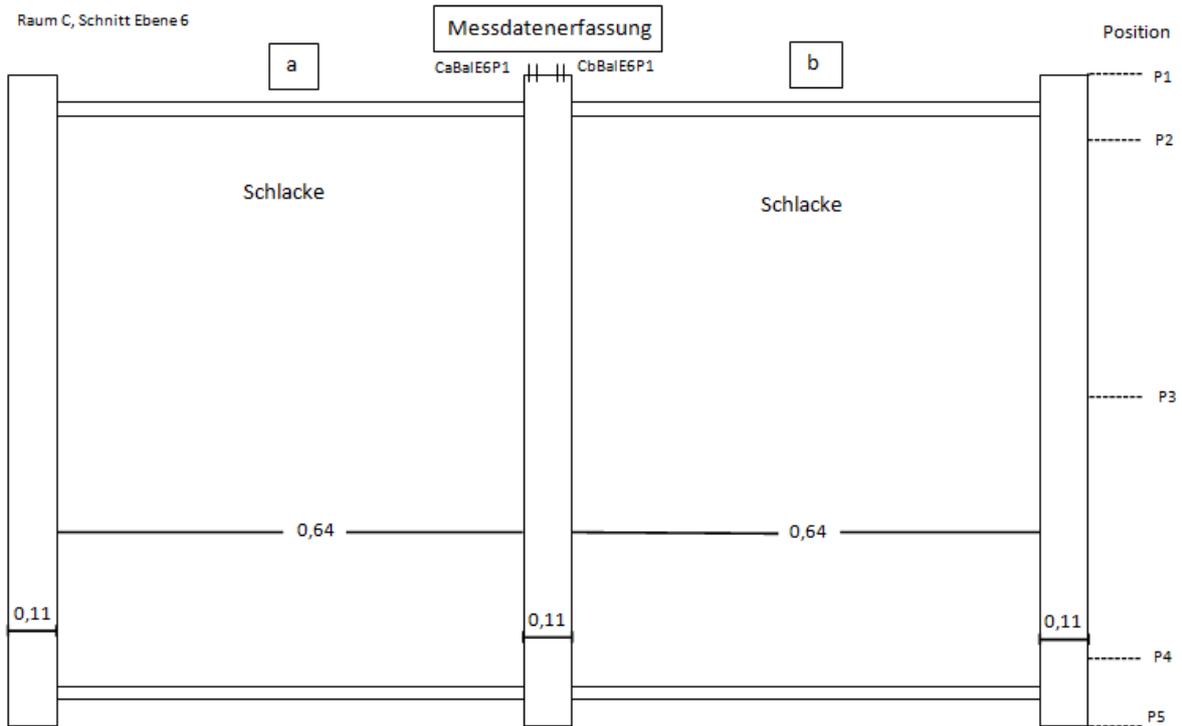


Bild 3: Beispielhafte Darstellung: Schnitt durch die Ebene 3 der Versuchsräume C und D mit den Teilräumen Ca, Cb, Da und Db.

Raum D, Schnitt P 3; Schnitt Stirnseite Balken (P 1)

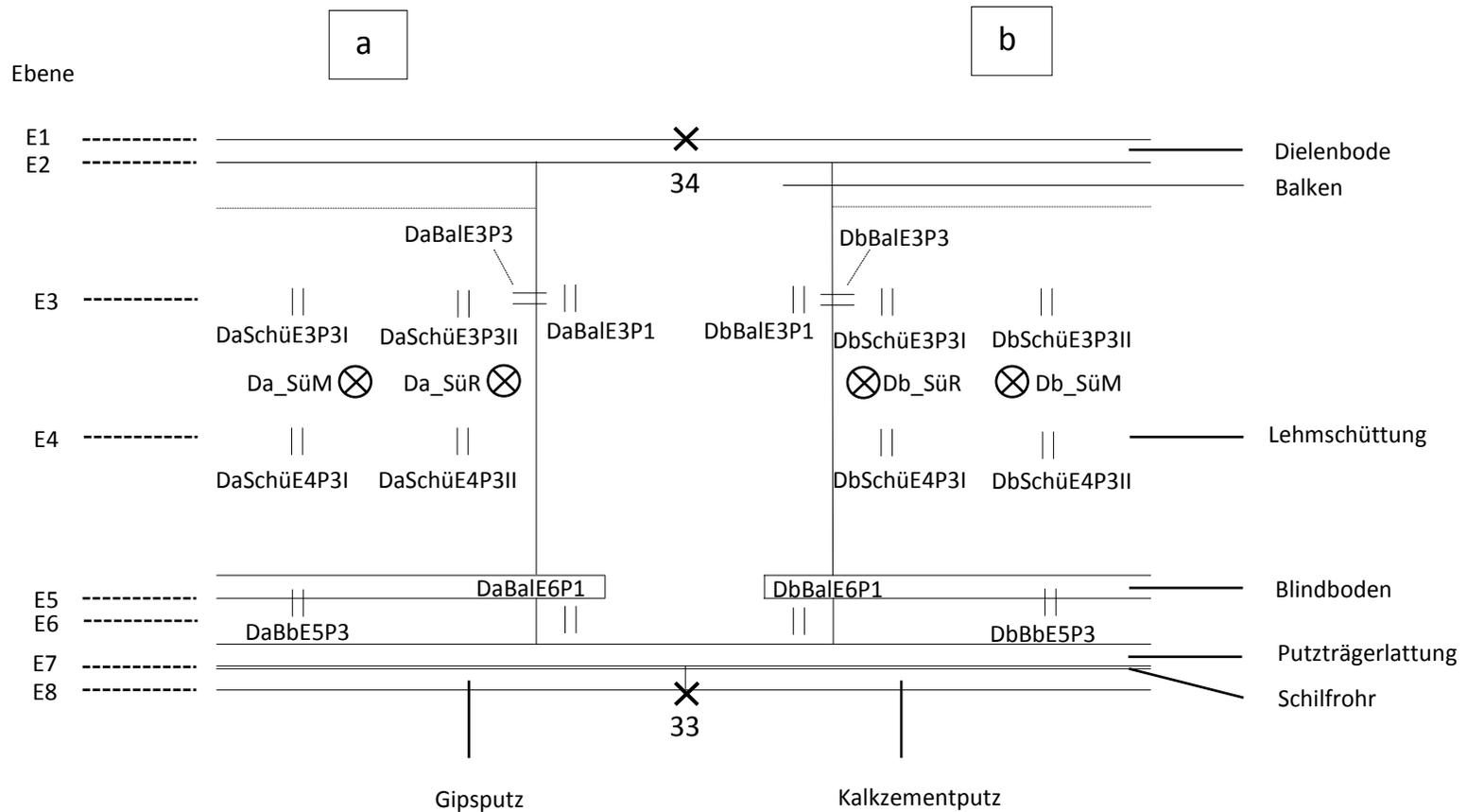


Bild 4: Beispielhafte Darstellung: Schnitt an der Stirnseite des Holzbalkens (Position 1) und in der Mitte der Schüttung (Position 3) von Raum D mit der Anordnung der Messensoren.

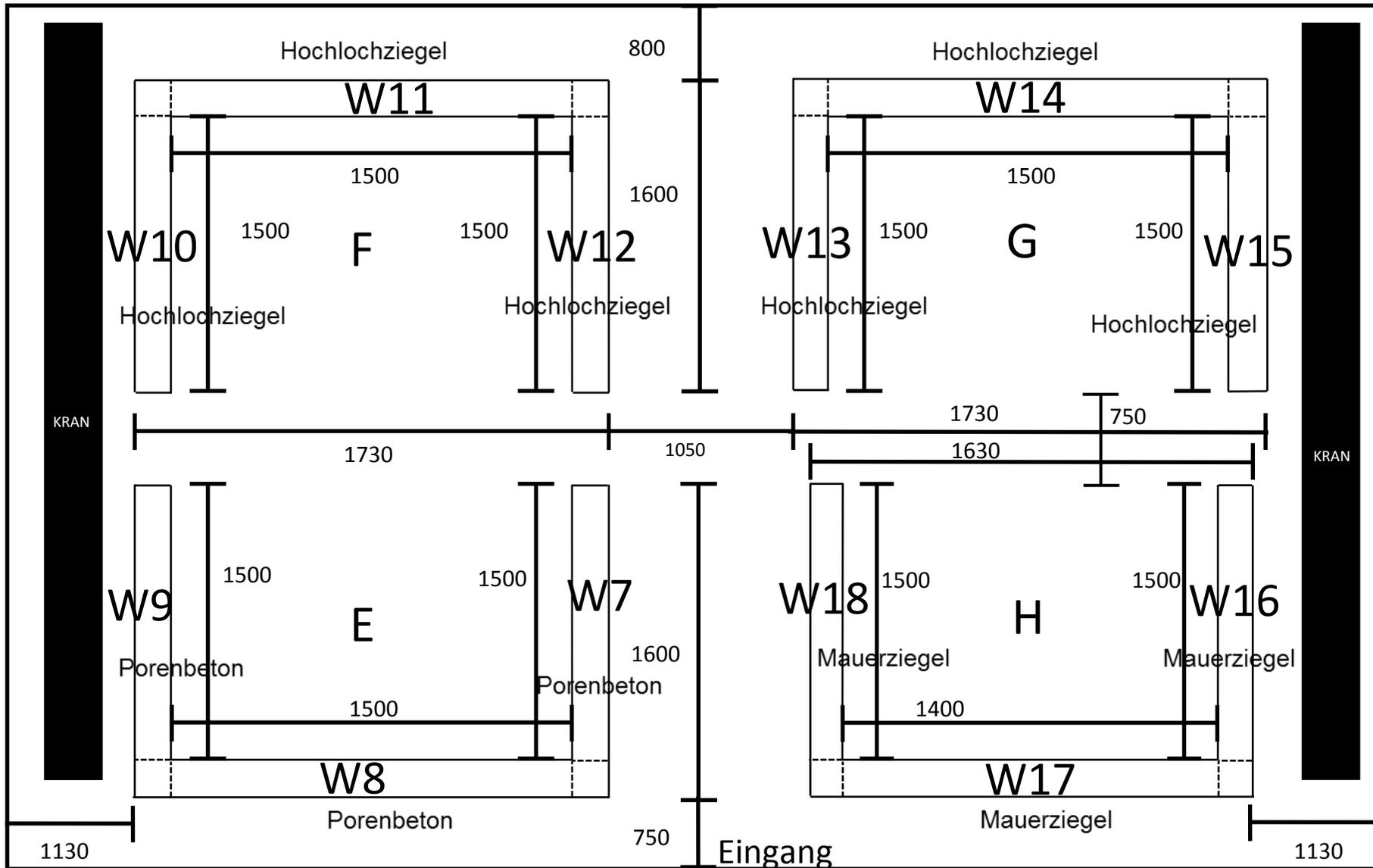


Bild 5: Ansicht und Abmessungen der Versuchsräume E bis H.

Bodenaufbau Raum E, Schnitt W7/W9

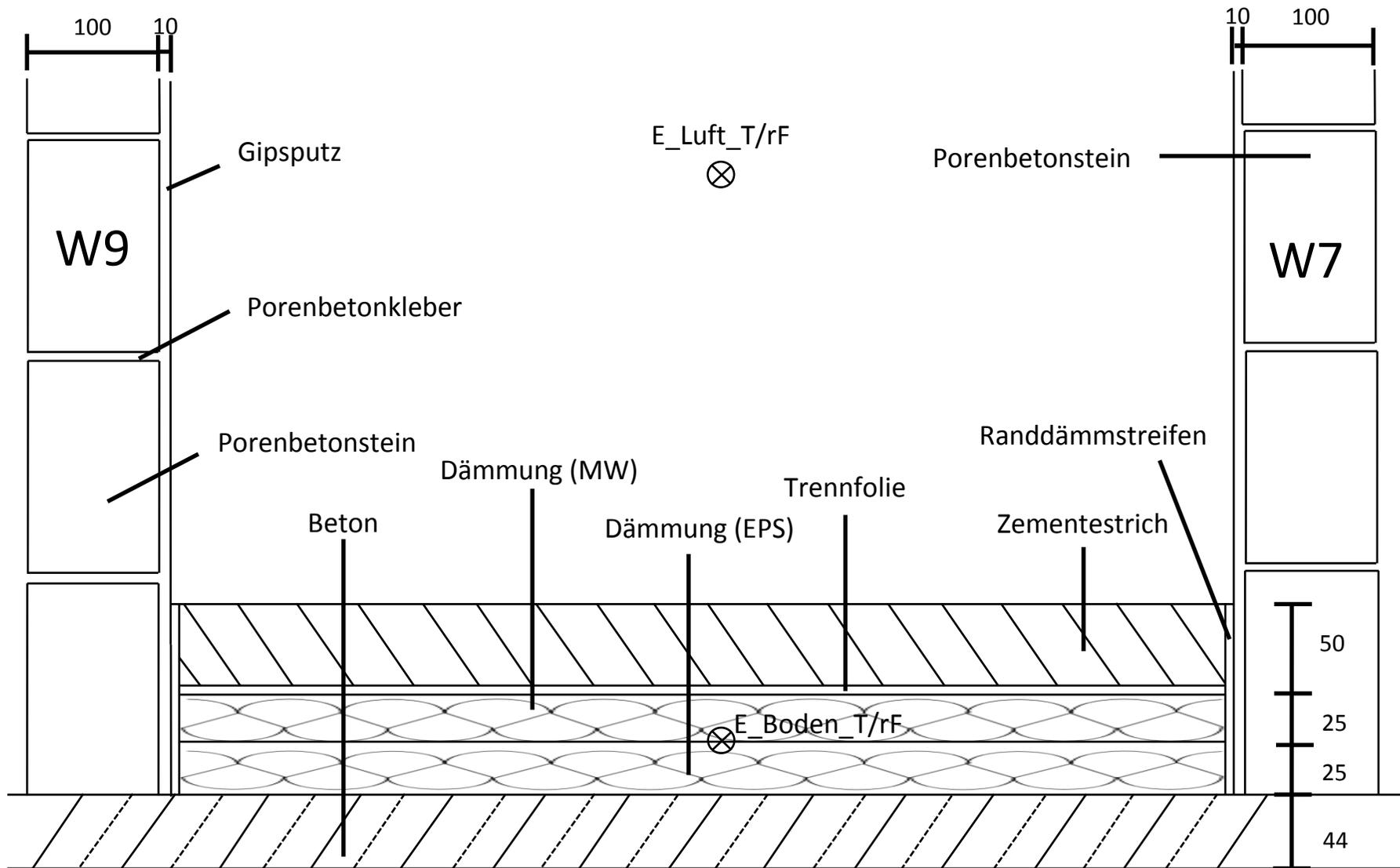


Bild 6: Beispielhafter Schnitt W7/W9 durch den Versuchsraum E mit den Bauteilebenen und den kapazitiven Messsensoren (rel. Luftfeuchte) in Raummitte und Fußboden.



Bild 7: Fußbodenaufbau – Beton mit darunterliegender Folie (Räum A, B, E, F, G und H).



Bild 8: Wand 1 (Gipswandbauplatten) und Dämmung von Wand 2 (Leichtbauwand).



Bild 9: Wände 3 (Vollziegel) und 4 (Porenbeton-Plansteine).



Bild 10: Dämmung von Wand 5 (Leichtbauwand).



Bild 11: Wand 6 (Gipswandbauplatten) und Gesamtansicht von Raum B.



Bild 12: Fußbodenaufbau – Dämmung (Raum B).



Bild 13: Fußbodenaufbau – Folie zwischen Dämmung und Estrich (Raum B).



Bild 14: Fußbodenaufbau – Estrich (Raum A und B).

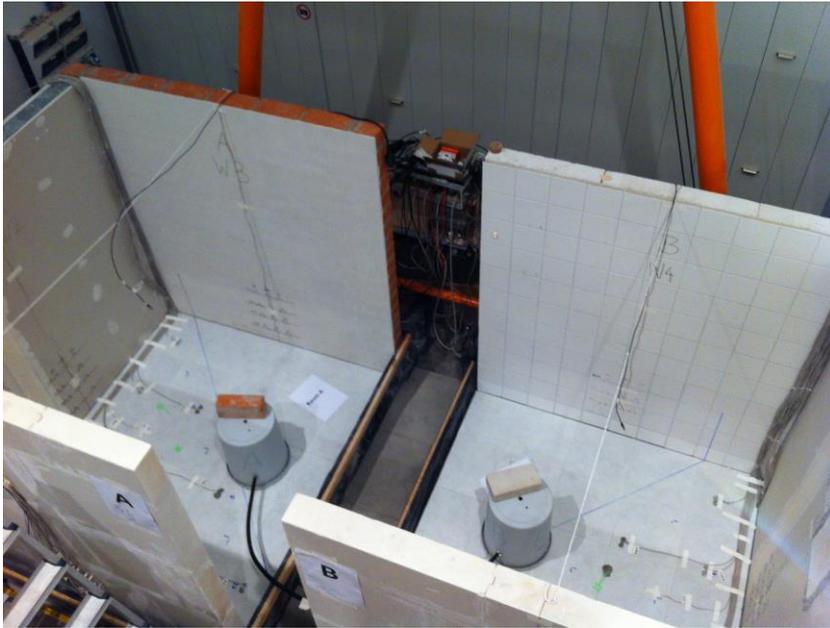


Bild 15: Gesamtansicht der Prüfräume A und B im Klimasimulator.



Bild 16: Holzbalken und Putzträgerlattung von Raum C.



Bild 17: Holzbalken und Blindboden (Ebene 5) oberhalb der Putzträgerlattung von Raum D.



Bild 18: Schutzbahn unter der jeweiligen Schüttung (Raum C und D) und Widerstandssensor im mittleren Balken.



Bild 19: Schüttung von Raum C (Schlacke, Holzkohle) mit den installierten Widerstandssensoren.



Bild 20: Detailansicht der Schüttung von Raum D (Lehmpellets) mit einem integrierten Widerstandssensor.



Bild 21: Ummauerung der Holzbalkendecke mit Kabeldurchführung (Raum C und D).



Bild 22: Deckenputz von Raum D.



Bild 23: Oberseite des Deckenaufbaus (Raum C und D).

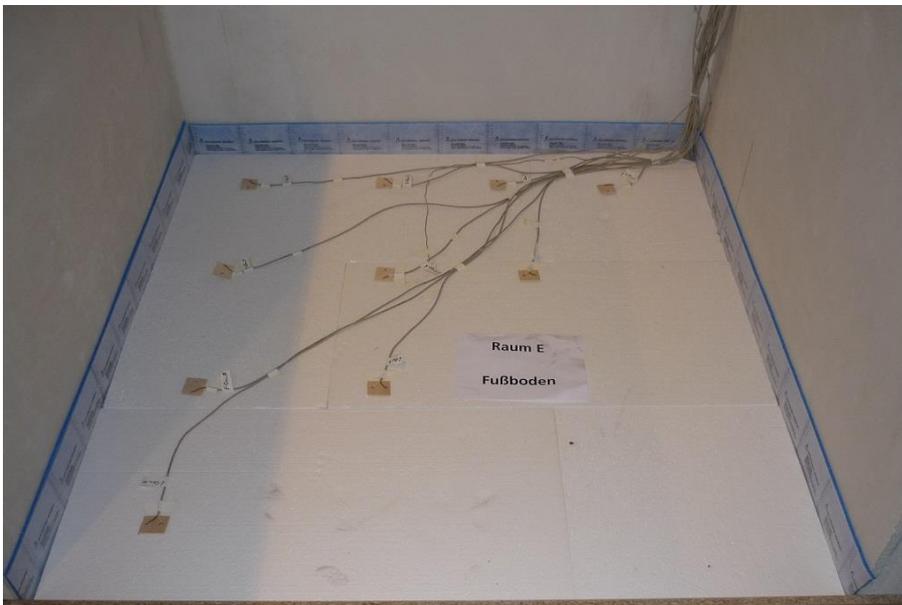


Bild 24: Fußbodenaufbau **Raum E** – untere Dämmebene - EPS-Dämmplatten.



Bild 25: Fußbodenaufbau **Raum E** – obere Dämmebene - Mineralfaserdämmplatten.



Bild 26: Fußbodenaufbau **Raum G** – untere Dämmebene – EPS-Dämmplatten.

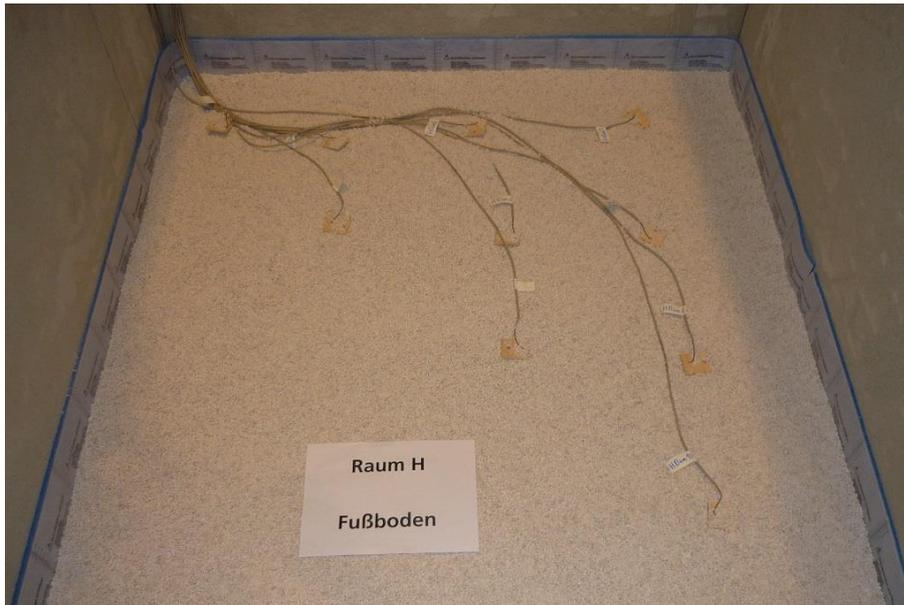


Bild 27: Fußbodenaufbau **Raum H** – untere Dämmebene – Perlitschüttung.

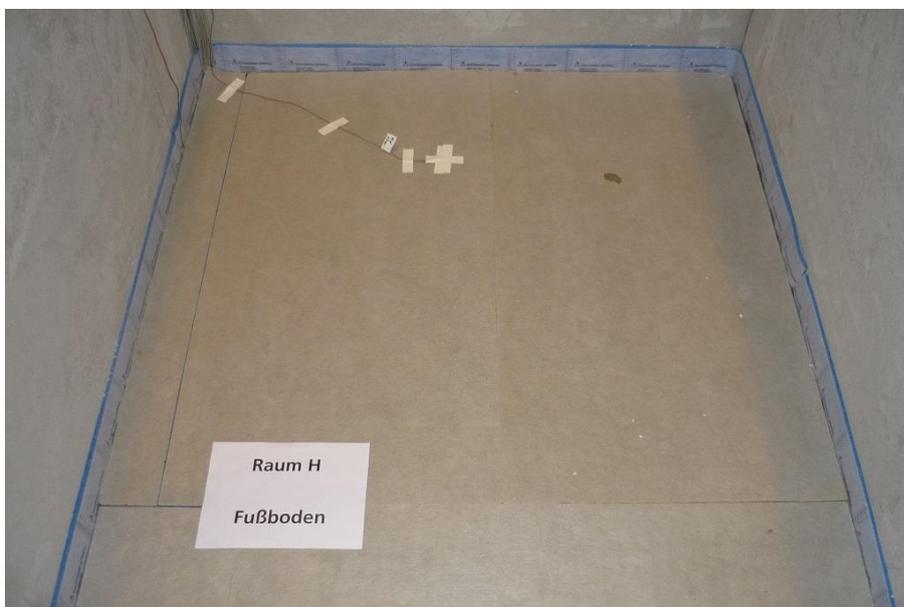


Bild 28: Fußbodenaufbau **Raum H** – obere Dämmebene – Mineralfaserdämmplatten.



Bild 29: Fußbodenaufbau **Raum E, G und H** – Folie zwischen Dämmebene und Estrich.



Bild 30: Fußbodenaufbau **Raum E, F, G und H** – Estrich.



Bild 31: Gesamtansicht der Prüfräume E, F, G und H im Klimasimulator.

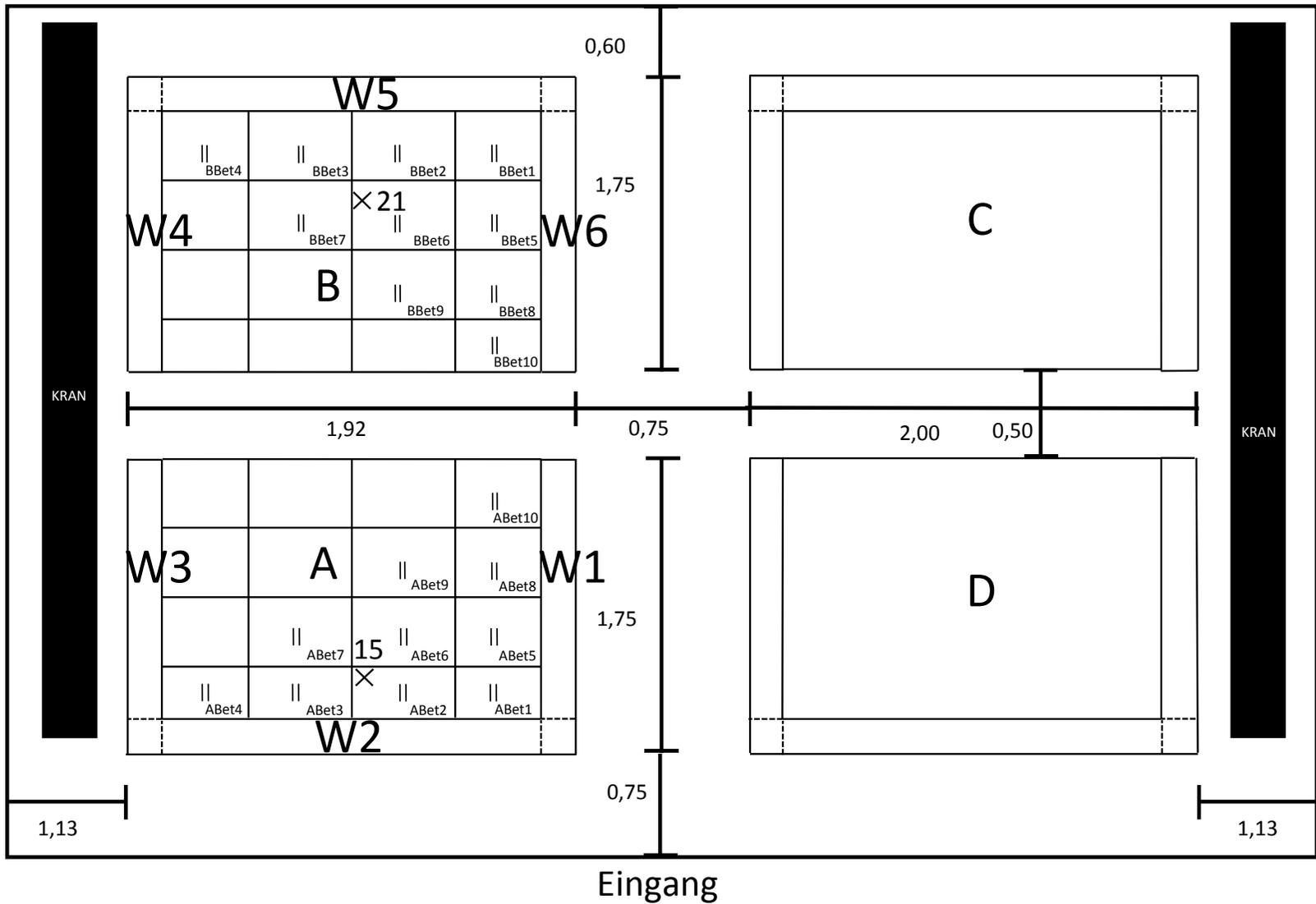


Bild 32: Ansicht der Betonebene der Räume A und B mit den entsprechenden Sensorpositionen der Widerstandssensoren und der Thermoelemente.

Raum D, Schnitt Ebene 3

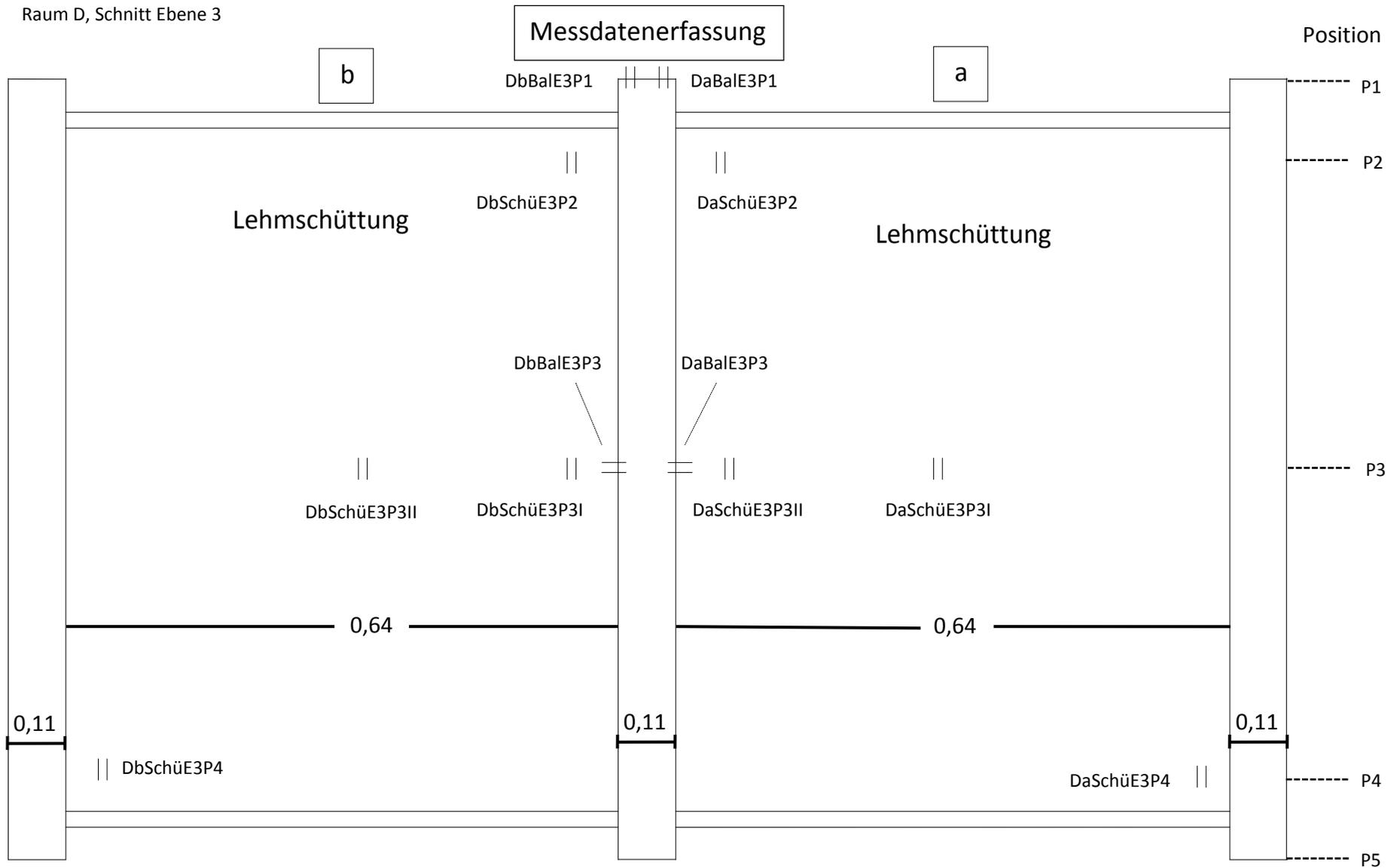


Bild 33: Beispiel: Schnitt durch die Lehmschüttung (Ebene 3) von Versuchsraum D mit der Anordnung der Widerstandssensoren.

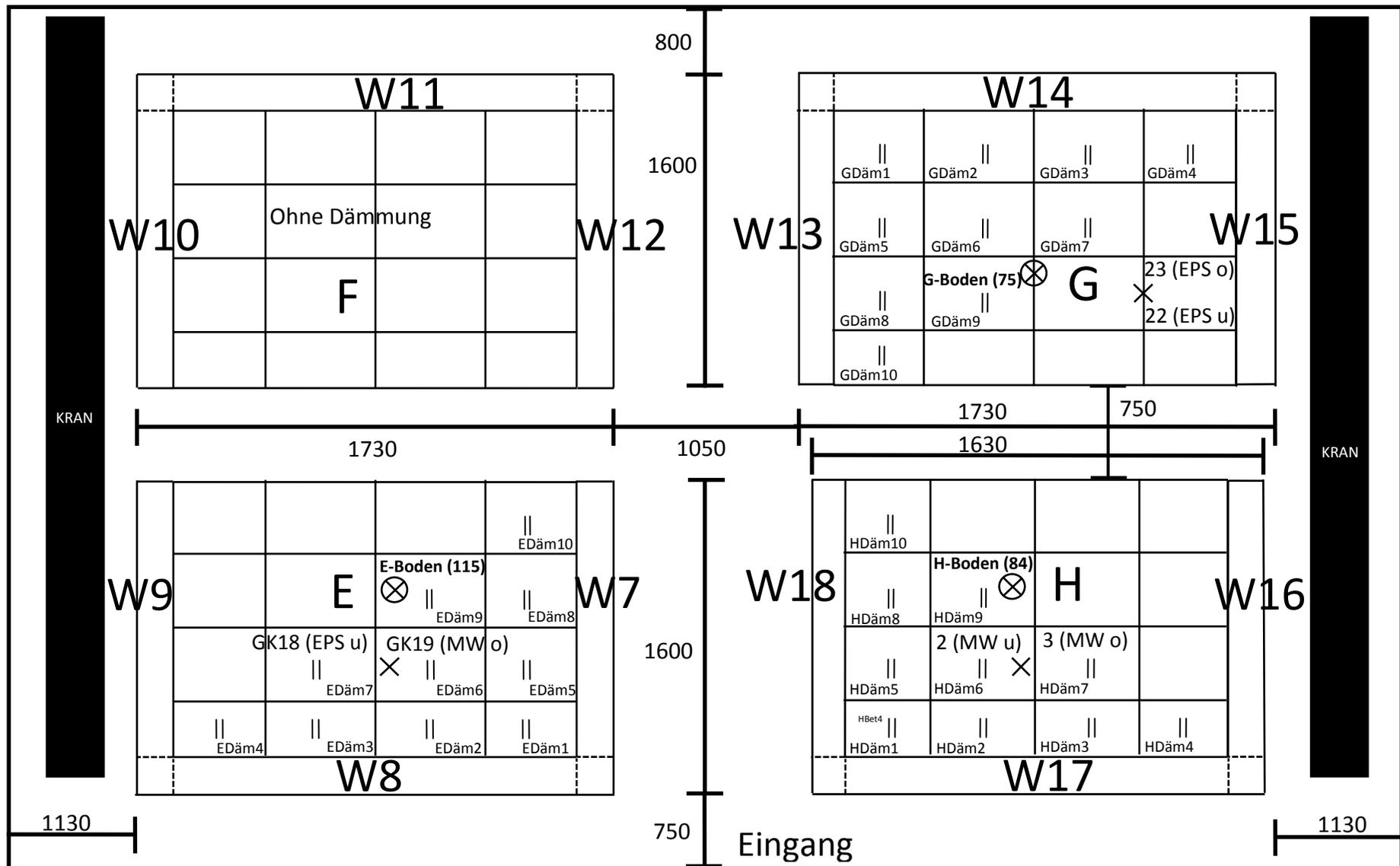
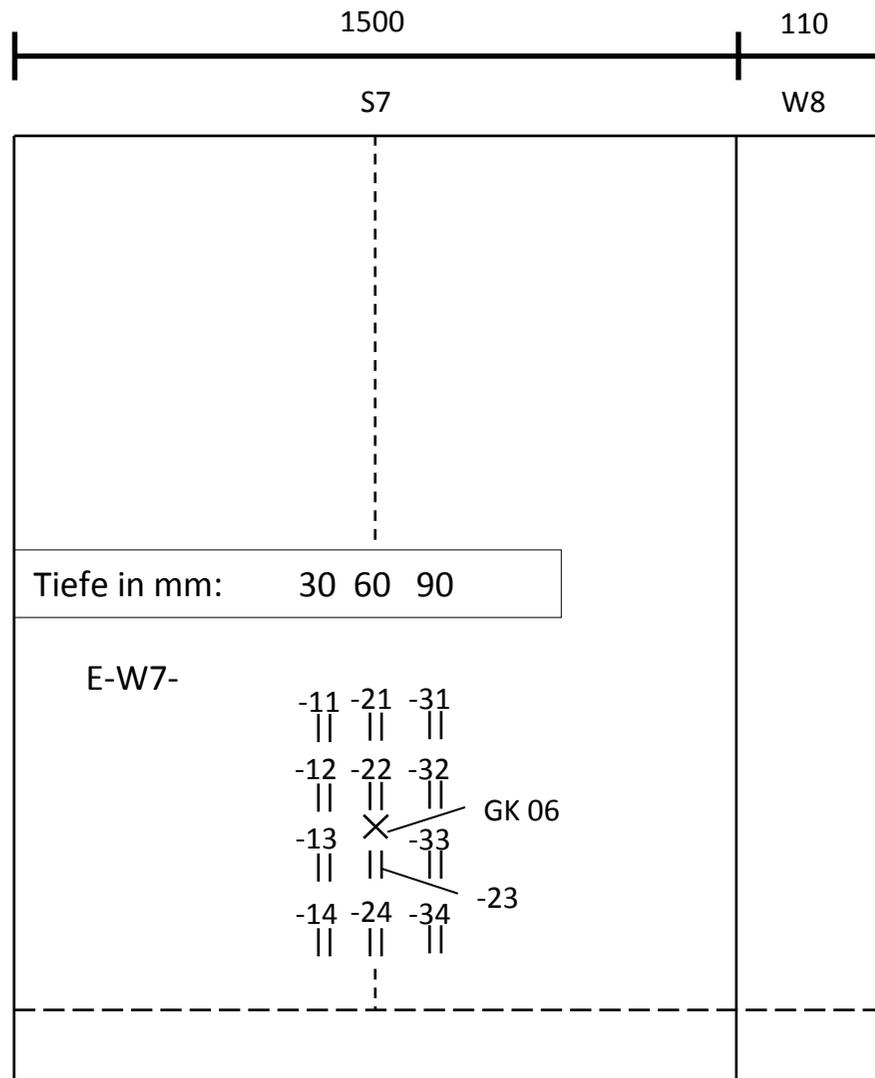


Bild 34: Ansicht der Dämmebene der Räume E, F, G und H mit den Positionen der Widerstandssensoren (Messung erfolgt jeweils an Balsaholzplättchen zwischen den beiden Dämmebenen), der Thermoelemente (auf der Oberseite der jeweiligen Dämmschicht) und der kapazitiven Sensoren.

Raum E, Wand 7, Innenansicht



Schnitt Wand 7

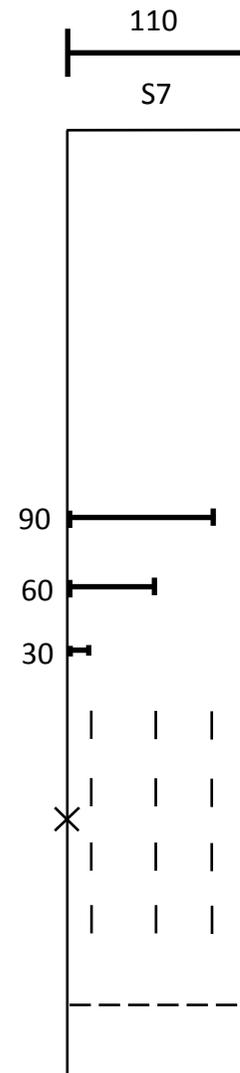


Bild 35: Beispiel: Ansicht und Schnitt durch Wand 7 in Raum E zur Lokalisierung der Sensorpositionen.



Bild 36: Simulation eines Wasserschadens an den Fußboden- und Wandaufbauten.

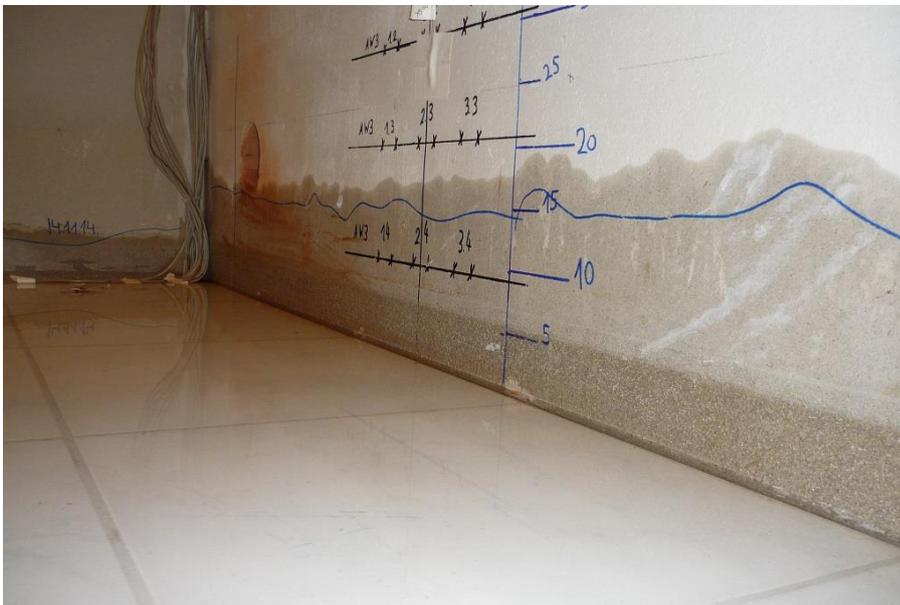


Bild 37: Durchfeuchtung von Wand 3 in Raum A nach drei Tagen Bewässerung.



Bild 38: Bewässerung der Wand 4 von oben für ca. 22 Stunden.



Bild 39: Durchfeuchtung der Wand 4 (Außenseite) bei der zusätzlichen Bewässerung von oben.



Bild 40: Innenliegende Dämmung von Wand 5 während der Bewässerung von oben.



Bild 41: Erzeugung eines Wasserschadens bei den Deckenaufbauten (Raum D, Lehmpelletfüllung).



Bild 42: Durchfeuchtung der Deckenunterseite nach ca. 5 Stunden Bewässerung (Raum D, Lehmpelletfüllung).



Bild 43: Durchfeuchtung der Wand 7 in Raum E (Innenansicht) nach drei Tagen Bewässerung.



Bild 44: Durchfeuchtung der Wand 7 in Raum E (Außenansicht) nach drei Tagen Bewässerung.



Bild 45: Wand 18 in Raum H (Innenansicht) nach drei Tagen Bewässerung.

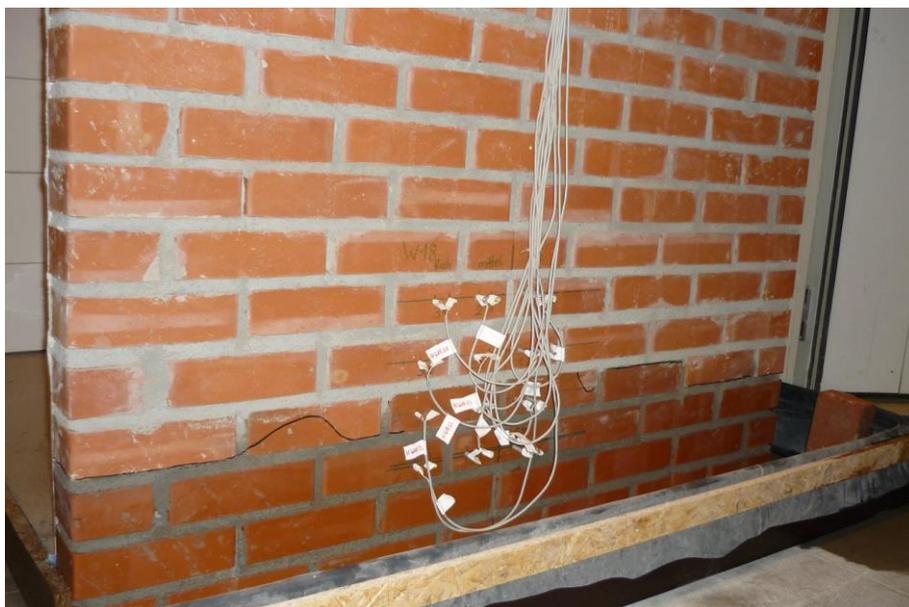


Bild 46: Durchfeuchtung der Wand 18 in Raum H (Außenansicht) nach drei Tagen Bewässerung.

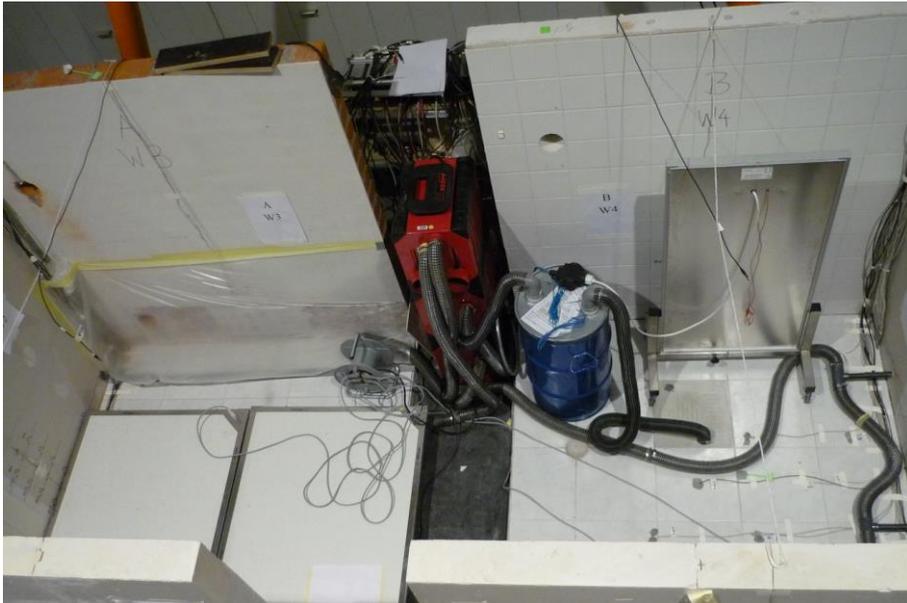


Bild 47: Mechanische Trocknung der Räume A und B.



Bild 48: Mechanische Trocknung der Deckenaufbauten (Oberseite).



Bild 49: 3. Versuchsabschnitt, Raum D: Auf der Deckenunterseite installierte IR-Strahlungspaneelle.



Bild 50: Trocknung der gefliesten Wände 16, 17, 18 und des Fußbodens in Raum H (4. Versuchsabschnitt).

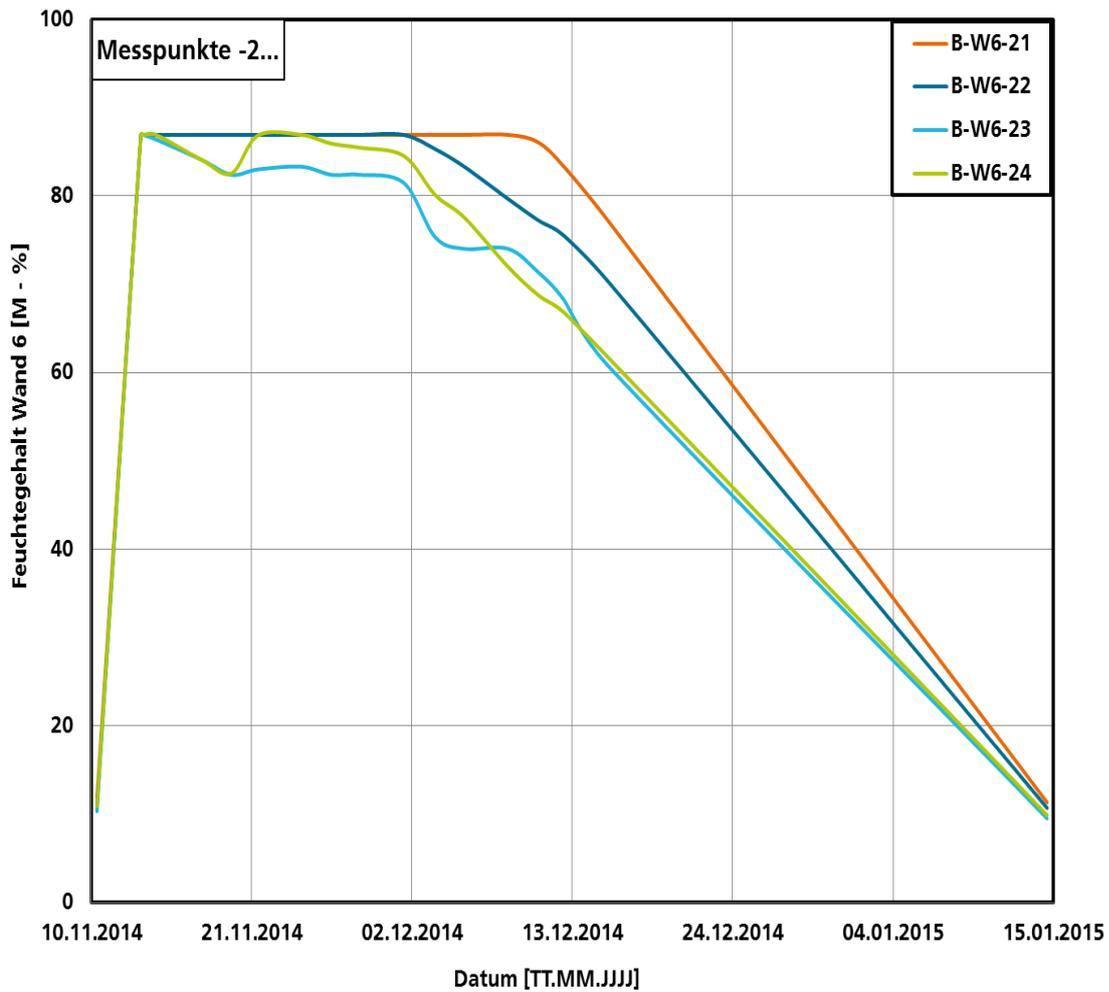


Bild 51: Beispielhafter Feuchteverlauf (kalibrierter Feuchtegehalt in M-%) von den Messpunkten 21, 22, 23 und 24 (Tiefe: 50 mm) von Wand 6 in Raum B (Gipswandbauplatten) während der natürlichen Trocknung des 1. Versuchsabschnitts. Der Messpunkt 21 befindet sich ca. 40 cm oberhalb der Fußbodenoberkante. Die anderen Messpunkte befinden sich jeweils 10 cm tiefer als der vorangegangene Messpunkt.

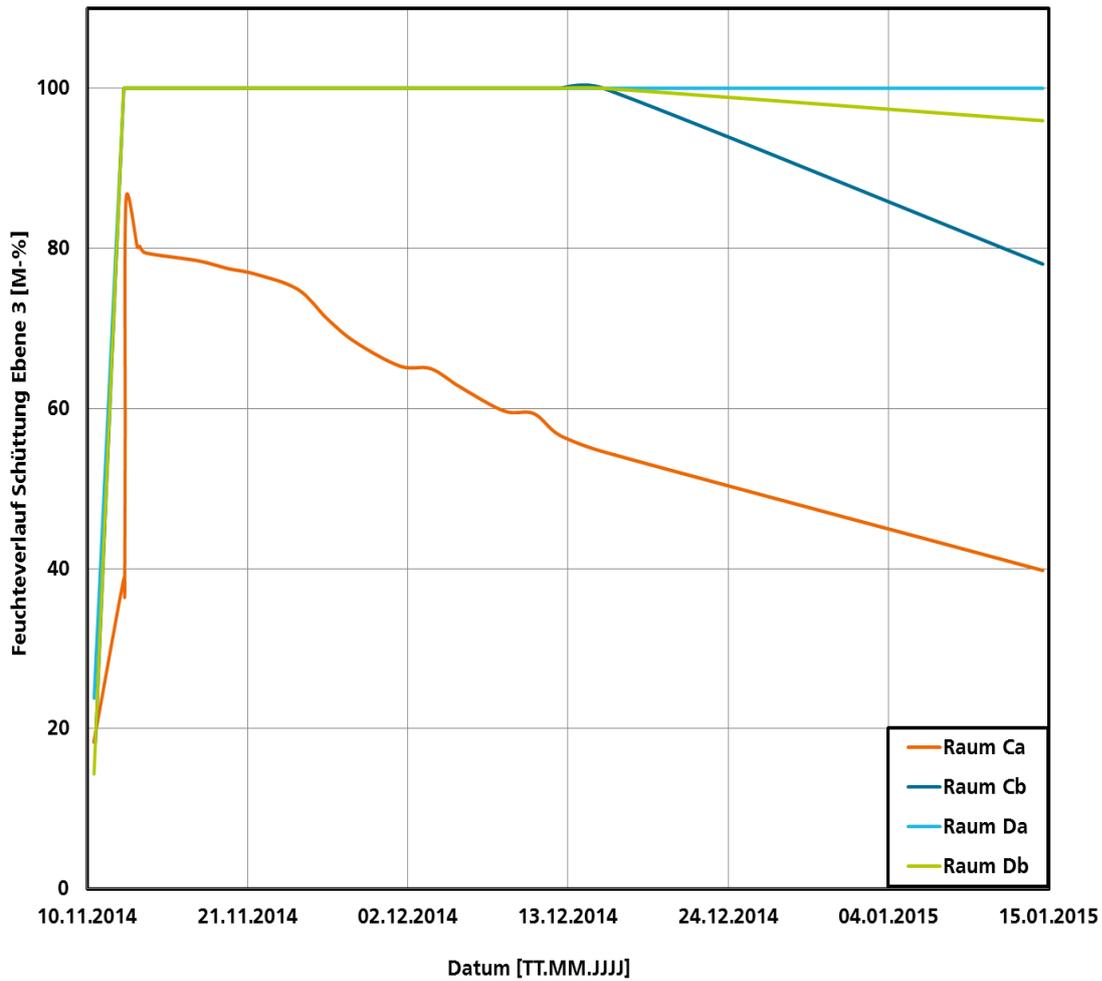


Bild 52: Verlauf der Feuchte innerhalb der Schüttung auf dem Niveau von Ebene 3 (Widerstandsmessung an Balsaholzplättchen in M-%) der Deckenaufbauten während der natürlichen Trocknung des 1. Versuchsabschnitts. Dargestellt sind die Mittelwerte der Räume Ca, Cb (Schlackefüllung), Da und Db (Lehmpelletfüllung).

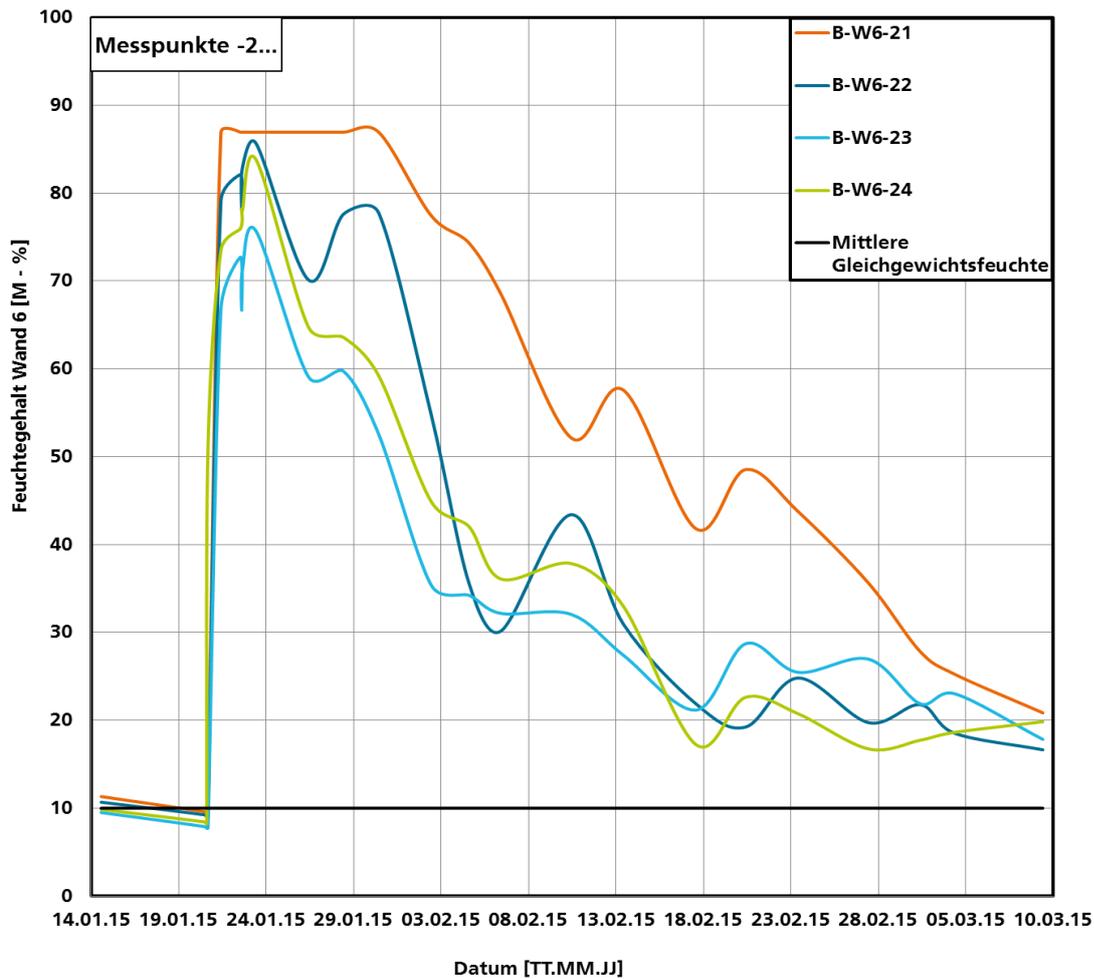


Bild 53: Feuchteverlauf (kalibrierter Feuchtegehalt in M-%) von den Messpunkten 21, 22, 23 und 24 (Tiefe: 50 mm) von Wand 6 in Raum B (Gipswandbauplatten) während der mechanischen Trocknung des 2. Versuchsabschnitts. Der Messpunkt 21 befindet sich ca. 40 cm oberhalb der Fußbodenoberkante. Die anderen Messpunkte befinden sich jeweils 10 cm tiefer als der vorangegangene Messpunkt. Die Gleichgewichtsfeuchte wurde am Ende des Versuchs ermittelt.

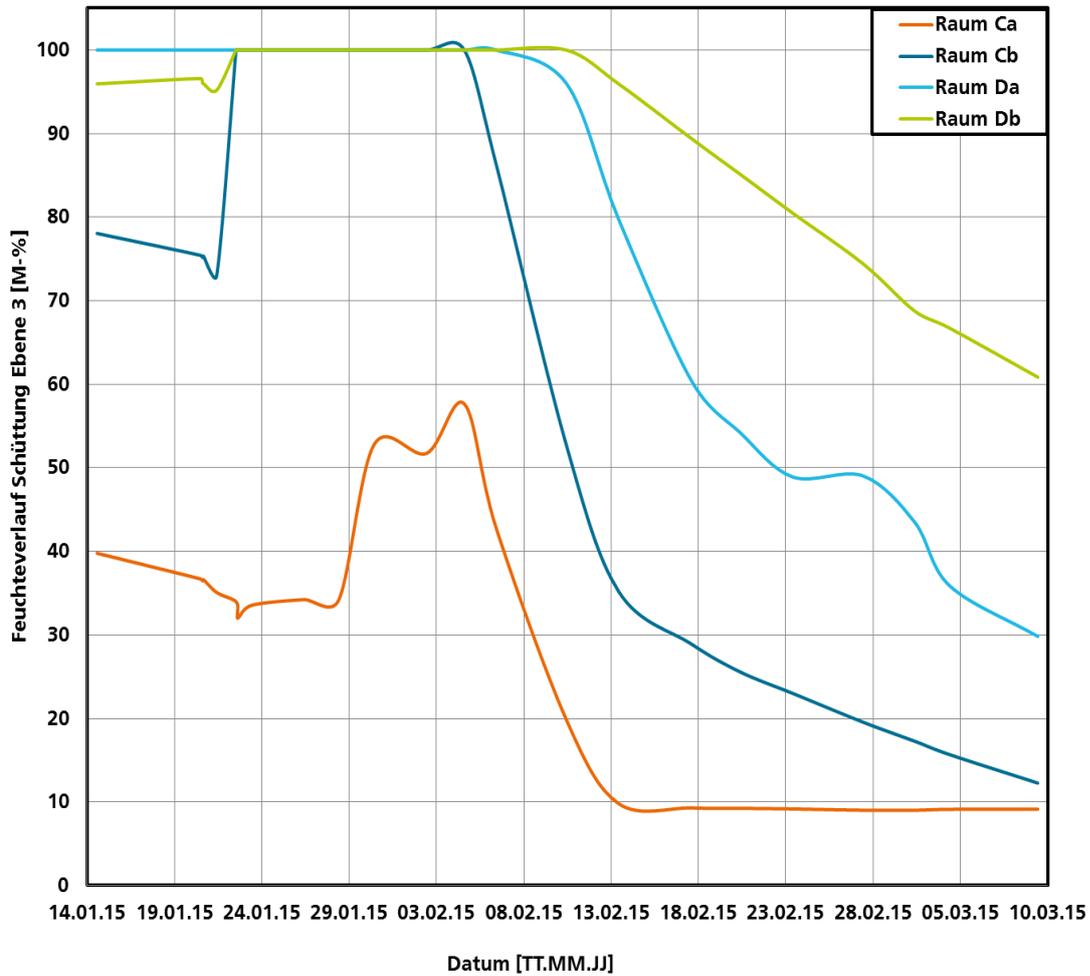


Bild 54: 2. Versuchsabschnitt, mechanische Trocknung der Deckenaufbauten C (Schlackefüllung) und D (Lehmpelletfüllung): Verlauf der Feuchte innerhalb der Schüttung auf dem Niveau von Ebene 3 (Widerstandsmessung an Balsaholzplättchen in M-%). Dargestellt sind die Mittelwerte Ca, Cb, Da und Db.

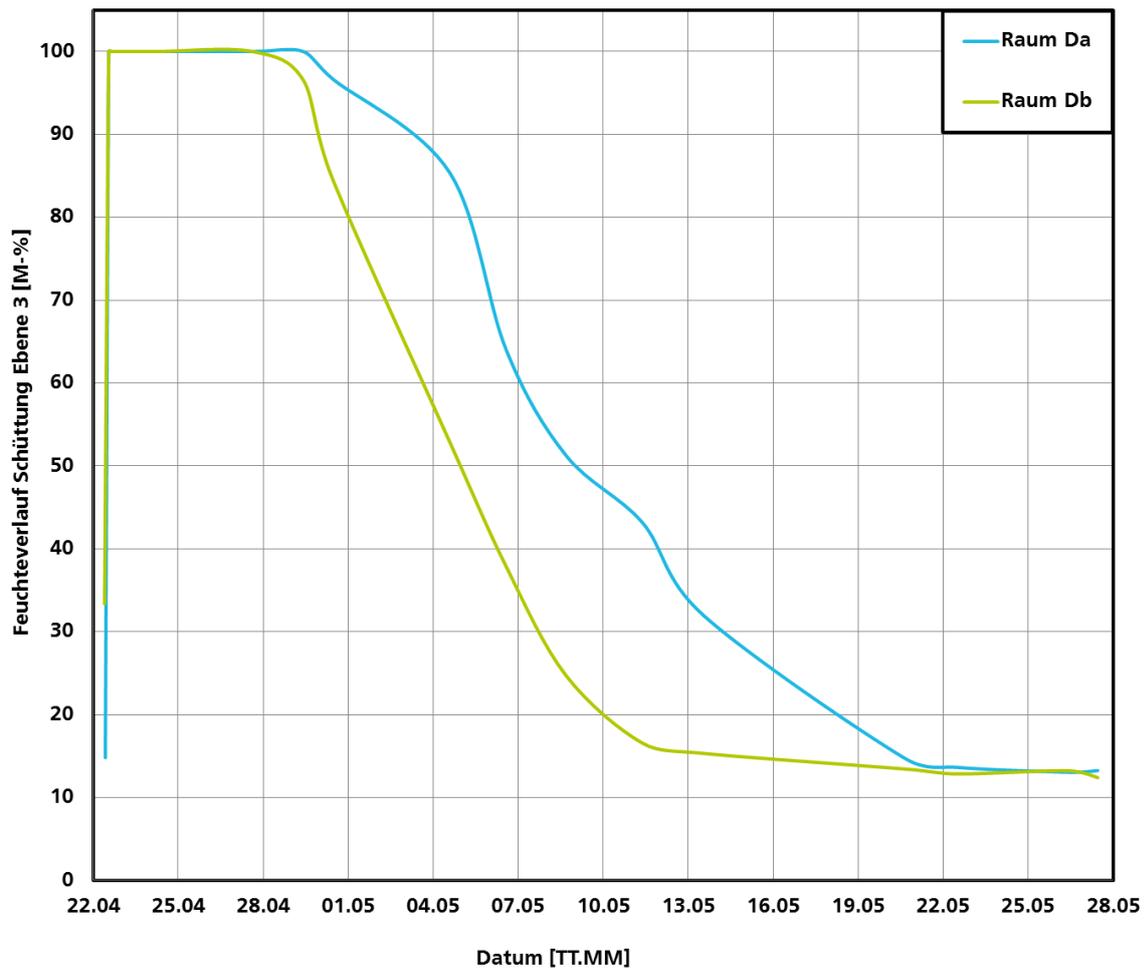


Bild 55: 3. Versuchsabschnitt, mechanische Trocknung des Deckenaufbaus D (Lehmpelletfüllung): Verlauf der Feuchte innerhalb der Schüttung auf dem Niveau von Ebene 3 (Widerstandsmessung an Balsaholzplättchen in M-%). Dargestellt sind die Mittelwerte Da und Db.

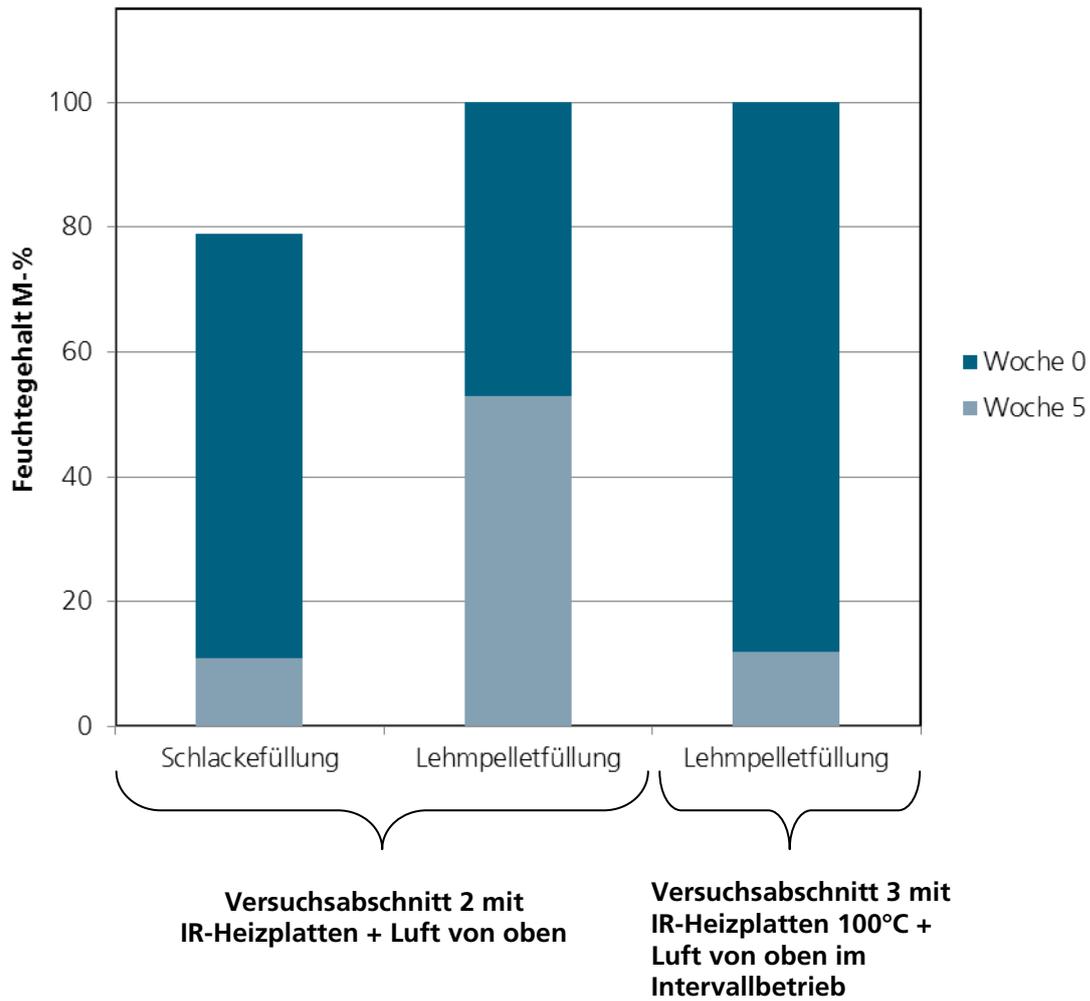


Bild 56: 2. und 3. Versuchsabschnitt, mechanische Trocknung von Holzbalkendecken mit Schlacke- und LehmPelletfüllung.

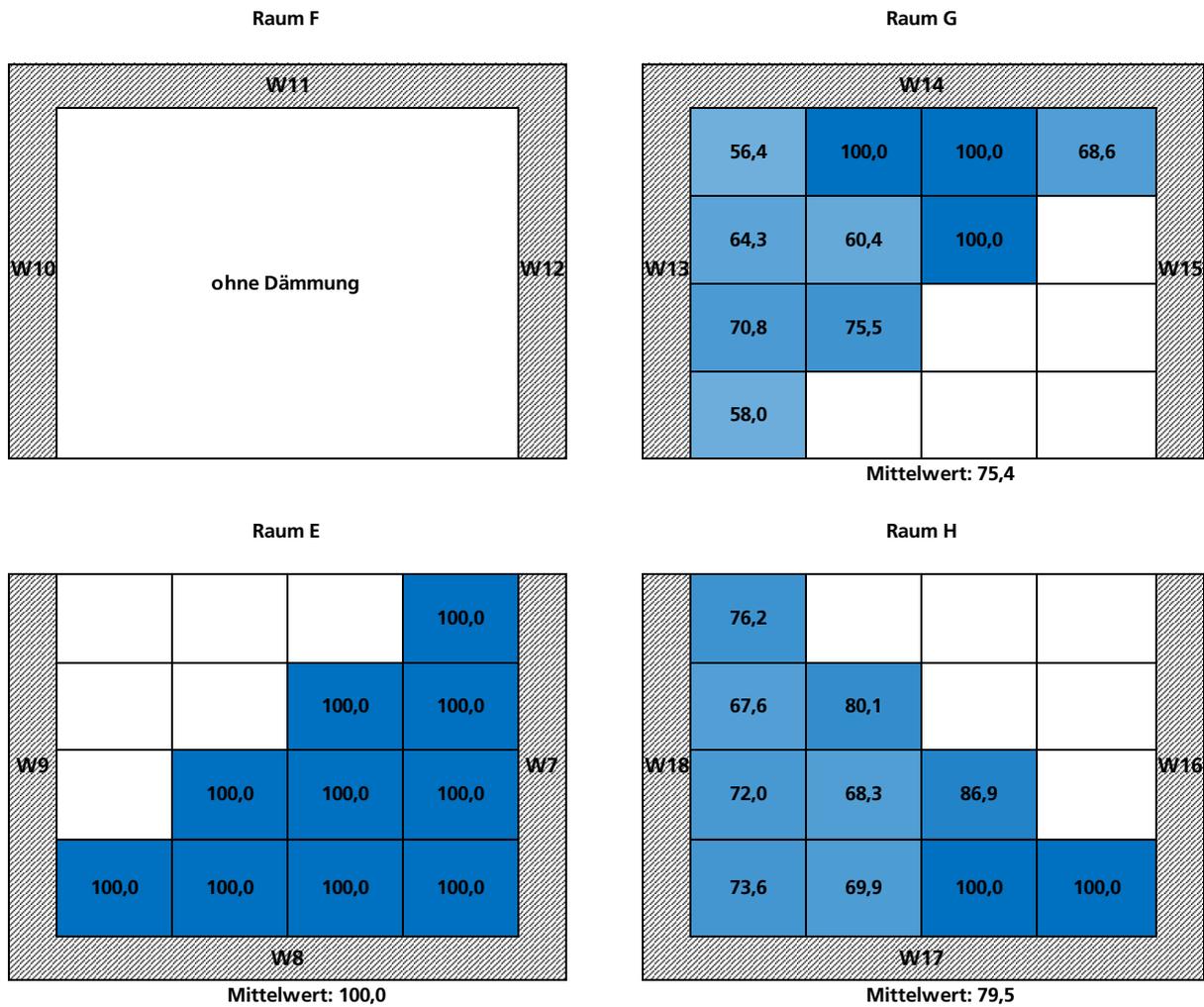


Bild 57: Feuchteverteilung zwischen den Dämmschichten im Fußboden (gemessen an Balsaholzplättchen in M-%) der Räume E, G und H am Ende der Wässerung.

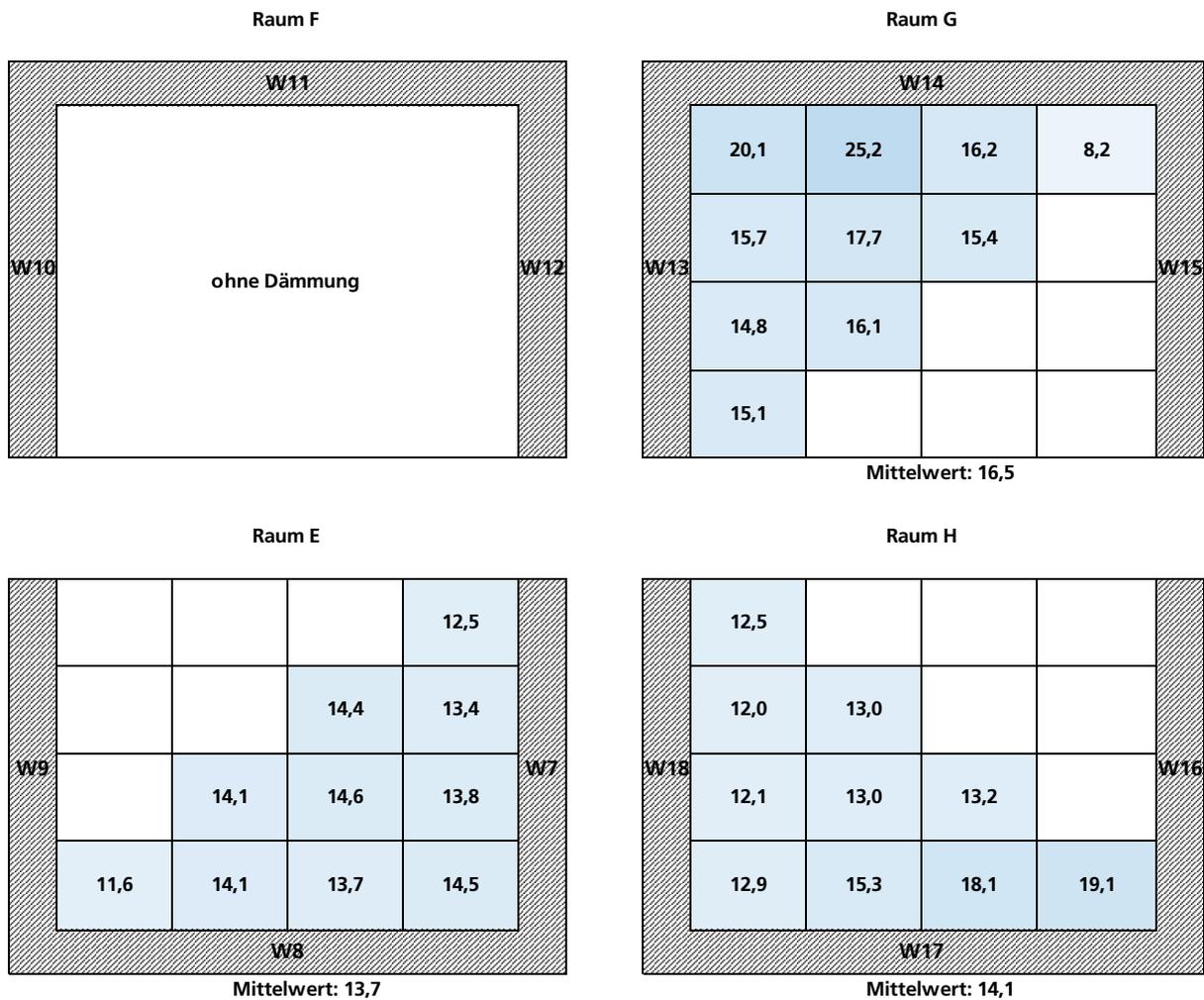


Bild 58: Feuchteverteilung zwischen den Dämmschichten im Fußboden (gemessen an Balsaholzplättchen in M-%) der Räume E, G und H nach ca. vier Wochen mechanischer Trocknung am Ende des Versuchs. Ab einem Feuchtegehalt in den Holzplättchen von unter 20 M-% wird von einer trockenen Dämmschicht ausgegangen.

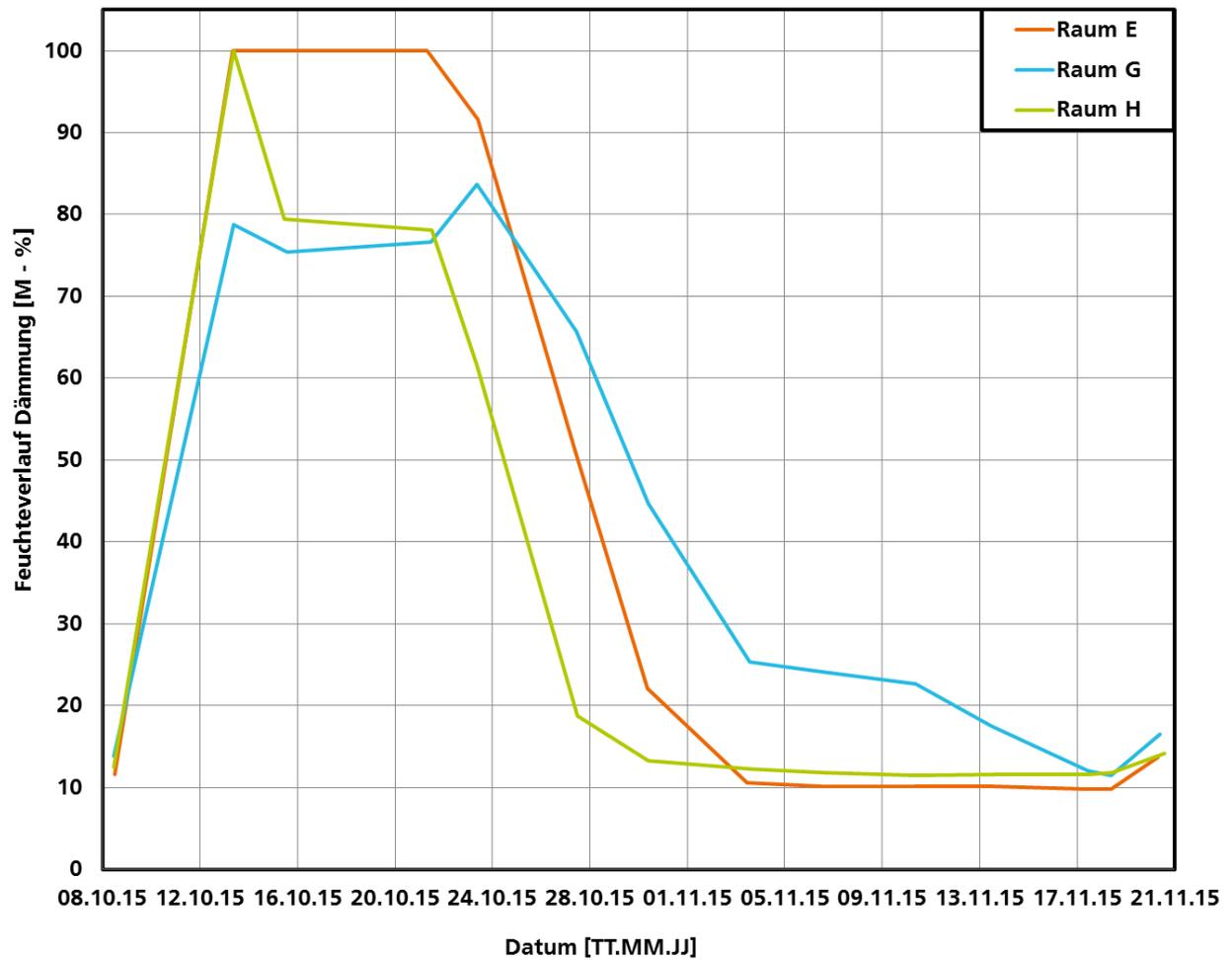


Bild 59: 4. Versuchsabschnitt, mechanische Trocknung der Räume E, F, G und H. Feuchteverlauf zwischen den Dämmschichten (gemessen an Balsaholzplättchen in M-%) der Räume E, G und H. Es sind jeweils die Mittelwerte dargestellt. Raum F hatte keine Fußbodendämmung. Werte erreichen ca. die Ausgangsfeuchtegehalte.

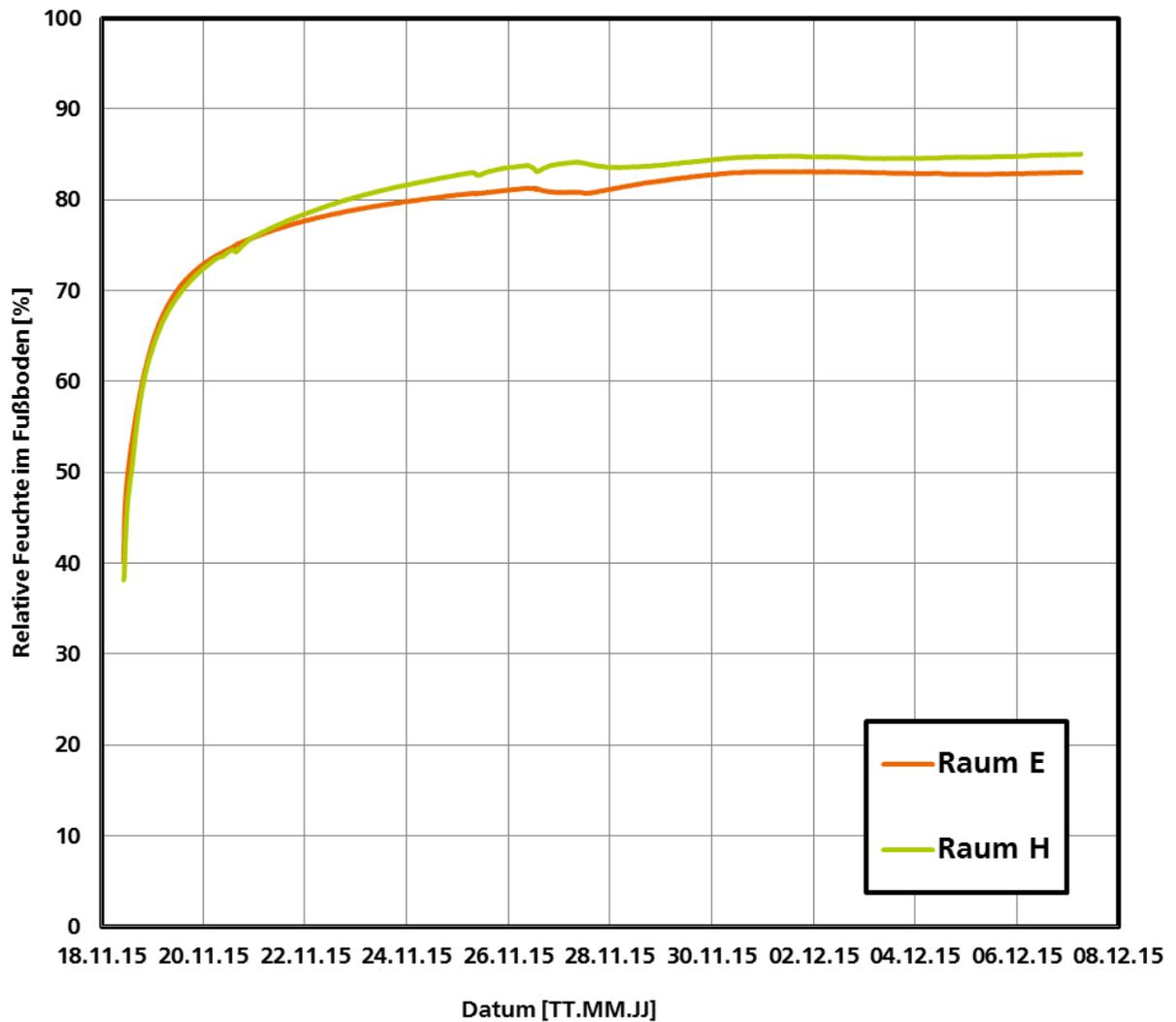


Bild 60: Verlauf der relativen Feuchte im Fußboden der Räume E und H nach dem Abschalten der Trocknungsgeräte. Die Sensoren befinden sich in den Dämmschichten der Räume E (zwischen Mineralfaserdämmplatte und EPS-Platte) und H (zwischen Mineralfaserdämmplatte und Perliteschüttung).

Raum F (Innenansicht)

Wand 10			Wand 11			Wand 12		
Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3
50 mm	90 mm	110 mm	50 mm	90 mm	110 mm	50 mm	90 mm	110 mm
M-%								
12,5	9,8	12,2	12,4	10,9	12,5	13,7	11,4	11,9
11,1	9,7	11,5	11,1	10,1	10,9	19,9	11,0	11,3
1,0	10,2	10,5	13,7	9,9	10,6	19,9	10,2	8,8
11,0	10,2	11,7	12,4	11,7	12,6	19,9	10,9	10,6

Raum G (Innenansicht)

Wand 13			Wand 14			Wand 15		
Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3
50 mm	90 mm	110 mm	50 mm	90 mm	110 mm	50 mm	90 mm	110 mm
M-%								
2,4	1,5	1,5	2,7	3,5	1,7	2,6	1,7	1,6
12,4	10,7	12,8	19,9	11,0	11,4	19,9	10,6	13,8
12,7	10,1	11,7	19,9	10,8	12,1	19,9	2,5	11,4
11,8	9,9	11,8	11,0	9,9	11,6	19,9	1,2	12,2

Raum E (Innenansicht)

Wand 7			Wand 8			Wand 9		
Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3
30 mm	60 mm	90 mm	30 mm	60 mm	90 mm	30 mm	60 mm	90 mm
M-%								
37,8	2,2	2,6	13,5	2,9	2,8	1,6	1,6	2,7
43,2	3,7	2,7	28,9	2,9	2,8	13,9	2,5	2,9
31,7	2,5	21,0	33,4	5,0	4,0	33,6	5,1	4,3
69,4	69,4	58,2	69,4	69,4	58,6	69,4	69,4	69,4

Raum H (Innenansicht)

Wand 16			Wand 17			Wand 18		
Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3
30 mm	60 mm	90 mm	30 mm	60 mm	90 mm	30 mm	60 mm	90 mm
M-%								
1,2	0,8	0,9	1,0	0,5	0,9	1,1	1,4	1,0
1,0	0,9	0,9	1,4	0,4	1,0	1,8	1,3	0,8
1,5	1,0	1,1	16,0	16,0	13,2	16,0	11,7	11,7
16,0	16,0	14,6	16,0	16,0	11,1	16,0	16,0	12,5

Bild 61: Feuchteverteilung in den Wänden der Räume E, F, G und H (kalibrierter Feuchtegehalt in M-%) am Ende der Wässerung. Jeder Raum ist separat zu betrachten.

Raum F (Innenansicht)

Wand 10			Wand 11			Wand 12		
Tiefe 1 50 mm	Tiefe 2 90 mm	Tiefe 3 110 mm	Tiefe 1 50 mm	Tiefe 2 90 mm	Tiefe 3 110 mm	Tiefe 1 50 mm	Tiefe 2 90 mm	Tiefe 3 110 mm
M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%
1,5	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,9	1,5	1,7
1,2	0,9	1,2	1,7	1,2	1,1	1,7	1,7	1,7
1,2	1,4	1,2	1,4	1,3	1,2	1,6	1,6	1,6
1,3	1,1	1,3	1,4	1,5	1,8	1,7	1,7	1,8

Raum G (Innenansicht)

Wand 13			Wand 14			Wand 15		
Tiefe 1 50 mm	Tiefe 2 90 mm	Tiefe 3 110 mm	Tiefe 1 50 mm	Tiefe 2 90 mm	Tiefe 3 110 mm	Tiefe 1 50 mm	Tiefe 2 90 mm	Tiefe 3 110 mm
M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%
1,6	1,2	1,4	1,8	1,6	1,4	1,6	1,5	1,4
1,2	1,6	1,4	1,8	1,5	1,5	1,4	1,2	1,5
1,2	1,1	1,4	1,7	1,8	1,6	1,4	1,3	1,4
1,2	1,2	1,3	1,8	1,5	1,7	1,1	1,2	1,4

Raum E (Innenansicht)

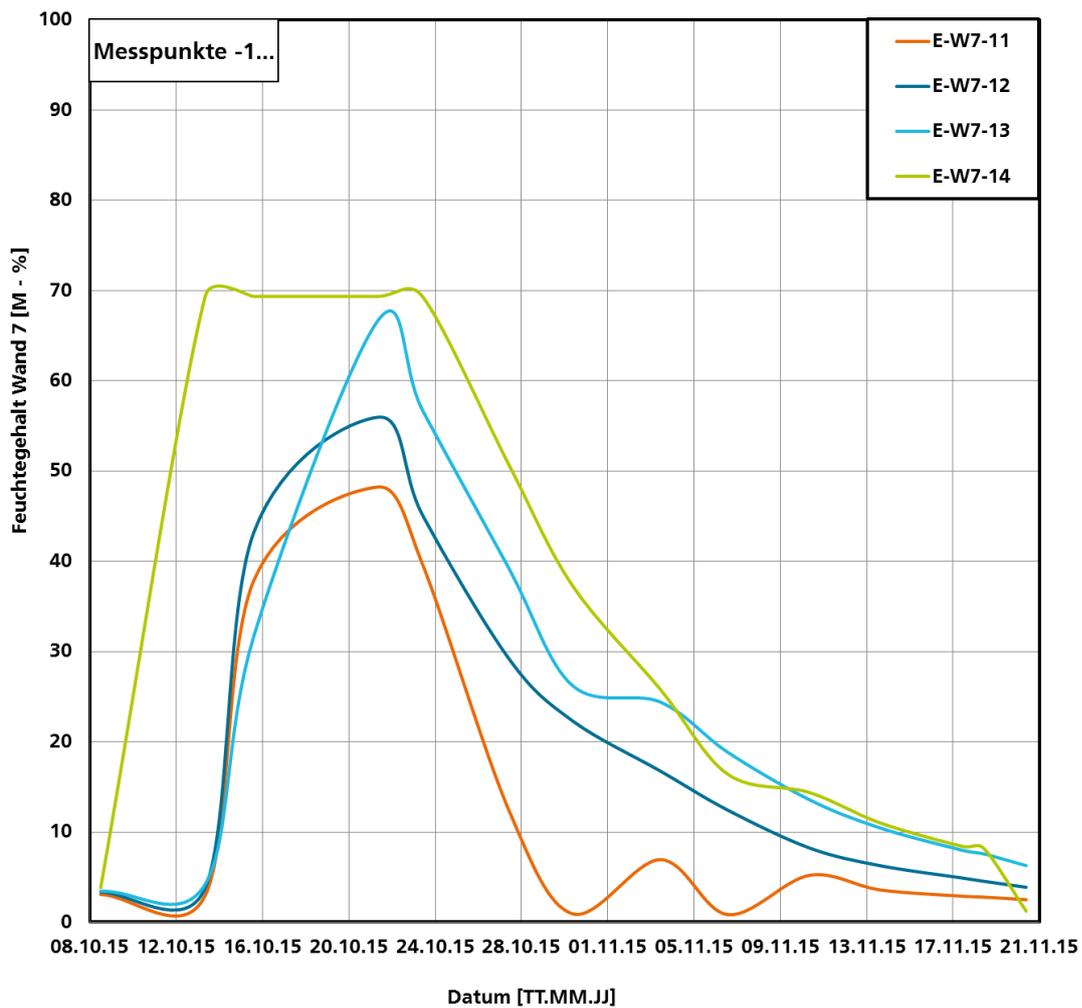
Wand 7			Wand 8			Wand 9		
Tiefe 1 30 mm	Tiefe 2 60 mm	Tiefe 3 90 mm	Tiefe 1 30 mm	Tiefe 2 60 mm	Tiefe 3 90 mm	Tiefe 1 30 mm	Tiefe 2 60 mm	Tiefe 3 90 mm
M-%								
2,5	1,6	2,4	2,2	1,2	1,9	1,8	1,2	1,5
3,9	3,1	2,7	2,4	1,4	1,9	1,9	0,9	1,6
6,3	2,2	5,1	2,8	2,4	1,8	2,0	1,5	1,7
1,2	3,5	7,9	5,9	4,8	6,5	1,3	2,9	3,7

Raum H (Innenansicht)

Wand 16			Wand 17			Wand 18		
Tiefe 1 30 mm	Tiefe 2 60 mm	Tiefe 3 90 mm	Tiefe 1 30 mm	Tiefe 2 60 mm	Tiefe 3 90 mm	Tiefe 1 30 mm	Tiefe 2 60 mm	Tiefe 3 90 mm
M-%								
0,9	0,6	0,8	0,7	0,4	0,9	1,0	1,3	1,1
0,8	0,8	0,8	1,0	0,7	0,9	2,3	1,6	1,0
1,0	0,9	1,0	1,2	0,4	2,1	13,1	0,6	4,4
2,2	1,0	2,1	0,9	5,3	3,1	0,3	11,8	4,6

Vergleichswerte trockene Wand
Wand 7 bis 9 → 4,2 M-%,
Wand 10 bis 12 → 0,3 M-%,
Wand 13 bis 15 → 0,3 M-%
Wand 16 bis 18 → 0,5 M-%

Bild 62: Feuchteverteilung in den Wänden der Räume E, F, G und H (kalibrierter Feuchtegehalt in M-%) nach ca. vier Wochen mechanischer Trocknung am Ende des Versuchs. Jeder Raum ist separat zu betrachten.



Vergleichswerte trockene Wand
Wand 7 → 4,2 M-%,
Literatur → 3,5 M-% bis 6,5 M-%

Bild 63: Beispielhafter Feuchteverlauf (kalibrierter Feuchtegehalt in M-%) gemessen an den Messpunkten 11, 12, 13 und 14 (Tiefe: 30 mm) von Wand 7 (Porenbeton) vom 08.10.2015 bis zum 20.11.2015. Der Messpunkt 11 befindet sich ca. 40 cm oberhalb der Fußbodenoberkante. Die anderen Messpunkte befinden sich jeweils 10 cm tiefer als der vorangegangene Messpunkt.

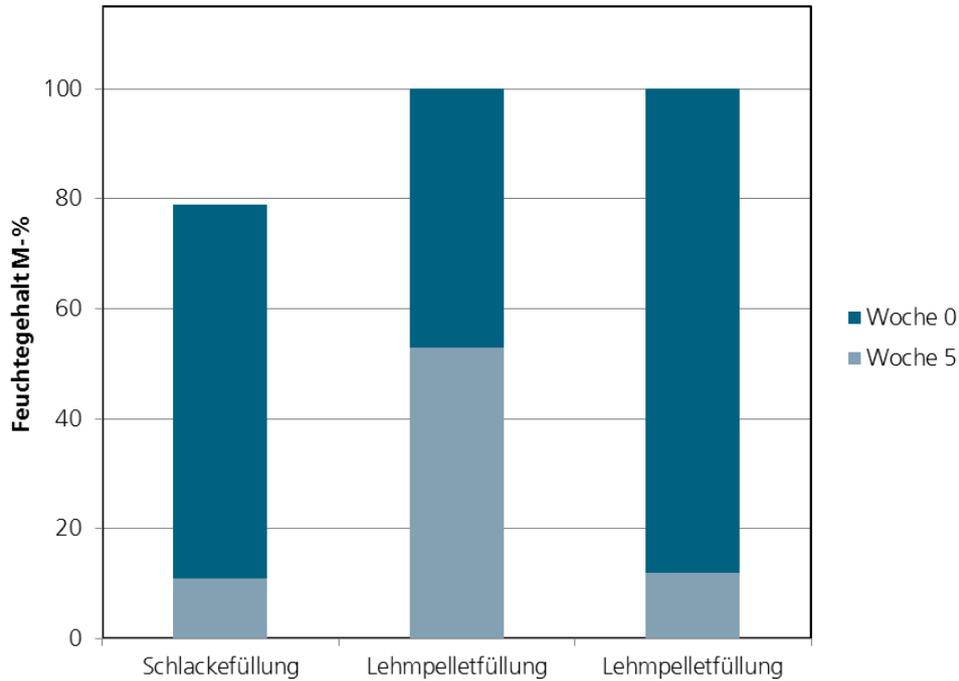


Bild 64: Ergebniszusammenstellung der Schüttungen vor und nach der mechanischen Trocknung. Ohne Intervalltrocknung (Schlacke und Lehm pelletfüllung) und mit Intervalltrocknung (Lehm pelletfüllung, rechts).

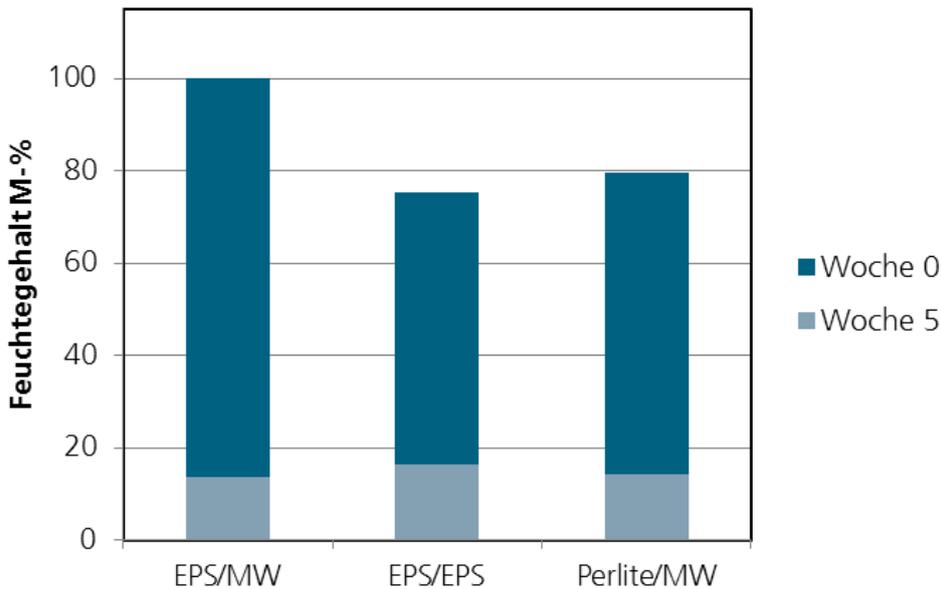


Bild 65: Ergebniszusammenstellung der Dämmstoffe in den Fußböden der Räume E, G und H vor und nach der mechanischen Trocknung.

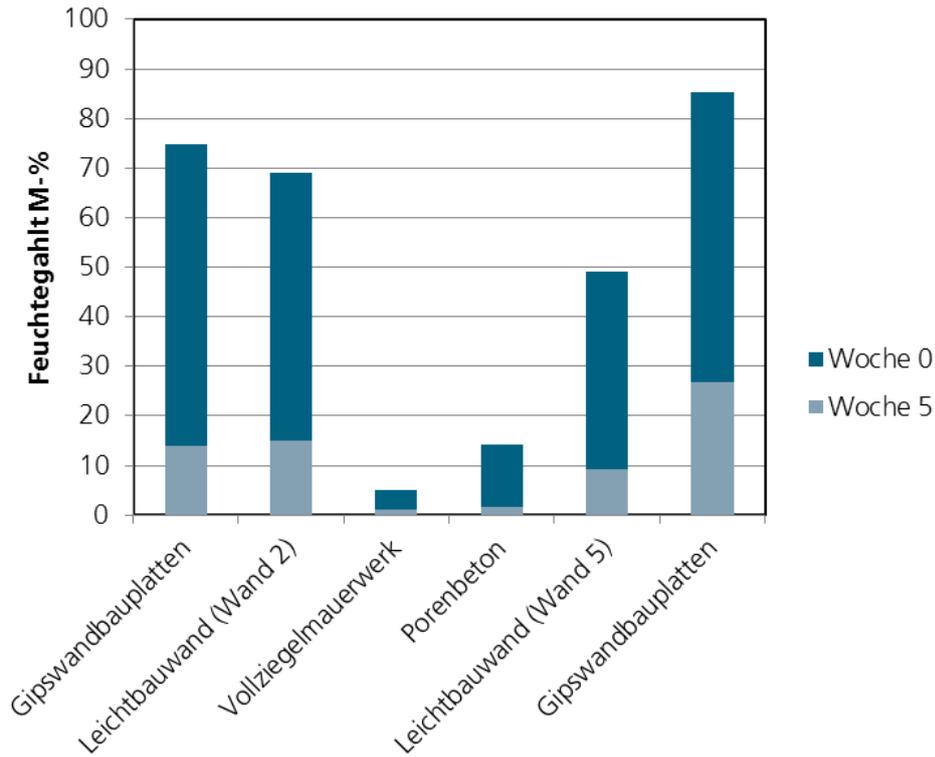


Bild 66: Ergebniszusammenstellung der Wände der Aufbauten A und B vor und nach der mechanischen Trocknung.

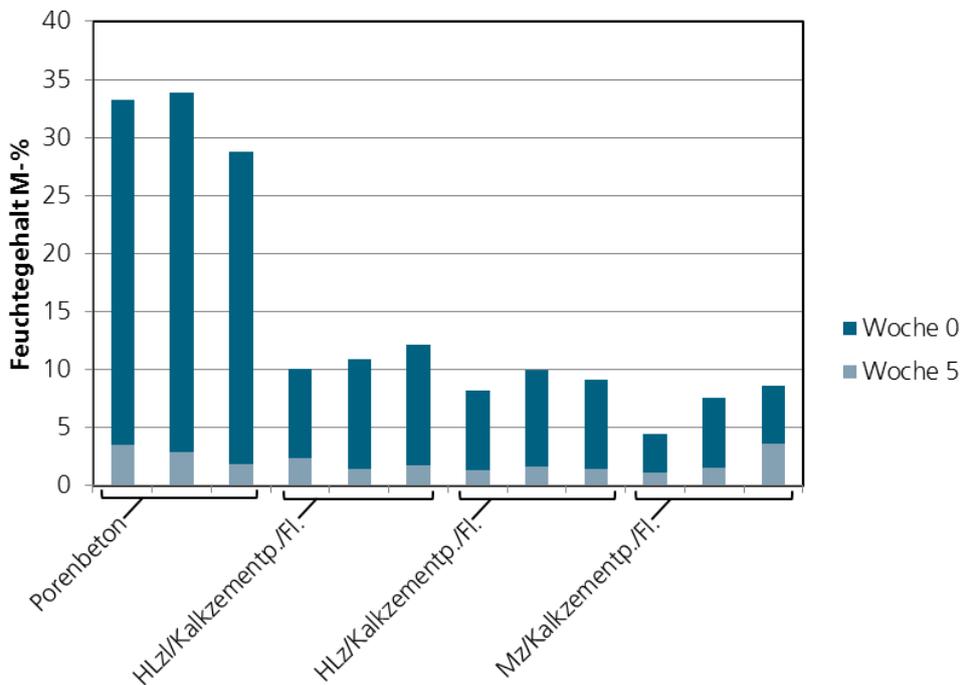


Bild 67: Ergebniszusammenstellung der Wände der Aufbauten E, F, G und H vor und nach der mechanischen Trocknung.

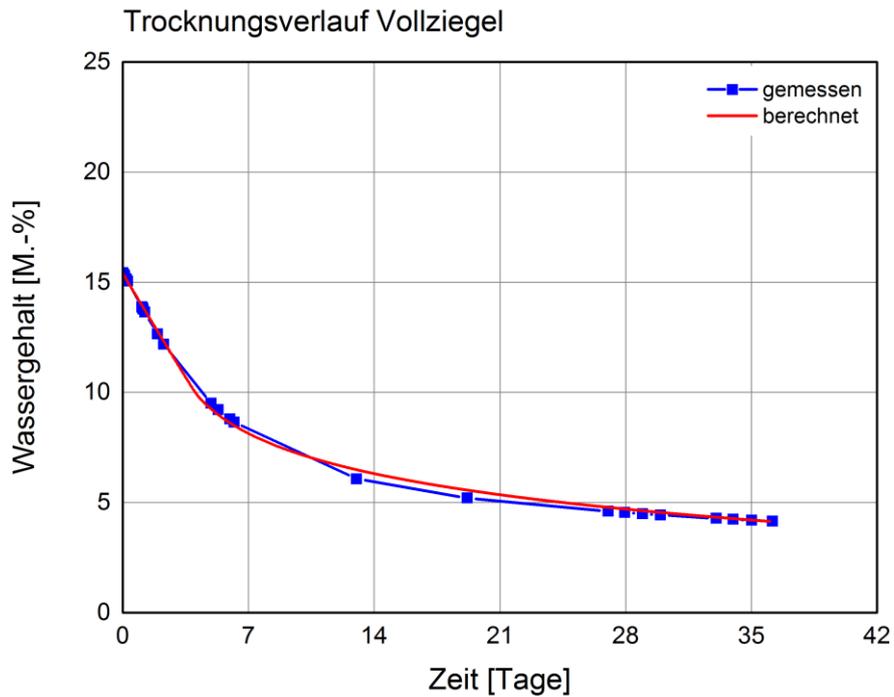


Bild 68: Vergleich des gemessenen mit dem berechneten Trocknungsverlauf des Vollziegels. Die Trocknung des Vollziegels erfolgte einseitig in einem Klimaraum bei konstanten Randbedingungen (23 °C / 50 % r.F.). Der zeitliche Feuchteverlauf wurde durch regelmäßige Wägung ermittelt.

Vollziegelmauerwerk mit Gipsputz

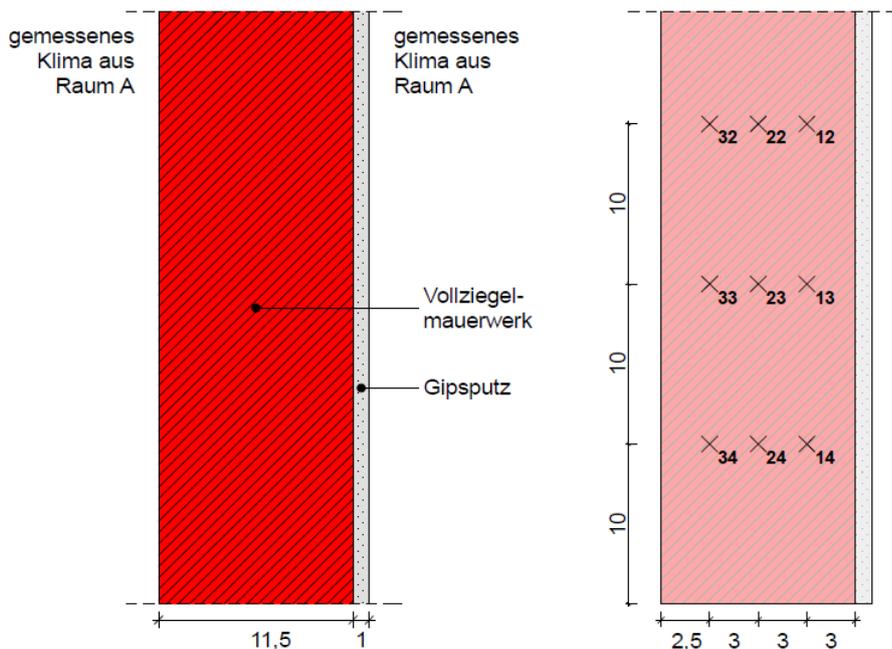


Bild 69: Wand 3 von Raum A (Vollziegelmauerwerk mit Gipsputz): Bauteilaufbau und Position der Messfühler als Grundlage der Nachberechnungen mit WUFI®.

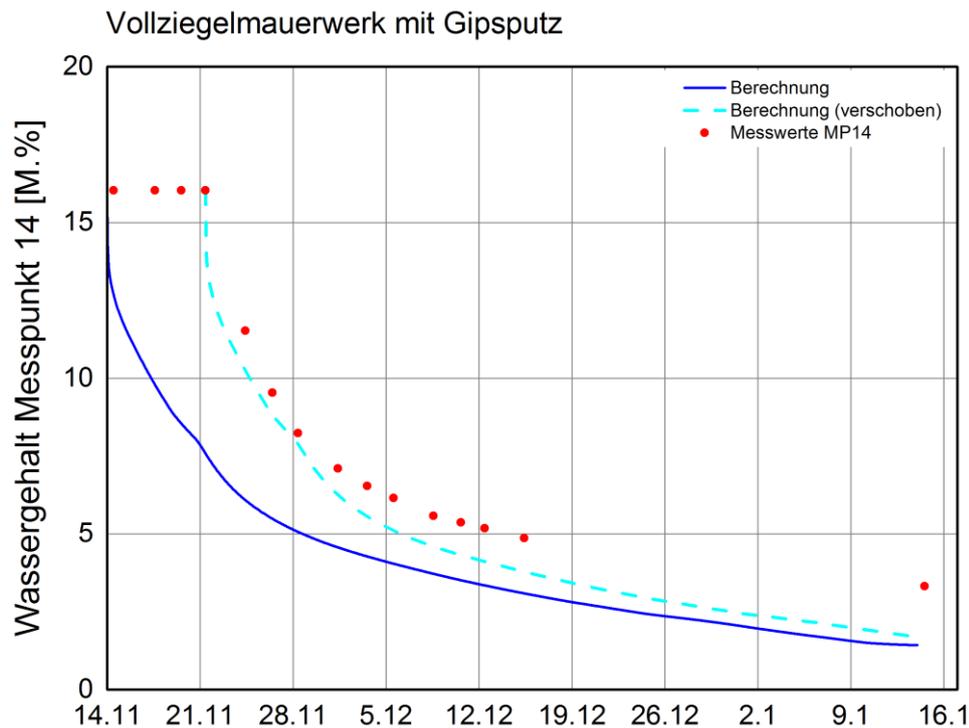


Bild 70: Verlauf des berechneten Wassergehalts am Messpunkt 14 von Wand 3 (Vollziegelmauerwerk mit Gipsputz) in Raum A im Vergleich zu den gemessenen Wassergehalten über den Messzeitraum während der natürlichen Trocknung.

Holzbalkendecke mit Lehmschüttung

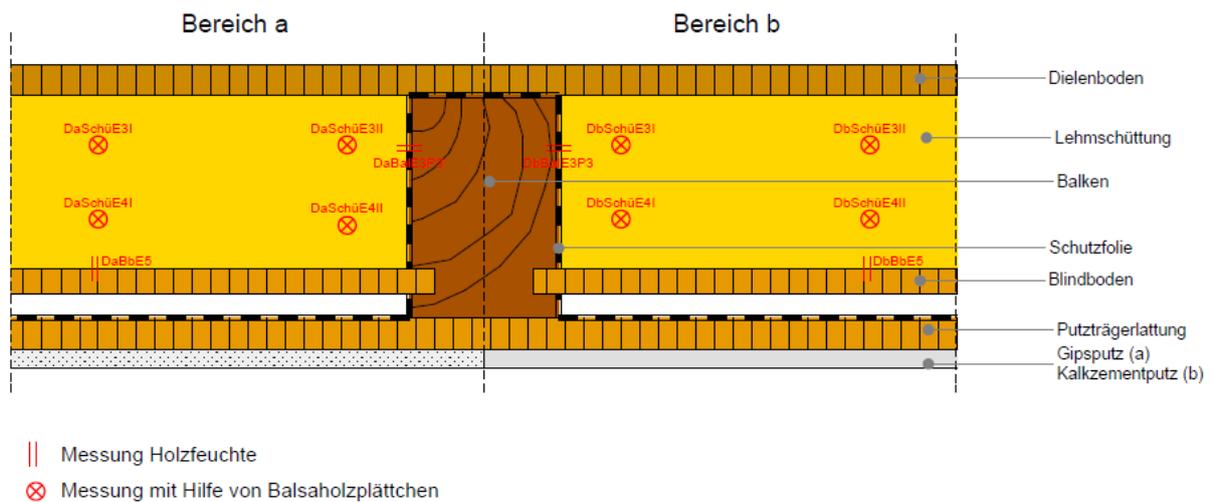


Bild 71: Holzbalkendecke mit Lehmschüttung (Raum D): Bauteilaufbau und Position der Messfühler als Grundlage der Nachberechnungen mit WUFI®.

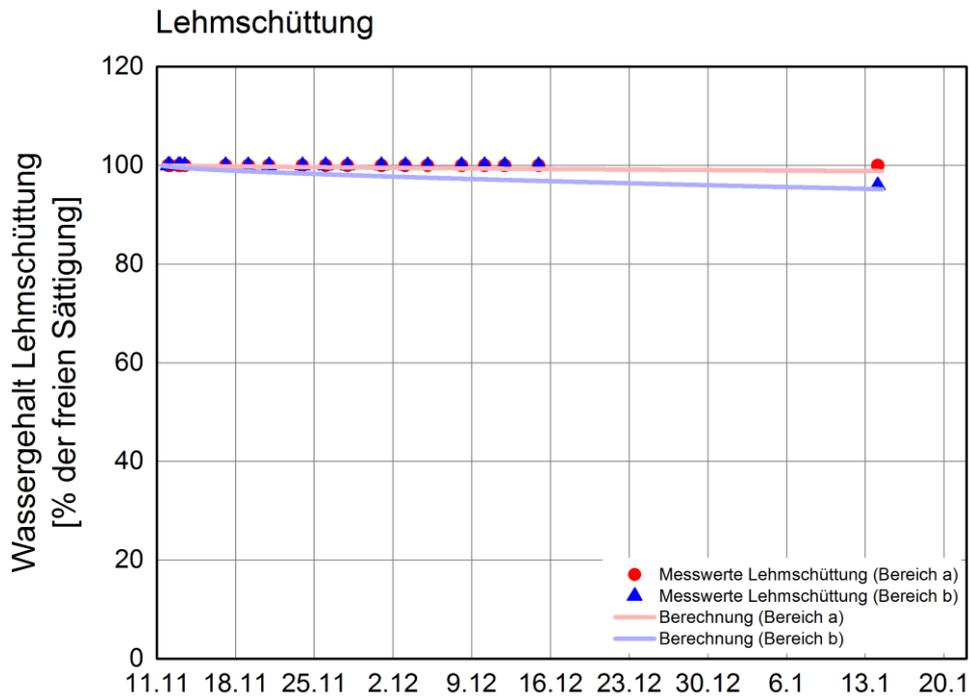


Bild 72: Verlauf des berechneten Wassergehalts in der Lehmschüttung der Holzbalkendecke von Raum D (Bereich a und b) im Vergleich zu den gemessenen Wassergehalten in % der freien Wassersättigung über den Messzeitraum während der natürlichen Trocknung.

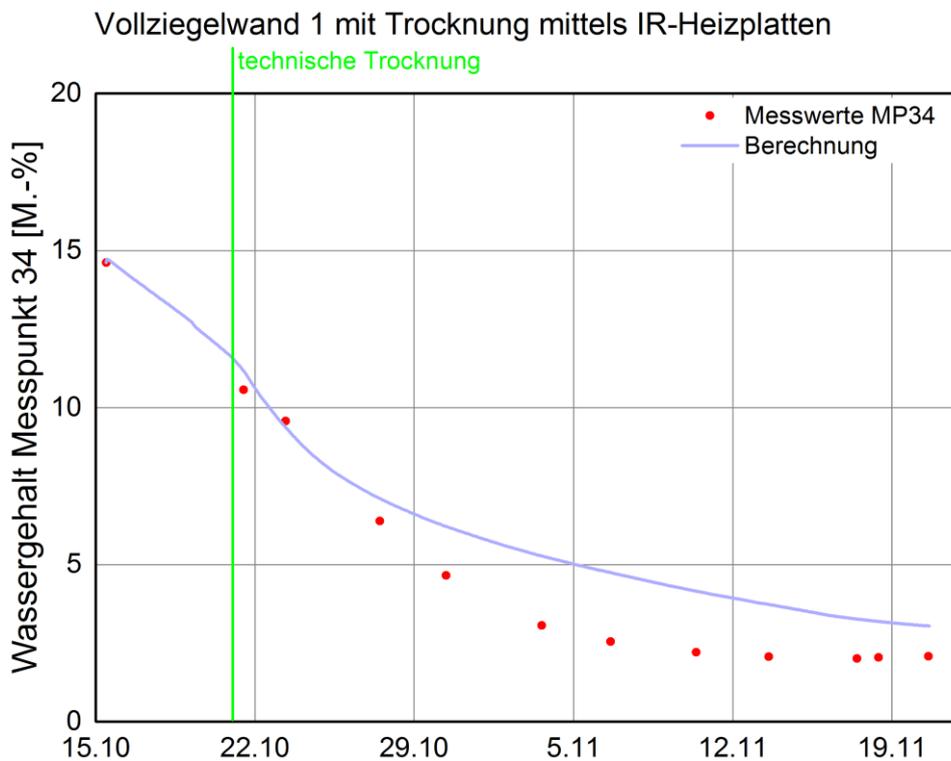


Bild 73: Verlauf des berechneten Wassergehalts am Messpunkt 34 der Vollziegelwand 1 (Wand 16) mit Kalkzementputz und Fliesen an der Innenseite im Vergleich zu den gemessenen Wassergehalten über den Messzeitraum während der mechanischen Trocknung mittels IR-Heizplatten.

Vollziegelwand 2 mit Trocknung mittels IR-Heizplatten

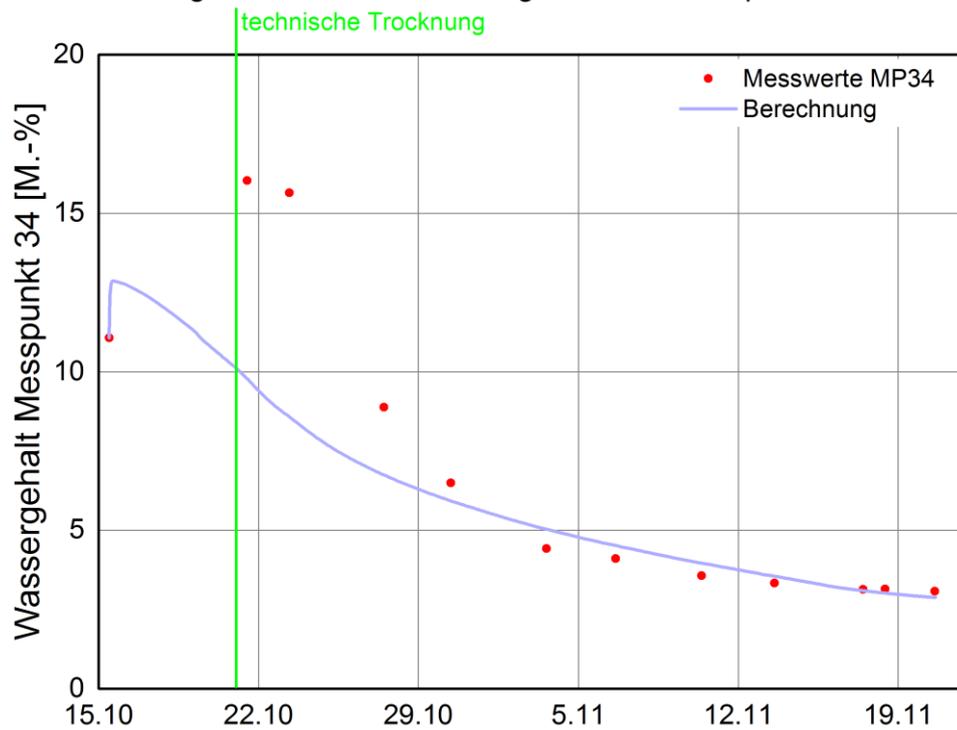


Bild 74: Verlauf des berechneten Wassergehalts am Messpunkt 34 der Vollziegelwand 2 (Wand 17) mit Kalkzementputz und Fliesen an der Innenseite im Vergleich zu den gemessenen Wassergehalten über den Messzeitraum während der mechanischen Trocknung mittels IR-Heizplatten.