

Wärmedämmung mit Schaumglasschüttungen (WäSch)

T 3321

T 3321

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9537-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

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. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-035/2014

Wärmedämmung mit Schaumglasschüttungen (WäSch) – Abschlussbericht

Az.: ZP 52-5- 5.100-1348/10

Durchgeführt im Auftrag
Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin

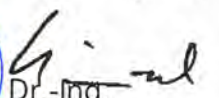
Der Bericht umfasst
110 Seiten
72 Abbildungen
1 Anlage

Theo Großkinsky
Nis Andresen
Doris Rösler
Andreas Zegowitz
Martin Krus

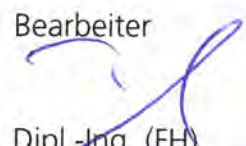
Stuttgart, 20. April 2015



Abteilungsleiter


Dr.-Ing.
Hartwig Künzel

Bearbeiter


Dipl.-Ing. (FH)
Andreas Zegowitz

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Durchgeführte Untersuchungen	4
2.1	Literaturrecherche und Anwendbarkeit des Prüfschemas für Perimeterdämmungen auf Schaumglasschotter	5
2.2	Freilandversuche und Messtechnik	7
2.2.1	Versuchsaufbau Kellerwände	7
2.2.2	Aufbau der Bodenplatte und des Versuchsgebäudes	17
2.3	Ergebnisse der Freilandversuche und der instationären hygrothermischen Berechnungen	21
2.3.1	Ergebnisse der Untersuchungen an den Kellerwänden im Freiland	21
2.3.1.1	Außen- und Raumklima im Kellerraum	21
2.3.1.2	Ergebnisse der Untersuchungen an den Kellerwänden im Freiland, Material A	23
2.3.1.3	Ergebnisse der Untersuchungen an den Kellerwänden im Freiland, Material B	27
2.3.2	Ergebnisse der Untersuchungen an der Bodenplatte im Freiland	30
2.3.2.1	Außen- und Raumklima im Versuchshaus	30
2.3.2.2	Ergebnisse der Untersuchungen an der Bodenplatte im Freiland, Material B	32
2.3.2.3	Ergebnisse der Untersuchungen an der Bodenplatte im Freiland, Material C	36
2.3.3	Instationäre hygrothermische Berechnungen zu der Perimeterdämmung der Kellerwand der Versuchshalle	40
2.3.3.1	Durchführung der Berechnungen	40
2.3.3.2	Ergebnisse der instationären Berechnungen	45
2.3.3.3	Diskussion und Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse	52
2.3.4	Instationäre hygrothermische Berechnungen zu der Wärmedämmung der Bodenplatte des Versuchshauses	54
2.3.4.1	Durchführung der Berechnungen	54
2.3.4.2	Ergebnisse der instationären Berechnungen	58
2.3.4.3	Diskussion und Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse	65
2.4	Anschaffung von Geräten und Ausrüstungen	66
2.5	Laborversuche	66
2.5.1	Versuche an den Schaumglasschotterproben im Lieferzustand	66
2.5.2	Kennwerte nach Belastungen im Labor	67
2.5.3	Kennwerte nach Entnahmen im Freiland	69

3	Vergleich der Wärmedurchlasswiderstände ermittelt an Bodenplattendämmungen des Versuchshauses und aus Labormesswerten mit den Bemessungswerten der Zulassungen	74
4	Gleichwertigkeitsnachweise	76
4.1	Untersuchungssystematik	76
4.2	Geprüfte Varianten	76
4.3	Modellannahmen und Berechnungsmethode	80
4.4	Ergebnisse und Bewertung	81
5	Zusammenfassung	83
6	Literatur	87
7	Anhang	88
7.1	Tabellen zu Kapitel 2.5.1 Versuche an den Schaumglasschotterproben im Lieferzustand	88
7.2	Tabellen zu Kapitel 2.5.2 Kennwerte nach Belastungen im Labor	91
7.3	Tabellen zu Kapitel 2.5.3 Kennwerte nach Entnahmen im Freiland	99
8	Anlage	110
8.1	Anlage 1, Zwischenabrechnung	110

1 Einleitung

Schotter oder Schotter aus Schaumglas wird als Wärmedämmung unter lastabtragenden Bodenplatten und als Frostschwelle (Frostschutz, Frostschürze, Frostschirm) eingesetzt und ist bauaufsichtlich zugelassen. Von mehreren Schaumglasherstellern gibt es außerdem Systeme für eine außenliegende Wärmedämmung von wohnähnlich genutzten Kellern (Perimeterdämmung). Die Anwendungen des Dämmstoffs im Randbereich der Bodenplatte als Frostschwelle wie auch als Perimeterdämmung haben zur Folge, dass der Dämmstoff Oberflächenwasser und Frost-Tau-Wechseln in hohem Maße ausgesetzt sein kann. Daten über die bei diesen Anwendungen von der Jahreszeit abhängig auftretenden Feuchtegehalte des Dämmstoffs existieren nur in geringem Maße. Zur Absicherung existierender und gegebenenfalls neuer oder ergänzter Regelungen soll die Leistungsfähigkeit des Dämmstoffs, das heißt insbesondere dessen Dämmwirkung bei erhöhtem Feuchtegehalt und dessen Dauerhaftigkeit im Freiland, unterstützt durch Labor- und rechnerische Untersuchungen, ermittelt werden. Als Ergebnis sollen Feuchtezuschläge für die Wärmeleitfähigkeit, Vorschläge und eventuell erforderliche Prüfungen zur Ergänzung der nationalen oder europäischen Zulassungen und Gleichwertigkeitsnachweise analog zu den Beispielen in DIN 4108 Beiblatt 2 für Dämmungen im Kellerbereich und nicht unterkellerten Bauwerke erarbeitet werden.

2 Durchgeführte Untersuchungen

Hierfür wurden an zwei Versuchshäusern Untersuchungen mit verschiedenen Dämmschüttungen messtechnisch erfasst und die Ergebnisse mit den Ergebnissen aus Labormessungen und Berechnungen verglichen. Es wurden zur äußeren Wärmedämmung eines „bewohnten“ Kellers eines existierenden Versuchshauses im Freilandversuchsgelände Holzkirchen zwei Dämmstoffvarianten A und B eingebaut und über eine Dauer von zwei Jahren die Kenndaten ermittelt. In einem separaten, neu aufgebauten Versuchshaus wurde die Bodenplatte mit den Dämmstoffen B und C ausgeführt. Berücksichtigt wurde hierbei, dass sowohl die Perimeterdämmung des Kellers wie auch der Bodenplatte jeweils mit einer Schaumglasschottervariante, die im Trockenschäumverfahren, und einer Variante, die im Nassschäumverfahren hergestellt war, ausgeführt wurden. Die Untersuchungen an den Bodenplattenmessungen wurden nach einer Laufzeit von 2 Jahren um ein weiteres Jahr verlängert, so dass die Versuchsdauer hier vom Herbst 2010 bis Frühjahr 2014 betrug und somit die Dämmstoffe bei dieser Variante 4 Winterperioden eingebaut waren. Die Untersuchungen im Freiland wurden durch Labormessungen in Anlehnung oder nach existierenden Prüfnormen begleitet: Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit der Glasschaum-Schüttdämmstoffe im trockenen und feuchten Zustand an Proben aus dem Freilandversuch und nach Frost-Tau-Wechselbelastung, Wasseraufnahme nach Unterwasserlagerung und durch Diffusion. Die Messungen im Freiland wurden mit mehrdimensionalen Berechnungen durch die Programme STATWL, WUFI® Pro und anderen verglichen.

2.1 Literaturrecherche und Anwendbarkeit des Prüfschemas für Perimeterdämmungen auf Schaumglasschotter

In einer Recherche sollten die auf dem Markt existierenden Schüttdämmstoffe aus Schaumglas, deren Zulassungen, Anwendungen und typischen Systeme (Schüttdämmung unter Bodenplatten, als Frostschutz und als Perimeterdämmung) betrachtet werden. Außerdem sollten die existierenden Prüfnormen, Berechnungsverfahren und auch die Prüfmethoden, die für konventionelle Dämmstoffe wie EPS oder XPS existieren, wie zum Beispiel die Wasseraufnahme durch Diffusion, auf ihre Anwendbarkeit für die Prüfung von Schaumglasschotter geprüft werden. Vergleicht man nun die Kenndaten der verschiedenen Dämmsysteme mit den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen, stellt man fest, dass die Anforderungen an Dämmstoffe unter lastabtragenden Bodenplatten von den Anforderungen an Dämmstoffe, die im Perimeterbereich wie Kellerdämmung von Häusern bestehen, nur geringfügig unterschiedlich sind.

Lediglich die Frost-Tau-Wechselprüfung mit 300 Frost-Tau-Wechseln bei Perimeterdämmungen unterscheidet sich zu den 20 geforderten Frost-Tau-Wechseln bei Dämmungen unter lastabtragenden Bodenplatten. Vergleicht man die Eigenschaften von Schaumglasschotter und XPS-Dämmstoff in Bezug auf den Einsatz als lastabtragende Dämmung unter Bodenplatten und als Perimeterdämmung für das sich im Erdreich befindende Mauerwerk kann man folgendes feststellen:

- Für XPS existieren Zulassungen für die Anwendung als lastabtragende Dämmung unter Bodenplatten wie auch als Perimeterdämmung, während für Schaumglasschotter bisher nur die Anwendung als lastabtragende Dämmung unter Bodenplatten in Deutschland durch Zulassungen geregelt ist.
- XPS kann bei stauendem Sickerwasser und im Grundwasser eingesetzt werden, während für Schaumglasschotter diese Anwendung derzeit nicht möglich ist.
- Schaumglasschotter darf bis zu Dämmstoffdicken von maximal 90 cm eingebaut werden. XPS darf bei Anwendung unter der Bodenplatte bis zu einer Dicke von 30 cm eingebaut werden und bis zu einer Dicke von 40 cm bei der Anwendung als Perimeterdämmung. Die erreichbaren maximalen Wärmedurchlasswiderstände (R Werte) mit Werten von ca. 7,8 m²K/W maximal sind für die Anwendung unter der Bodenplatte somit vergleichbar.
- Während bei XPS-Dämmplatten die einzelnen Platten getestet werden, wird bei SGS immer die ganze Schüttung und nicht das Einzelkorn getestet. Entsprechend wird die Schüttdichte und keine Rohdichte angegeben. Die Schüttdichte hängt bei SGS zudem von der Verdichtung vor Ort ab und kann ggf. ausführungsbedingt variieren.

- Die Dichte von SGS ist 3-5 mal größer als von XPS (31-49 kg/m³). SGS gibt es in unverdichtetem Zustand mit Schüttdichten von 125 kg/m³ bis 190 kg/m³ und in verdichtetem Zustand (1,3 : 1,0 Verdichtungsfaktor) von 162 kg/m³ bis 247 kg/m³ Einbaudichte.
- Für beide Materialien wird die Druckspannung bei 10% Stauchung ermittelt. Die Grenzwerte zwischen 300 KPa und 800 KPa sind vergleichbar hoch. Die Bemessungswerte für die Druckspannung sind ebenfalls vergleichbar groß von 185 KPa bis 370 KPa.
- SGS nimmt deutlich mehr Feuchtigkeit (10 Vol.-% bis 15 Vol.-%) auf, als XPS (maximal 0,7 Vol.-%).
- Für das SGS wird kein Diffusionsversuch vorgeschrieben.
- Der Frost-Tau-Wechselversuch wird für SGS nach DIN 5210-4 mit 20 Zyklen durchgeführt, für XPS mit 300 Zyklen nach DIN EN 12091.
- Die Bemessungswerte und Grenzwerte für die Wärmeleitfähigkeit liegen bei XPS bei weniger als der Hälfte, verglichen mit den SGS Werten.
- Für SGS wird die Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand ermittelt. Die Grenzwerte sind bisher nicht in der Zulassung aufgeführt jedoch im DIBt hinterlegt.
- Für den Einbau gelten für SGS und EPS ähnliche Regeln. Beim SGS kann auf eine Sauberkeitsschicht verzichtet werden. Es muss aber eine Dränung bei bindigem Boden sichergestellt werden.

2.2 Freilandversuche und Messtechnik

Um das hygrothermische Verhalten verschiedener Dämmschüttungen messtechnisch zu erfassen und die Ergebnisse mit den Ergebnissen aus Labormessungen und Berechnungen vergleichen zu können, wurden an zwei Versuchseinrichtungen auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen Dämmschüttungen aus Schaumglasschotter eingebaut und die Messwerte über eine Dauer von mehreren Jahren ermittelt.

Dabei werden zwei Ausführungen im Bereich als Perimeterdämmung einer nach Westen orientierten Kelleraußenwand einer Versuchshalle und zwei Ausführungen unterhalb eines neu erstellten Versuchsgebäudes in Holzbauweise im Bereich der Bodenplatte mit Frostschirm untersucht.

Die Herstellung der beiden Ausführungen der Dämmung der Kellerwände erfolgte Ende Juni/Anfang Juli 2010. Die gedämmte Bodenplatte mit Frostschirm wurde Ende Oktober bis Mitte November 2010 gebaut. Das Gebäude auf der Fundamentplatte konnte in der Zeit von Ende November bis Mitte Dezember errichtet werden. Die Installation und Inbetriebnahme der vernetzten Messwert erfassungsanlagen konnte für den Kellerbereich Ende Juli 2010 durchgeführt werden. Im nicht unterkellerten Gebäude startete die Messreihe Anfang 2011.

Das Gebäude und der Kellerraum werden während der Heizperiode elektrisch auf 18 °C bis 22 °C temperiert. Die Daten wurden auf einer Datenbank simultan zu den relevanten meteorologischen Größen der Wetterstation des IBP übertragen.

2.2.1 Versuchsaufbau Kellerwände

Ende Juni 2010 sind an der Kellerwand der Versuchshalle des IBP in Holzkirchen die Versuchsflächen für die Perimeterdämmung aus den Materialien A und B auf einer Länge von 10 m erstellt worden. Die Kellerwand ist nach Westen orientiert und hat eine Höhe von ca. 2,35 m von Oberkante Fundamentsohle bis Oberkante Kellerdecke. Bild 1 zeigt die zur Messinstallation und Einbau der Materialien vorbereitete Kellerwand nach Aushub und Entfernung der zuvor bestehenden Perimeterdämmung.



Bild 1:
Ansicht der vorbereitenden Kellerwand an der Versuchshalle des IBP in Holzkirchen nach Aushub und Entfernen der bisherigen Perimeterdämmung Ende Juni 2010.

Von der 10 m breiten Versuchsfläche ist jeweils die Hälfte (5 m) für das Material A und B vorgesehen. Die beiden Versuchsflächen teilen sich je Material nochmals in zwei gleich große 2,5 m breite Bereiche. Die äußeren Felder waren für die Installation der Sensorik vorgesehen. Die beiden mittleren Felder dienen der Material-/ Probenentnahme zu zwei Zeitpunkten. Durch die Trennung von Messachsen mit Sensorik und Bereiche zur Materialentnahme wurde die installierte Sensorik beim Aufgraben nicht beschädigt und das Schaumglasschottergefüge blieb im Einbauzustand für weitere Messperioden ungestört erhalten.

Um die Temperaturen und den Wärmedurchgang in unterschiedlichen Einbautiefen zu erfassen, sind in drei Tiefen die Temperaturprofile in den Grenzschichten zwischen Beton und Dämmschotter und zwischen Schaumglasschotterdämmung und Erdreich sowie an den Innenoberflächen der Kellerwand erfasst worden. Die Sensorik zur Messung der Wärmestromdichte befindet sich jeweils in der Grenzschicht zwischen Betonwand und Dämmschotter. Bild 2 zeigt im Vertikalschnitt die genaue Lage der Messachsen für Materialien A und B.

Das Material A wurde in ein Taschensystem mit einer Dicke von 45 cm eingefüllt. Das Material B wurde mittels Hilfsschalung in die Baugrube verfüllt. Daher liegt hier das Material unten im Bereich der Sohle in einer Dicke von 50 cm und im Sockelbereich in einer Dicke von 65 cm vor. Ferner wurde das Material B oben mit einer Teichfolie abgedeckt, welche über den Sockelbereich aus XPS-Material unter das WDV-System verlegt ist.

Im Sockelbereich ist eine 8 cm dicke Dämmplatte aus XPS angebracht. Vor der Fassade sind Rasengittersteine in Splitt verlegt.

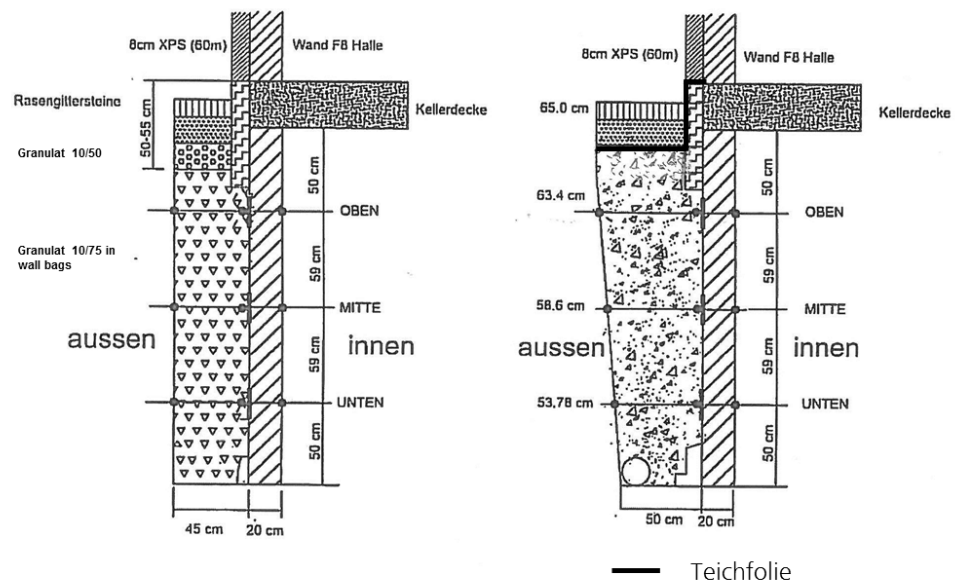


Bild 2:

Vertikalschnitte der Wandaufbauten der beiden Materialien (links: Material A, rechts Material B) mit Lage der Messachsen und Angabe der dort resultierenden Materialdicken.

Um die Sensorik in der Grenzschicht zwischen Betonwand und Schaumglaschotter vor Feuchtigkeit zu schützen, ist dort an den Messachsen auf die Sensorik eine Bitumenemulsion aufgetragen worden. In Bild 3 ist die installierte Sensorik für die beiden vorgesehenen Schaumglaschottervarianten auf der Außenseite der Kellerwand, vor dem Einbringen des Schaumglaschotters, zu sehen. Die linke Abbildung zeigt die Sensorik für die drei Messachsen noch ohne Schutz und rechts ist die Sensorik der Messachsen beim Material B mit bituminöser Abdichtung zu sehen.

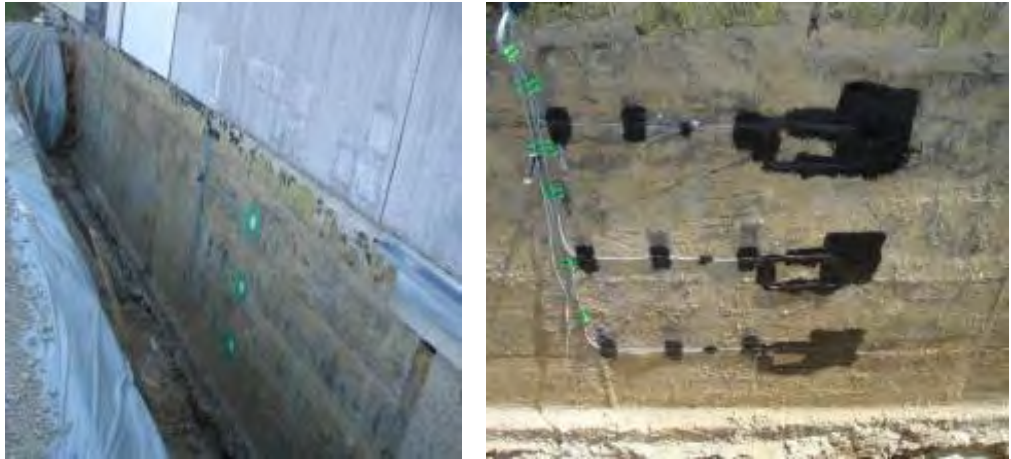


Bild 3:
 Installierte Sensorik auf der Außenseite der gesamten Kellerwand vor (links) und nach dem Aufbringen der Bitumenemulsion auf die Sensorik bei Material B (rechts).

Aufbau der Perimeterdämmung aus Schaumglasschotter des Materials A:

Zuerst ist der Aufbau für Material A mit der provisorischen Fixierung des Taschensystems an der Betonwand zum späteren Verfüllen erfolgt (Bild 4). Die einzelnen Taschen haben eine Breite von jeweils 50 cm und sind unten offen. Nach dem Verfüllen sind die Kammern mit den bereits vorhandenen Streifen lose abgedeckt worden.



Bild 4:
 Ansicht der an der Wand zum Befüllen provisorisch fixierten Taschensystems des Materials A.

Das Befüllen der Taschen erfolgt im Wesentlichen in zwei Schritten. Parallel hierzu wird der Kies zum Verfüllen der Baugrube in mehreren Abschnitten eingebracht und verdichtet. In Bild 5 sieht man auf der linken Abbildung den ersten Füllvorgang und rechts die zur Fundamentsohle hin offenen Taschen vor dem Einbringen des Kieses.



Bild 5:
Erste Lage der Füllung mit dem in Bigbags angelieferten Material A in die erste Tasche des Taschensystems (linke Abb.). Rechts sind die zur Fundamentsohle hin offenen Taschen vor dem Einbringen des Kieses zu sehen.

Bild 6 zeigt die eingebrachte, erste Kiesschicht und die Verdichtung bei einem zur Hälfte gefüllten Taschensystem. Eine Verdichtung des Materials in dem Taschensystem erfolgt indirekt durch die Verdichtung des Kieses.



Bild 6:

Ein zur Hälfte mit dem Material A gefülltes Taschensystem und Verdichtung der ersten Kiesschicht.

Parallel zur Verfüllung der Baugrube ist die Sensorik zur Erfassung der Temperaturen zwischen dem Taschensystem und der Kiesschicht verlegt worden.

Auf Bild 7 erkennt man für die mittlere und obere Messachse die auf den Isothermen (horizontal) verlegten und mit Klebeband fixierten Sensorleitungen. Die Temperatursensoren befinden sich am Ende der Verklebung.



Bild 7:

Verlegung der Sensorleitungen für die Erfassung der Grenzschichttemperatur zur Kiesschicht für die mittlere und obere Messachse der Schaumglas-schottervariante aus Material A.

In Bild 8 ist links die bis fast zur oberen Messachse verfüllte Baugrube und die vollständige Befüllung des Taschensystems zu sehen. Man erkennt auch die, mit Kunststoffdübeln über die gesamte Länge des Sockels montierte, Dämmplatte aus XPS im Sockelbereich.



Bild 8: Ansichten der bis fast zur oberen Messachse verfüllten Baugrube und letzter Befüllvorgang des Taschensystems.

Nach dem letzten Befüllen des Taschensystems sind die einzelnen Taschen oben, durch Zurückklappen von angenähten Laschen, lose abgedeckt worden. Beschwert sind die Laschen mit einer ca. 15 cm dicken Schicht Schaumglasschotter gleichen Typs vom Material A, jedoch mit einer feineren Körnung 10/50 (Bild 9).



Bild 9: Umlegen der angenähten Laschen als Deckel des Taschensystems und Abdeckung mit Schaumglasschotter feinerer Körnung bei Material A.

Zu einem späteren Zeitpunkt ist der gesamte Bereich vor der Kellerwand mit Split und Rasengittersteinen versehen worden. Bei Material A ist vor dem Aufbringen des Splits ein ca. 80 cm breites Geotextil verlegt worden (Bild 10).



Bild 10:
Abdeckung mit Geotextilstreifen und Verlegung von Rasengittersteinen im Splittbett im Bereich der Perimeterdämmung Material A.

Aufbau der Perimeterdämmung aus Schaumglasschotter des Materials B:

Das Material B wurde lose vor die Kellerwand in die Baugrube verfüllt, wobei eine Hilfsschalung zur Abtrennung der in Geotextil eingeschlagenen Dämmschicht gegen das restliche Verfüllgut (hier: Kies) zur Anwendung kam. Da für die messtechnische Begleitung die Verwendung einer losen Hilfsschalung zu unpräzisen Schichtdicken der Perimeterdämmung an den Messachsen geführt hätte und die späteren Probennahmen ebenfalls problematisch geworden wären, wurden hier die Schichtdicken durch entsprechend montierte Balken, Baustahl und gespanntes Geotextil definiert. In der Baupraxis werden Schichtdicken im Bereich der Fundamentsohle von 50 cm und im Bereich des Sockels von 60 cm angestrebt. Dies wird hier durch eine exakte Ausrichtung der Balken erreicht (Maße in Bild 2). Im Gegensatz zu Material A, bei dem der Schaumglasschotter die Drainage übernimmt (Taschensystem unten offen), ist beim Material B ein Drainagerohr vor dem Einbringen der ersten Schaumglasschotter-schicht verlegt worden. In Bild 11 sind auf der linken Abbildung die Hilfskonstruktion mit den ausgerichteten Balken und die erste Baustahlmatte sowie das Geotextil zu sehen. Die rechte Abbildung zeigt das auf Geotextil verlegte Drainagerohr, welches in einen ausreichend entfernten Sickerschacht geführt ist.



Bild 11:
 Ansicht der Hilfskonstruktion mit den ausgerichteten Balken, Baustahlmatte und Geotextil (links). Rechts sieht man das auf Geotextil verlegte Drainagerohr, welches in einen Sickerschacht geführt ist.

Das Einbringen des Schaumglasschotters aus Material B und die Verfüllung mit Kies erfolgt, ähnlich wie bei Material A, abschnittsweise. Hierbei wird bis zu einer bestimmten Höhe (Markierung auf der Kellerwand) Material eingebracht und dann mit einer 80 kg Rüttelplatte verdichtet (Bild 12 und Bild 13). Der angestrebte Verdichtungsgrad beträgt 1,3:1,0 und wird durch Abstandsmessung zur Markierung mit dem Zollstock gemessen.

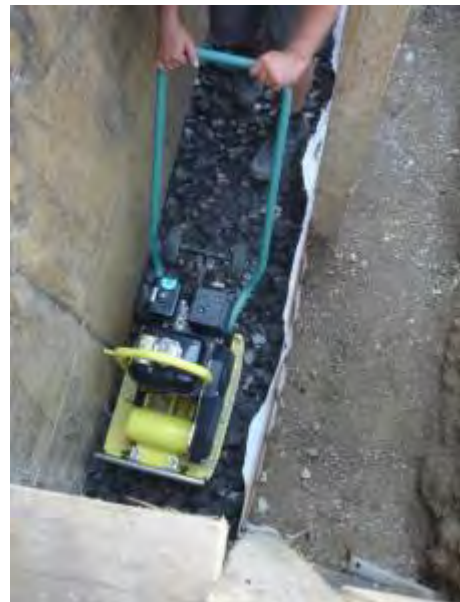
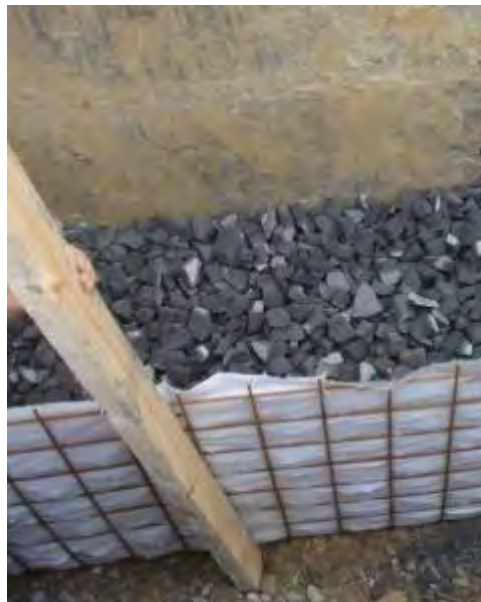


Bild 12:
 Abschnittsweises Befüllen und Verdichten des eingebrachten Schaumglasschotters mit einer Hilfskonstruktion aus Baustahlmatten, Geotextil und Holzbalken, erster Abschnitt.



Bild 13:
Weiteres Befüllen mit Schaumglasschotter bei Material B. Links Befüllen bis zur blauen Markierung, rechts nach Verdichtung auf gewünschten Verdichtungsgrad 1,3:1,0 (Abstand zur blauen Linie).

In Bild 14 ist die angebrachte XPS-Dämmung im Sockelbereich und der letzte Befüllabschnitt sowie das Verfüllen mit Kies bei Material B zu sehen. Dabei wird der Schaumglasschotter auf gleiches Niveau wie bei Material A (Bild 14 rechts im Vordergrund) eingebracht.



Bild 14:
Letzter Befüllabschnitt, Anbringung der Sockeldämmung und Verfüllen mit Kies bei Material B auf gleiches Niveau wie bei Material A (Vordergrund).

Bei Material B ist die Schaumglasschotterdämmung mit einer regendichten Abdeckung aus Teichfolie versehen. Diese ist über die XPS Dämmung im Sockelbereich geführt und im Zuge der Erstellung einer WDVS-Versuchsfassade unterhalb der Dämmplatte bituminös verklebt worden. Oberhalb der Teichfolie sind Rasengittersteine im Splittbett verlegt. Bild 15 zeigt auf der linken Abbildung im Sockelbereich den Anschluss der regendichten Abdeckung an die WDVS-Versuchsfassade und rechts die Verlegung von Rasengittersteinen im Splittbett.



Bild 15:
Anschluss der regendichten Abdeckung aus Teichfolie an das WDV-System der Fassade bei Material B und Verlegung der Rasengittersteine im Splittbett.

2.2.2 Aufbau der Bodenplatte und des Versuchsgebäudes

Um im Bereich der Bodenplatte die Schaumglasschottervarianten aus den Materialien B und C untersuchen zu können, wurde eine entsprechende Bodenplatte und ein Versuchsgebäude in Holzbauweise erstellt. Die Dämmung der Bodenplatte ist bei beiden Materialien mit Frostschirm ausgeführt. In Bild 16 ist eine Skizze mit Draufsicht auf die 8 x 3 m großen Fundamentplatte und eine Schnittansicht des Aufbaues mit den eingezeichneten Messachsen im ungestörten Bereich („Mitte“) und Randbereich („Rand“, 0,5 m Abstand) sowie die Lage der Revisionsöffnungen zur Materialentnahme zu sehen. Der Frostschirm verläuft um die ganze Fundamentplatte herum und die Stirnseite der Bodenplatte ist mit 10 cm dicker Dämmung aus XPS-Material gedämmt. Bei Material B ist der gesamte Frostschirm durch eine über den Sockelbereich aus XPS verlegte Teichfolie abgedeckt.

seite zum Sickerschacht verlegt. Danach wurden die Drainagegräben mit Schaumglasschotter der Materialien B und C verfüllt (Bild 18).



Bild 18: Verlegung des Geotextils und der Drainagerohre sowie Verfüllen des Drainagegrabens nach Aufteilung der Versuchsflächen für Material B (im Hintergrund) und Material C im Vordergrund.

In Bild 19 ist die Verlegung der Sensorik auf Ebene Erdreich/Schaumglasschotter im Frostschirmbereich bei Material C (links) und das Verdichten der ersten Schaumglasschotterschicht bei Material B (rechts) zu sehen. Bild 20 zeigt das Einbringen und Verdichten der zweiten Lage des Schaumglasschotters und das anschließende Umschlagen des Geotextils.



Bild 19:
Verlegung der Sensorik auf Ebene Erdreich/Schaumglasschotter im Frostschirmbereich bei Material C (links) und das Verdichten der ersten Schaumglasschotterschicht bei Material B (rechts).



Bild 20:
Einbringen und Verdichten der zweiten Lage des Schaumglasschotters und anschließendes Umschlagen des Geotextils.

Danach ist die Sensorik (Wärmestrommessplatten und Temperatursensoren) vor den Schalungs- und Betonarbeiten zur Herstellung der Bodenplatte eingebracht worden (Bild 21 links). Auf dem rechten Bild sind beim Einfüllen des Betons die neben den Messachsen liegenden Revisionsöffnungen zur Materialentnahme am Rand und in der Plattenmitte, für Material B im Vordergrund, zu erkennen.



Bild 21:
Installation der durch Kupferplatten geschützten Wärmestrommessplatten und Temperatursensorik oberhalb der Dämmschicht, für Material B und C für Plattenmitte und Randbereich (links) sowie Betonieren der Bodenplatte im November 2010 (rechts).

Noch im Dezember 2010 konnte das Versuchsgebäude in Holzbauweise errichtet, gedämmt und beheizt werden. Zuvor ist die regendichte Abdeckung des Frostschirmes bei Material B durch Verlegung einer Teichfolie erstellt worden. Dabei ist diese unter die Schwelle der Holzrahmenkonstruktion des Versuchsgebäudes verlegt worden.



Bild 22:
Süd-West-Ansicht des Versuchsgebäudes nach der Fertigstellung im Januar 2011.

Das Gebäude ist mit seinen langen Seiten nach Osten bzw. Westen ausgerichtet. Bild 22 zeigt die Gebäudeansicht aus Südwesten im Januar 2011. Die Installation der raumseitigen Messsensorik erfolgte parallel zu den Bauarbeiten, sodass die Messwerterfassungsanlage Anfang Januar 2011 installiert und in Betrieb gehen konnte.

2.3 Ergebnisse der Freilandversuche und der instationären hygrothermischen Berechnungen

2.3.1 Ergebnisse der Untersuchungen an den Kellerwänden im Freiland

2.3.1.1 Außen- und Raumklima im Kellerraum

In Bild 23 sind die Außenklimabedingungen (Außenlufttemperatur, relative Außenluftfeuchte und Regenmenge) während des für die Untersuchungen an der Kellerwand maßgeblichen Zeitraumes vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 dargestellt.

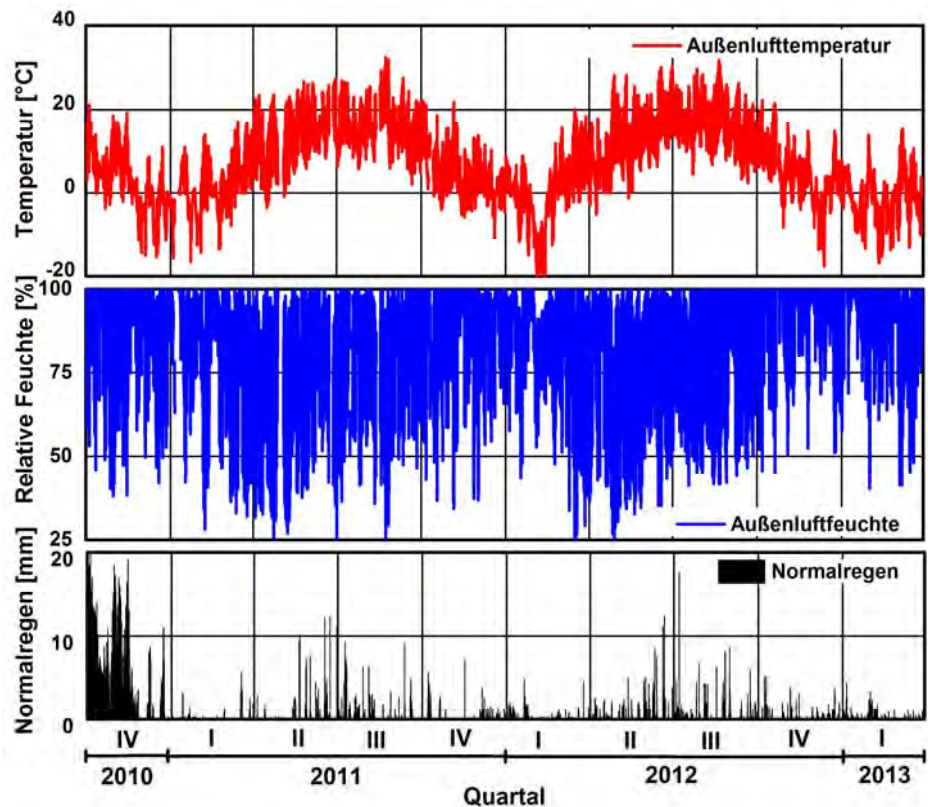


Bild 23:

Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte der Außenluft sowie des Niederschlages während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013.

Der Verlauf der Raumluft- und der Wandinnenoberflächentemperatur im Kellerraum während der Untersuchungsdauer ist aus Bild 24 ersichtlich. Die Raumlufttemperatur liegt weitgehend deutlich über 20 °C. Dadurch sinkt auch die Wandinnenoberflächentemperatur selten unter 20 °C.

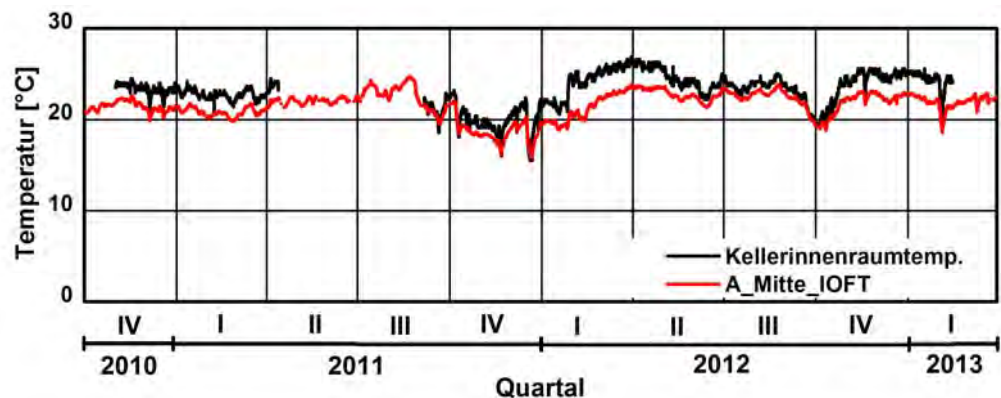


Bild 24:

Verlauf der Raumlufttemperatur und der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT) in Wandmitte während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013.

2.3.1.2 Ergebnisse der Untersuchungen an den Kellerwänden im Freiland, Material A

In den folgenden Bildern ist der Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotterdämmung und Kiesbett) an den einzelnen Messstellen (gemäß Bild 2) am Material A während der Untersuchungen an der Kellerwand zu sehen. Bild 25 zeigt die Messergebnisse für die Temperaturen in der „Mitte“ der Messachse an der Kellerwand. Der Verlauf der Temperaturen an der Wand „unten“ ist in Bild 26 und an der Wand „oben“ in Bild 27 zu erkennen. Die Zeitpunkte der Probenahmen sind farbig markiert. Die Innenwandoberflächentemperaturen und die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung an den Messstellen folgen weitgehend der Raumlufttemperatur. Die Temperatur zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett (AOFL) wird weitgehend von der Temperatur im Erdreich und damit indirekt von der Außenlufttemperatur bestimmt. Während an der Messstelle „unten“ die Außenoberflächentemperatur zwischen minimal 8 °C im Winter und ca. 23 °C im Sommer schwankt, ist die Schwankungsbreite über das Jahr aufgrund der größeren Nähe zur Oberfläche, und damit zur Außenluft, an den Messstellen „Mitte“ und „oben“ größer. Die Messwerte an der Messstelle „oben“ unterliegen dadurch auch mehr kurzfristigen Schwankungen.

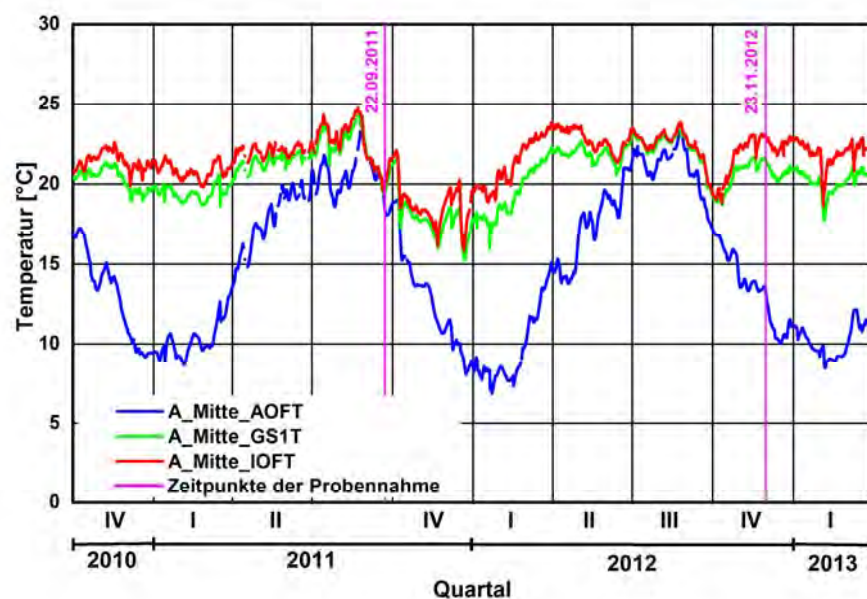


Bild 25:

Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett) in Wandmitte während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material A. Die Zeitpunkte der Probenahmen sind farbig markiert.

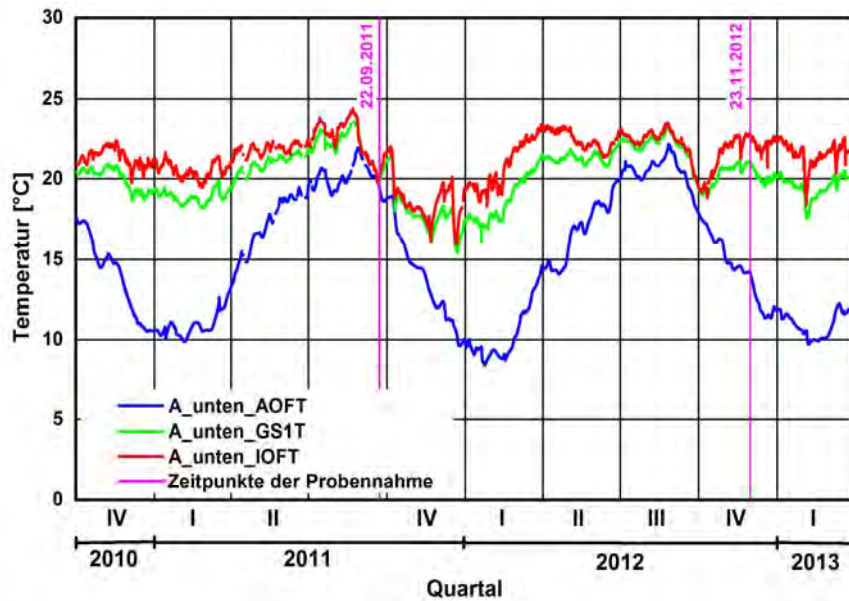


Bild 26:
Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett) an der Wand „unten“ während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material A. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

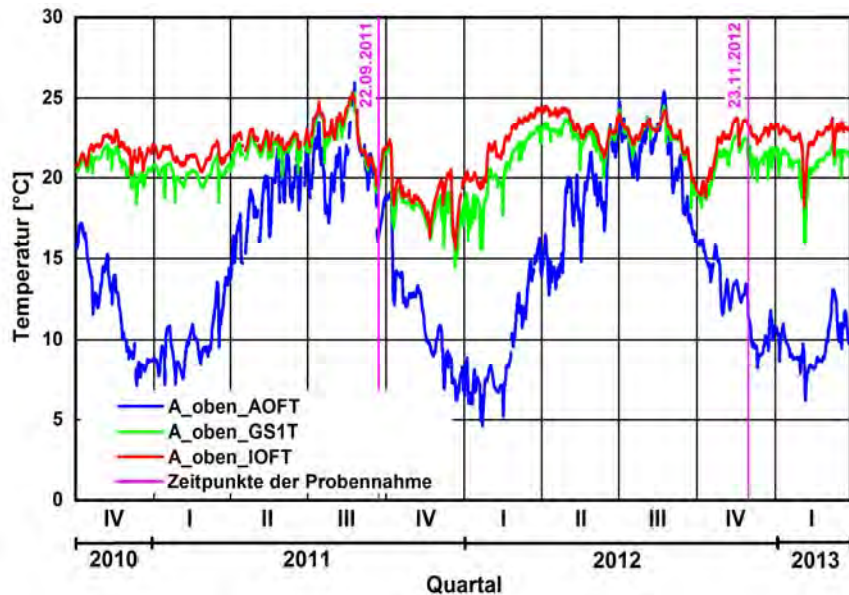


Bild 27:
Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett) an der Wand „oben“ während der Untersuchungen an der Kellerwand

vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material A. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

Der Verlauf der Wärmeströme für die unteren und oberen Wandbereiche sowie in Wandmitte während der Untersuchungen am Material A ist in Bild 28 dargestellt. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert. Die Wärmeströme schwanken jahreszeitlich bedingt. Es zeigt sich auch hier deutlich ein stärkerer Einfluss der Außenklimabedingungen an der „oberen“ Messstelle gegenüber den tiefer gelegenen Messstellen. Vor allem bei Regenereignissen sind große temporäre Wärmeverluste zu verzeichnen.

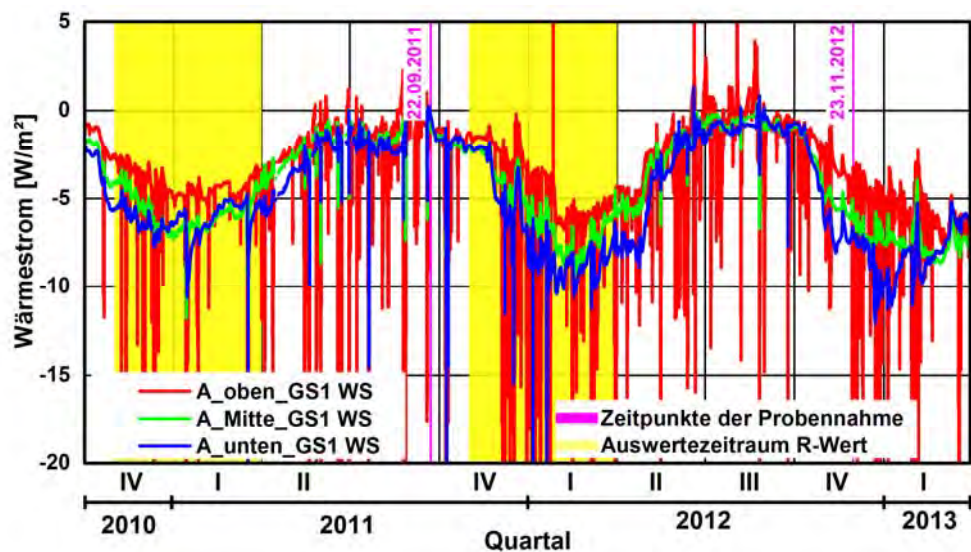


Bild 28:

Verlauf der Wärmeströme für die unteren und oberen Wandbereiche sowie in Wandmitte während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material A. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

In Tabelle 1 sind die über den Zeitraum vom 01.11.2010 bis zum 31.03.2011 gemittelten Messwerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) sowie die sich daraus berechnenden Wärmedurchlasswiderstände (R-Wert) für die 3 Messstellen am Material A aufgelistet. Die R-Werte sind deutlich niedriger als erwartet. Der niedrigste R-Wert liegt für die Messstelle „unten“ vor. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass bei Regen das Wasser nach unten abläuft und dadurch im unteren Bereich das Dämmmaterial feuchter ist als im oberen Bereich. Dies deckt sich mit den Erfahrungen bei den Probennahmen.

Tabelle 1:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.11.2010 bis zum 31.03.2011 für Material A.

Material A Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
oben	1,58	7,61	-4,81
Mitte	1,52	8,93	-5,89
unten	1,23	7,61	-6,21
Mittlere Außenlufttemperatur 0,8 °C, Niederschlagsmenge 273 mm			

In Tabelle 2 sind die über den 2. Messzeitraum vom 01.11.2011 bis zum 31.03.2012 gemittelten Messwerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen sowie die sich daraus berechnenden R-Werte für die 3 Messstellen am Material A dokumentiert. Die R-Werte sind wiederum deutlich niedriger als erwartet. Auch hier liegt der niedrigste R-Wert an der Messstelle „unten“ vor.

Tabelle 2:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.11.2011 bis zum 31.03.2012 für Material A.

Material A Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
oben	1,59	9,72	-6,10
Mitte	1,45	8,32	-5,74
unten	1,02	7,03	-6,89
Mittlere Außenlufttemperatur 0,9 °C, Niederschlagsmenge 256 mm			

2.3.1.3 Ergebnisse der Untersuchungen an den Kellerwänden im Freiland, Material B

Analog zu den vorangegangenen Bildern ist in den folgenden Bildern der Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett) an den einzelnen Messstellen am Material B während der Untersuchungen an der Kellerwand dargestellt. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind wiederum farbig markiert. Auch hier folgen die Innenwandoberflächentemperaturen und die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung an den Messstellen weitgehend der Raumlufttemperatur. Die Temperatur zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett (AOFL) wird weitgehend von der Temperatur im Erdreich und damit indirekt von der Außenlufttemperatur bestimmt. Auch bei Verwendung von Dammmaterial des Materials B schwankt die Außenoberflächentemperatur an der Messstelle „unten“ zwischen minimal 8 °C im Winter und ca. 23 °C im Sommer. Die Schwankungsbreite über das Jahr ist ebenfalls aufgrund der größeren Nähe zur Oberfläche, und damit zur Außenluft, an den Messstellen „Mitte“ und „oben“ größer. Die Messwerte an der Messstelle „oben“ unterliegen somit auch mehr kurzfristigen Schwankungen.

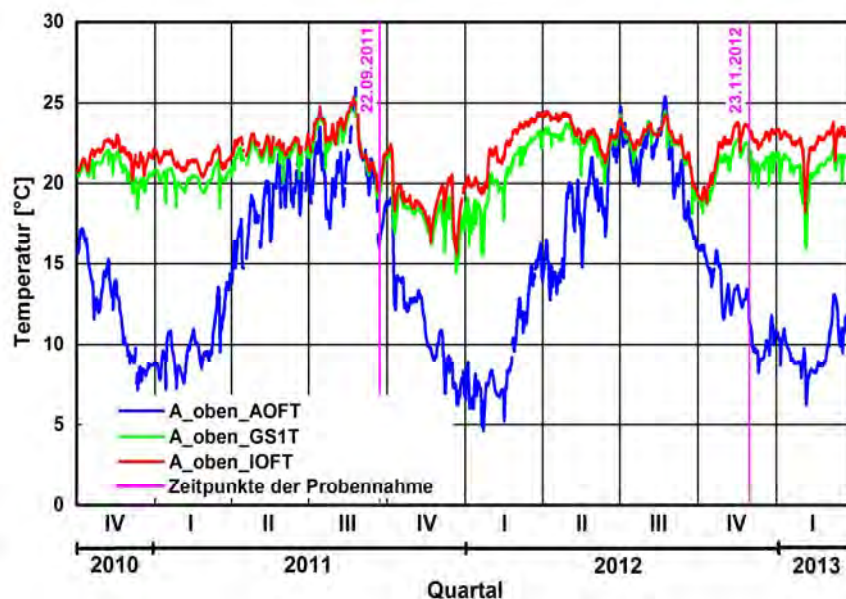


Bild 29:

Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotterdämmung und Kiesbett) in Wandmitte während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material B. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

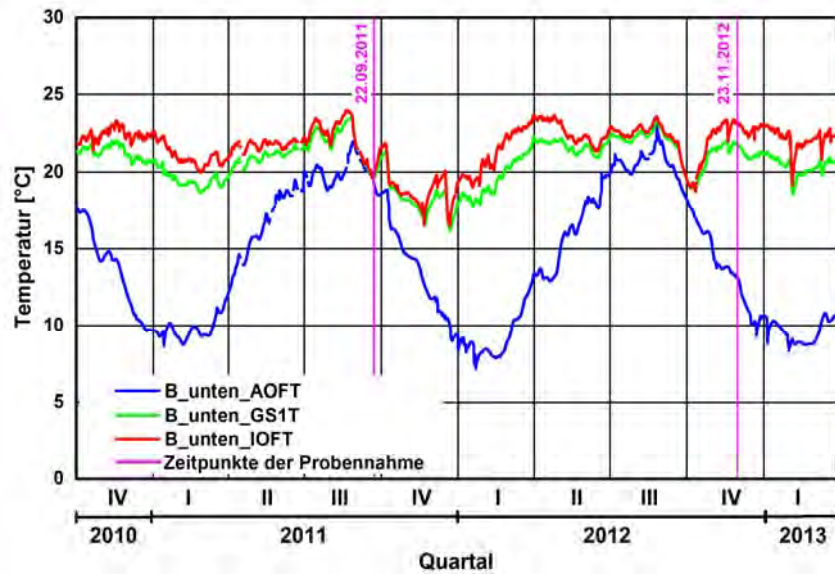


Bild 30:
Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett) an der Wand „unten“ während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material B. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

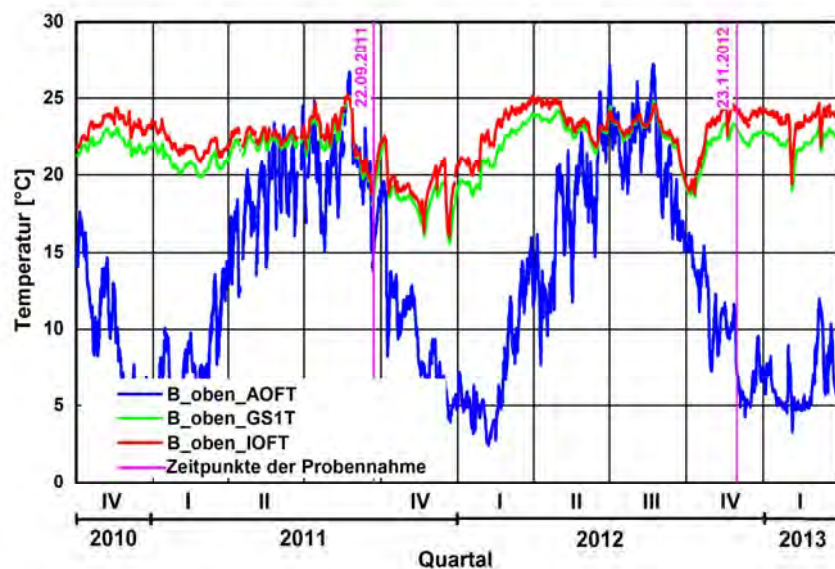


Bild 31:
Verlauf der Wandinnenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Betonwand und Schaumglasschotterdämmung (GS1T) sowie der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett) an der Wand „oben“ während der Untersuchungen an der Kellerwand

vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material B. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

Der Verlauf der Wärmeströme an den einzelnen Messstellen während der Untersuchungen am Material B wird im folgenden Bild gezeigt. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert. Die Wärmeströme schwanken wiederum jahreszeitlich bedingt. Es zeigt sich auch hier deutlich ein stärkerer Einfluss der Außenklimabedingungen an der „oberen“ Messstelle gegenüber den tiefer gelegenen Messstellen. Bei einigen Regenereignissen sind temporäre Wärmeverluste zu verzeichnen. Der Einfluss des Regens ist hier jedoch nicht sehr deutlich ausgeprägt. Es ist anzunehmen, dass durch die Abdeckung mit einer Teichfolie der Eintrag von Regenwasser von oben weitgehend verhindert wird.

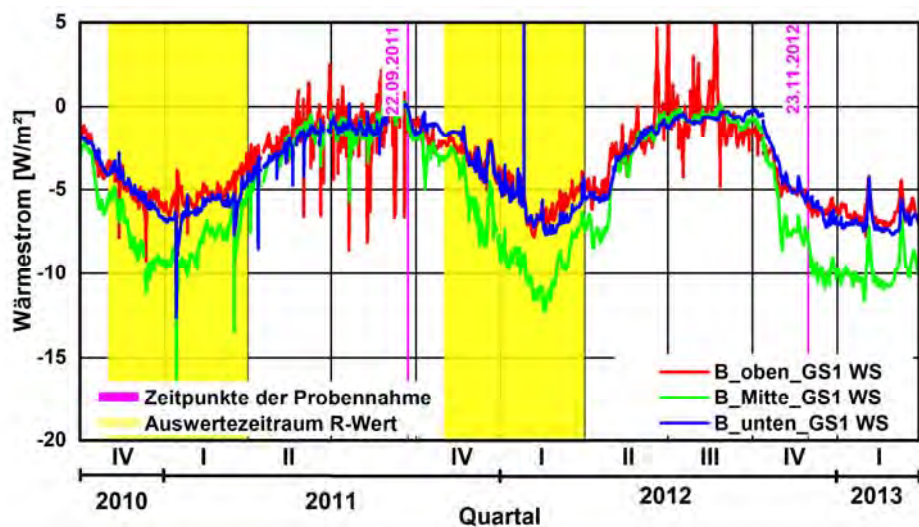


Bild 32:

Verlauf der Wärmeströme für die unteren und oberen Wandbereiche sowie in Wandmitte während der Untersuchungen an der Kellerwand vom 01. Oktober 2010 bis 31. März 2013 für Material B. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

In Tabelle 3 sind die über den Zeitraum vom 01.11.2010 bis zum 31.03.2011 gemittelten Messwerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) sowie die sich daraus berechnenden Wärmedurchlasswiderstände (R-Wert) für die 3 Messstellen am Material B aufgelistet. Die R-Werte sind deutlich niedriger als erwartet. Im Bereich der Messstelle „oben“ ist mit 2,63 m²K/W der größte R-Wert ermittelt worden. Dies kann daran liegen, dass durch den Einsatz der Teichfolie der Eintrag von Regenwasser in den oberen Bereich der Dämmung weitgehend unterbunden wurde. An den Messstellen „Mitte“ und „unten“ sind die R-Werte deutlich geringer. Seitlich eindringendes Regenwasser bzw. Feuchtigkeit kann hier zu einer Reduzierung des R-Wertes geführt haben. Es ist anzunehmen, dass die im Bereich „unten“ angebrachte Drainage für den etwas höheren R-Wert an der Messstelle „unten“ im Vergleich zu dem R-Wert an der Messstelle „Mitte“ verantwortlich ist.

Tabelle 3:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.11.2010 bis zum 31.03.2011 für Material B.

Material B Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
oben	2,63	13,50	-5,14
Mitte	1,48	11,87	-8,00
unten	1,65	9,44	-5,70
Mittlere Außenlufttemperatur 0,8 °C, Niederschlagsmenge 273 mm			

In Tabelle 4 sind die über den 2. Messzeitraum vom 01.11.2011 bis zum 31.03.2012 gemittelten Messwerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen sowie die sich daraus berechnenden R-Werte für die 3 Messstellen am Material B dokumentiert. Während die R-Werte insgesamt wiederum deutlich niedriger als erwartet sind, liegt auch in diesem Zeitraum der größte R-Wert an der Messstelle „oben“ vor.

Tabelle 4:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.11.2011 bis zum 31.03.2012 für Material B.

Material B Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
oben	2,71	12,57	-4,64
Mitte	1,37	10,68	-7,78
unten	1,75	8,47	-4,85
Mittlere Außenlufttemperatur 0,9 °C, Niederschlagsmenge 256 mm			

2.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen an der Bodenplatte im Freiland

2.3.2.1 Außen- und Raumklima im Versuchshaus

Die Außenklimabedingungen (Außenlufttemperatur, relative Außenluftfeuchte und Regenmenge) während des für die Untersuchungen an der Bodenplatte maßgeblichen Zeitraumes vom 01. Januar 2011 bis 31. März 2014 sind in Bild 33 dargestellt.

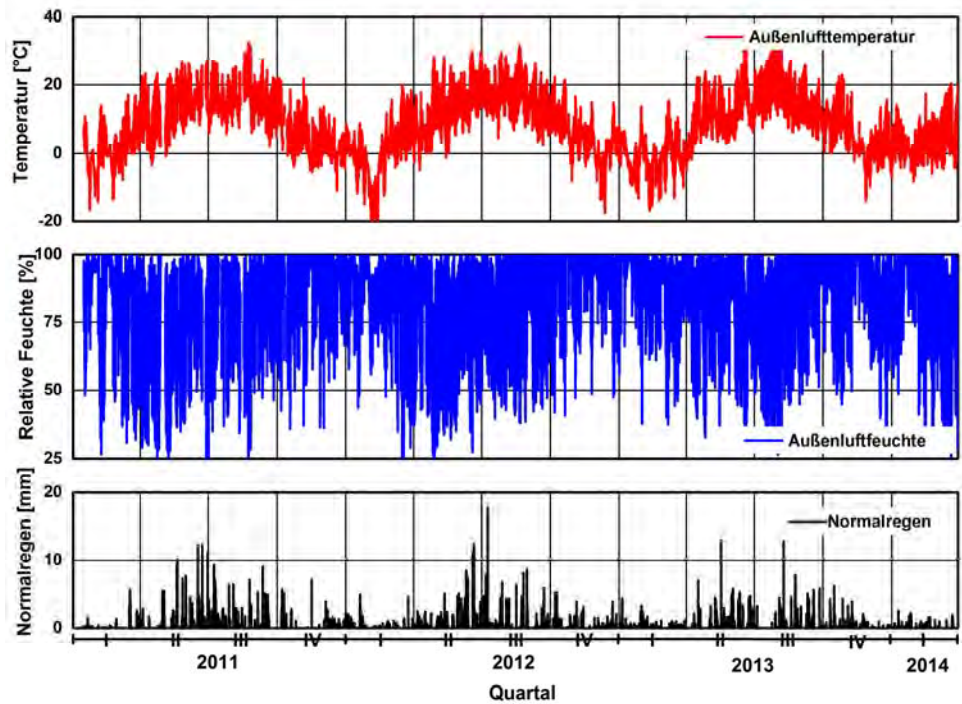


Bild 33:
Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte der Außenluft sowie des Niederschlages während der Untersuchungen an der Bodenplatte vom 01. Januar 2011 bis 31. März 2014.

Der Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte im Versuchshaus während der Untersuchungsdauer ist aus Bild 34 ersichtlich. Die Raumlufttemperatur liegt weitgehend zumeist über 20 °C. Die relative Feuchte schwankt jahreszeitlich bedingt.

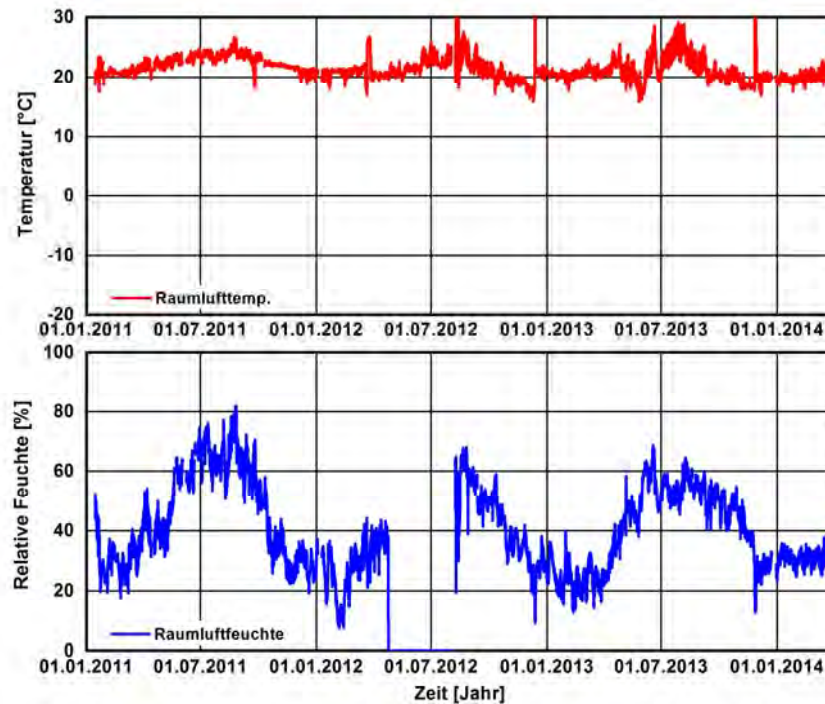


Bild 34:
Innenklima des Versuchsgebäudes während des Untersuchungszeitraumes vom 1. Januar 2011 bis 31. März 2014.

2.3.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen an der Bodenplatte im Freiland, Material B

Der Verlauf der Innenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Bodenplatte und Schaumglasschotterdämmung (GS1) und der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Erdreich) an den einzelnen Messstellen (siehe Bild 16) am Material B während der Untersuchungen an der Bodenplatte ist in den folgenden Bildern zu sehen. Zusätzlich ist die Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe abgebildet. Bild 35 zeigt die Messergebnisse für die Temperaturen in der „Mitte“ der Bodenplatte. Der Verlauf der Temperaturen im Randbereich der Bodenplatte (Frostschirm) ist in Bild 36 zu erkennen. Die Zeitpunkte der Probenahmen sind farbig markiert. Die Innenoberflächentemperaturen und die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen Betonplatte und Schaumglasschotterdämmung an den Messstellen folgen überwiegend der Raumlufttemperatur. Die Temperatur zwischen Schaumglasschotterschicht und Kiesbett (AOFL) wird weitgehend von der Temperatur im Erdreich bestimmt.

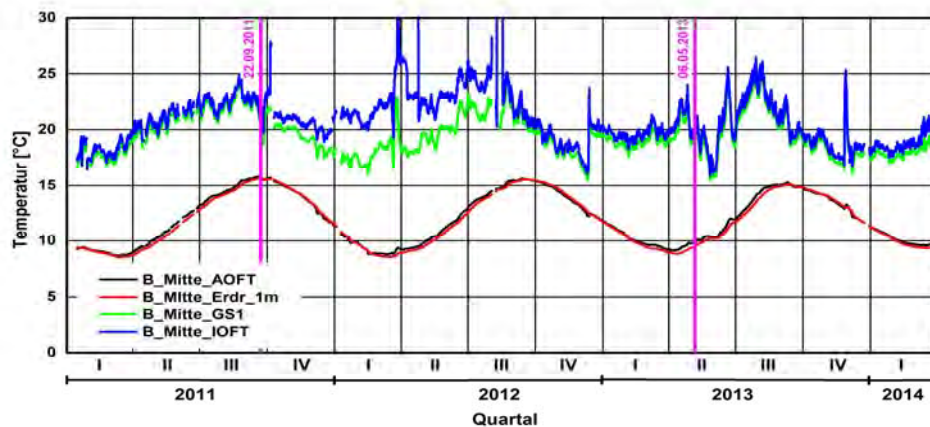


Bild 35:
Verlauf der Innenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Bodenplatte und Schaumglasschotterdämmung (GS1), der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Erdreich) sowie der Erdreichtemperatur in 1m Tiefe in der Mitte der Bodenplatte vom 01. Januar 2011 bis 31. März 2014 für Material B. Die Zeitpunkte der Probenahmen sind farbig markiert.

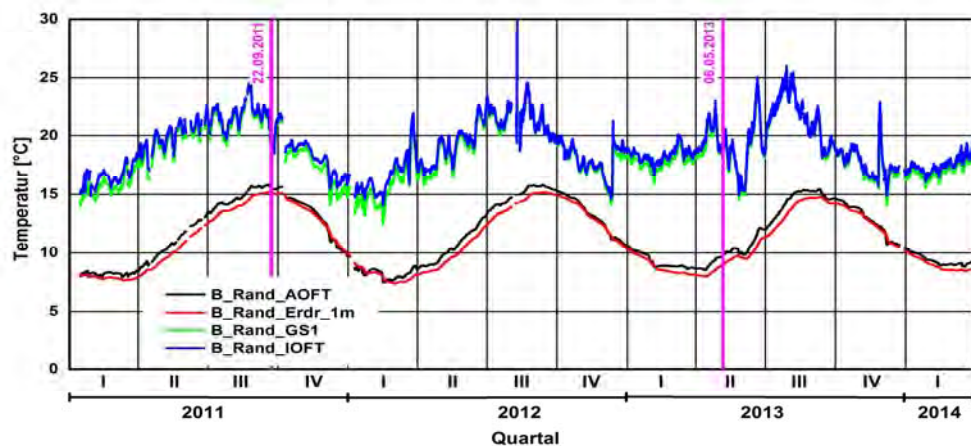


Bild 36:
Verlauf der Innenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Bodenplatte und Schaumglasschotterdämmung (GS1), der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Erdreich) sowie der Erdreichtemperatur in 1m Tiefe am Randbereich (Frostschirm) der Bodenplatte vom 01. Januar 2011 bis 31. März 2014 für Material B. Die Zeitpunkte der Probenahmen sind farbig markiert.

Der Verlauf der Wärmeströme für den Randbereich und in der Mitte der Bodenplatte während der Untersuchungen am Material B ist in Bild 37 dargestellt. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probenahmen sind farbig markiert. Die Wärmeströme schwanken jahreszeitlich bedingt. Es zeigt sich ein deutlich stärkerer Einfluss der Außenklimabedingungen

an der Messstelle im Randbereich gegenüber der Messstelle in der Mitte der Bodenplatte. Bei einigen Regenereignissen sind temporäre Wärmeverluste im Randbereich zu verzeichnen. Der Einfluss des Regens ist hier jedoch nicht sehr deutlich ausgeprägt. Es ist anzunehmen, dass durch die Abdeckung mit einer Teichfolie der Eintrag von Regenwasser von oben weitgehend verhindert wird. Auch im Bereich der Mitte der Bodenplatte, der ja durch die Bodenplatte selbst und durch das sich darüber befindliche Versuchshaus vor einem direkten Regeneintrag geschützt ist, ist ein gewisser Einfluss des Außenklimas, vor allem bei Regenereignissen, festzustellen.

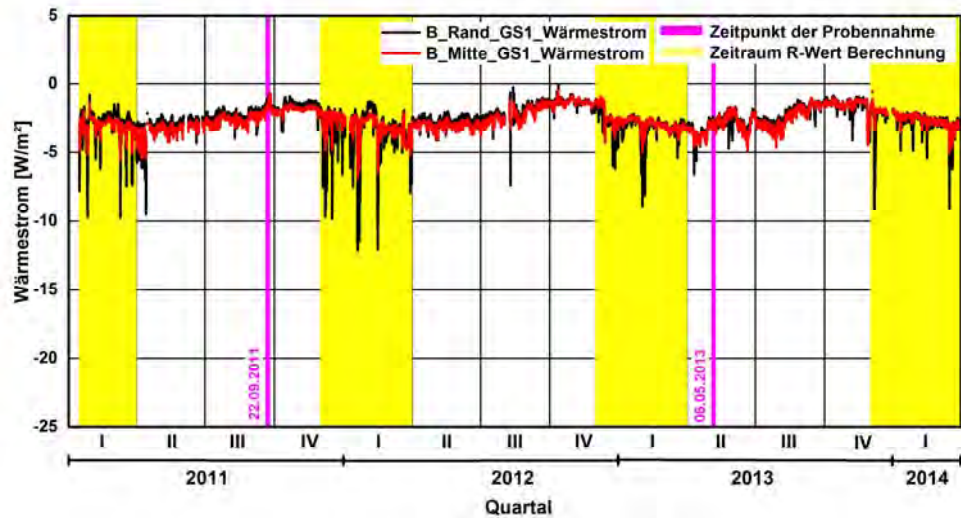


Bild 37:

Verlauf der Wärmeströme für den Randbereich und in der Mitte der Bodenplatte vom 01. Januar 2011 bis 31. März 2014 für Material B. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probennahmen sind farblich markiert.

In den folgenden Tabellen sind die über die einzelnen Bewertungszeiträume gemittelten Messwerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) sowie die sich daraus berechnenden Wärmedurchlasswiderstände (R-Wert) für die Messstellen im Randbereich und in der Mitte der Bodenplatte für Material B aufgeführt. Die R-Werte des Randbereiches sind niedriger als die R-Werte für die Messstelle in der Mitte der Bodenplatte. Dies ist sicherlich auf den stärkeren Einfluss des Außenklimas, vor allem von Regenereignissen und dem damit verbundenen Wärmeverlusten, zurück zu führen, wobei gleichzeitig die Teichfolie diesen Effekt dämpft.

Tabelle 5:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 15.01.2011 bis zum 31.03.2011 für Material B.

Material B Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,89	8,74	-3,03
Rand	2,58	7,58	-2,94
Mittlere Außenlufttemperatur 1,2 °C, Niederschlagsmenge 118 mm			

Tabelle 6:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.12.2011 bis zum 31.03.2012 für Material B.

Material B Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,68	7,59	-2,97
Rand	2,02	6,69	-3,31
Mittlere Außenlufttemperatur 0,4 °C, Niederschlagsmenge 252 mm			

Tabelle 7:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.12.2012 bis zum 31.03.2013 für Material B.

Material B Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,91	8,02	-2,75
Rand	2,65	7,87	-2,97
Mittlere Außenlufttemperatur 0,9 °C, Niederschlagsmenge 307 mm			

Tabelle 8:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.12.2013 bis zum 31.03.2014 für Material B.

Material B Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,93	7,42	-2,53
Rand	2,65	7,21	-2,72
Mittlere Außenlufttemperatur 2,6 °C, Niederschlagsmenge 117 mm			

2.3.2.3 Ergebnisse der Untersuchungen an der Bodenplatte im Freiland, Material C

Der Verlauf der Innenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Bodenplatte und Schaumglasschotterdämmung (GS1) und der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Erdreich) an den einzelnen Messstellen (siehe Bild 16) am Material C während der Untersuchungen an der Bodenplatte ist in den folgenden Bildern zu sehen. Zusätzlich ist die Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe abgebildet. Bild 38 zeigt die Messergebnisse für die Temperaturen in der „Mitte“ der Bodenplatte. Der Verlauf der Temperaturen im Randbereich der Bodenplatte (Frostschirm) ist in Bild 39 zu erkennen. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farblich markiert. Die Innenoberflächentemperaturen und die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen Betonplatte und Schaumglasschotterdämmung an den Messstellen folgen überwiegend der Raumlufttemperatur. Die Temperatur zwischen Schaumglasschotter und Kiesbett (AOFL) wird weitgehend von der Temperatur im Erdreich bestimmt.

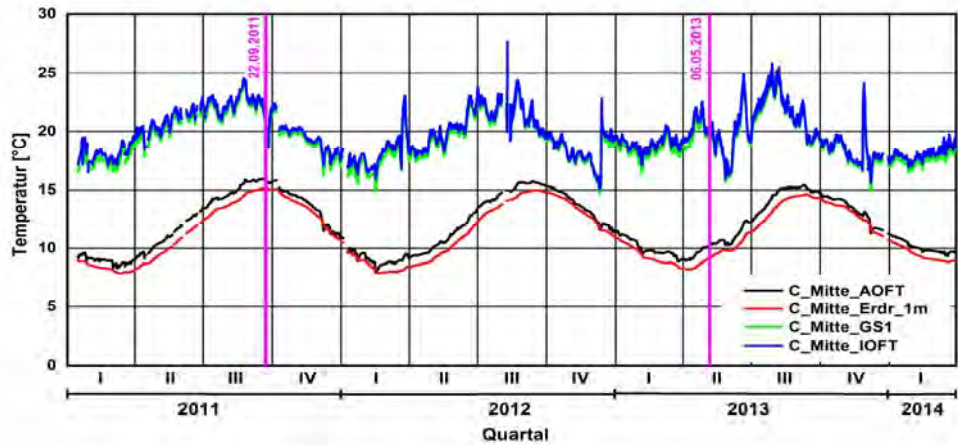


Bild 38:
Verlauf der Innenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Bodenplatte und Schaumglasschotterdämmung (GS1), der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Erdreich) sowie der Erdreichtemperatur in 1m Tiefe in der Mitte der Bodenplatte vom 01. Januar 2011 bis 31. März 2014 für Material C. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

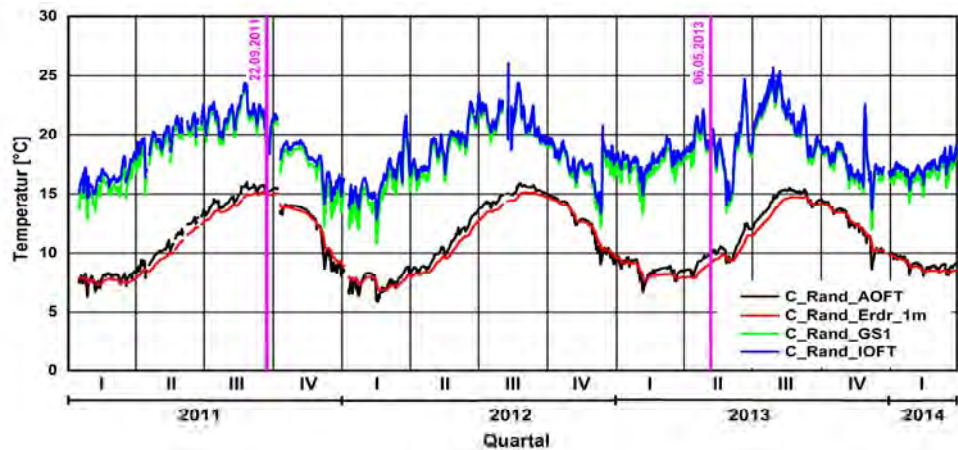


Bild 39:
Verlauf der Innenoberflächentemperatur (IOFT), der Grenzschichttemperatur zwischen Bodenplatte und Schaumglasschotterdämmung (GS1), der Außenoberflächentemperatur (AOFT, zwischen Schaumglasschotter und Erdreich) sowie der Erdreichtemperatur in 1m Tiefe am Randbereich (Frostschirm) der Bodenplatte vom 01. Januar 2011 bis 31. März 2014 für Material C. Die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert.

Der Verlauf der Wärmeströme für den Randbereich und in der Mitte der Bodenplatte während der Untersuchungen am Material C ist im folgenden Bild dargestellt. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probennahmen sind farbig markiert. Die Wärmeströme schwanken jahreszeitlich bedingt. Es zeigt sich deutlich ein stärkerer Einfluss der Außenklimabedingungen an der Messstelle im Randbereich gegenüber der Messstelle in der Mit-

te der Bodenplatte. Es sind bei Regenereignissen temporäre Wärmeverluste im Randbereich zu verzeichnen. Der Einfluss des Regens ist sehr deutlich ausgeprägt. Auch im Bereich der Mitte der Bodenplatte, der ja durch die Bodenplatte selbst und durch das sich darüber befindliche Versuchshaus vor einem direkten Regeneintrag geschützt ist, ist ein deutlicher Einfluss des Außenklimas, vor allem bei Regenereignissen, festzustellen.

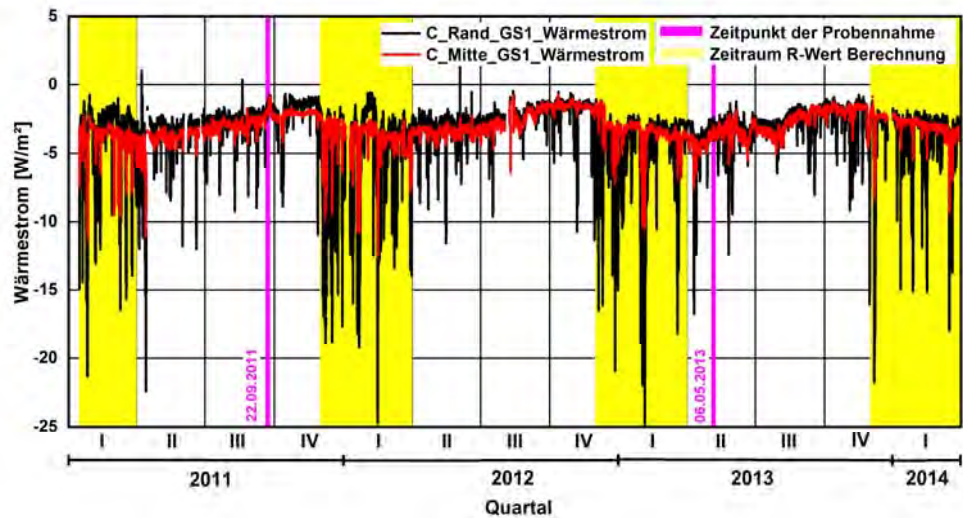


Bild 40:

Verlauf der Wärmeströme für den Randbereich und in der Mitte der Bodenplatte vom 1. Januar 2011 bis 31. März 2014 für Material C. Die Zeiträume zur Berechnung der R-Werte und die Zeitpunkte der Probennahmen sind farblich markiert.

In den folgenden Tabellen sind die über die einzelnen Bewertungszeiträume gemittelten Messwerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) sowie die sich daraus berechnenden Wärmedurchlasswiderstände (R-Wert) für die Messstellen im Randbereich und in der Mitte der Bodenplatte am Material C aufgeführt. Die R-Werte des Randbereiches sind deutlich niedriger als die R-Werte für die Messstelle in der Mitte der Bodenplatte. Dies ist sicherlich auf den stärkeren Einfluss des Außenklimas, vor allem von Regenereignissen und dem damit verbundenen Wärmeverlusten, zurück zu führen.

Tabelle 9:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 15.01.2011 bis zum 31.03.2011 für Material C.

Material C Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,26	8,60	-3,80
Rand	2,00	7,80	-3,89
Mittlere Außenlufttemperatur 1,2 °C, Niederschlagsmenge 118 mm			

Tabelle 10:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.12.2011 bis zum 31.03.2012 für Material C.

Material C Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,04	7,78	-3,82
Rand	1,42	7,04	-4,94
Mittlere Außenlufttemperatur 0,4 °C, Niederschlagsmenge 252 mm			

Tabelle 11:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.12.2012 bis zum 31.03.2013 für Material C.

Material C Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,27	7,71	-3,40
Rand	1,79	7,88	-4,40
Mittlere Außenlufttemperatur 0,9 °C, Niederschlagsmenge 307 mm			

Tabelle 12:

Zusammenstellung der gemessenen Durchschnittswerte der Wärmeströme und der Temperaturdifferenzen (zwischen GS1 und AOFL) und der daraus berechneten Wärmedurchlasswiderstände im Zeitraum vom 01.12.2013 bis zum 31.03.2014 für Material C.

Material C Messstelle	R-Wert [m ² K/W]	Temperaturdifferenz [K]	Wärmestromdichte [W/m ²]
Mitte	2,34	7,02	-3,00
Rand	1,92	7,18	-3,74
Mittlere Außenlufttemperatur 2,6 °C, Niederschlagsmenge 117 mm			

2.3.3 Instationäre hygrothermische Berechnungen zu der Perimeterdämmung der Kellerwand der Versuchshalle

Das instationäre hygrothermische Verhalten der Dämmstoffvarianten der Materialien A und B bei ihrem Einsatz als Perimeterdämmung an der Kellerwand der Versuchshalle in Holzkirchen wird rechnerisch nachvollzogen. Dazu werden die auf der Basis der Materialproben ermittelten Stoffkennwerte verwendet. Die Rechenergebnisse werden mit den Messergebnissen verglichen.

2.3.3.1 Durchführung der Berechnungen

Mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten und vielfach verifizierten Verfahrens zur Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen (WUFI® Pro) [1] wird exemplarisch das hygrothermische Verhalten des Wandaufbaus in ca. 1 m Tiefe untersucht. Dies entspricht der Messstelle „Mitte“ in Bild 2. Diese Tiefe wird für die Berechnungen gewählt, da von dort die Materialproben für die Bestimmung eines Teils der für die Berechnungen verwendeten Feuchtekenwerte stammen.

Der Wandaufbau wird gemäß Bild 41 (Material A) und Bild 42 (Material B) in das Programm implementiert. Es werden u.a. die Wärmestromdichten und die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen der Betonwand und den Dämmstoffen, die Temperaturen an der Außenoberfläche der Dämmstoffe und der Wassergehalt der Dämmstoffe ermittelt und ausgewertet.



Bild 41:
Schematischer Wandaufbau der Kellerwand mit Perimeterdämmung des Materials A in 1 m Tiefe.

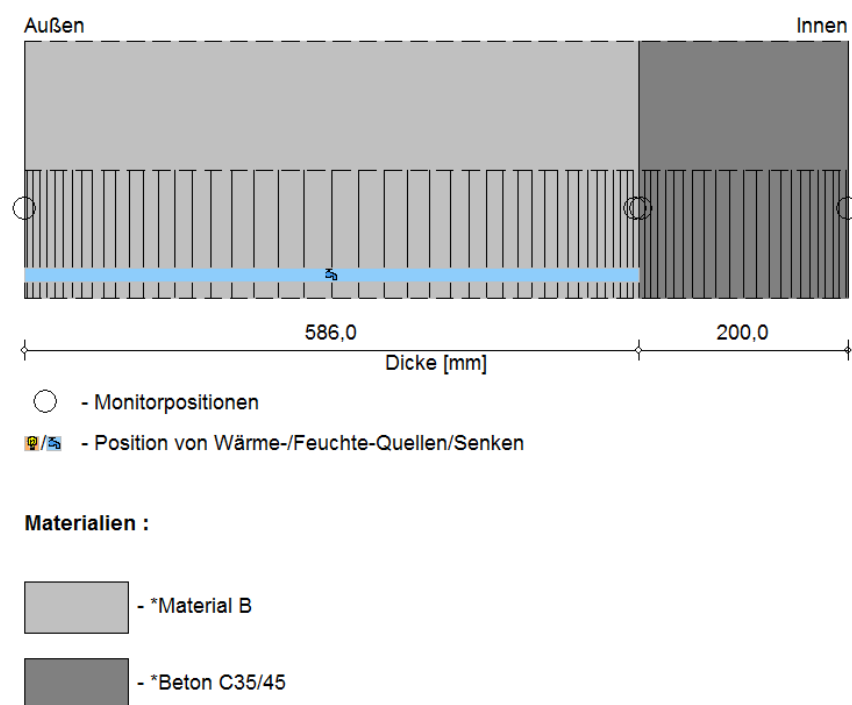


Bild 42:
Schematischer Wandaufbau der Kellerwand mit Perimeterdämmung des Materials B in 1 m Tiefe.

Die Berechnungen erfolgen für den Zeitraum 16.07.2010 bis zum 01.12.2012 in Ein-Stunden-Schritten. Dadurch wird das hygrothermische Verhalten ab Einbau des Materials im Sommer 2010 bis einschließlich der zweiten Probenahme im Herbst 2012 simuliert.

Als äußere Randbedingung für die Berechnungen dienen die in dieser Tiefe ab dem Einbauzeitraum gemessenen Temperaturen im Kiesbett (Bild 43). Die relative Feuchte wird mit 100 % angesetzt.

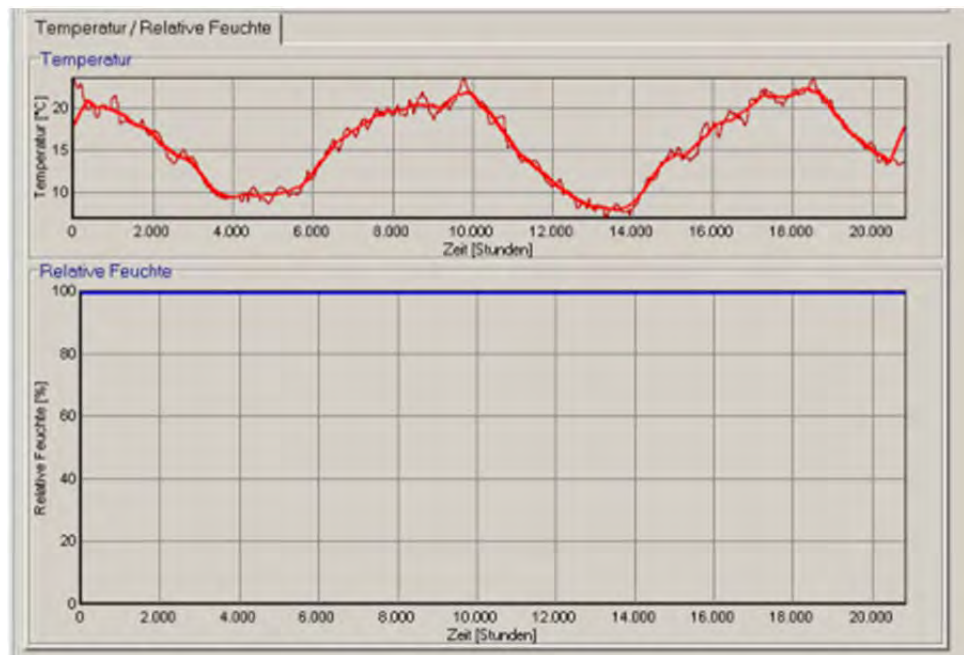


Bild 43:
Außenklimabedingungen in 1 m Tiefe (16.07.2010 – 01.12.2012).

Das für die Berechnungen angesetzte Innenklima setzt sich aus Messwerten für die beiden Messzeiträume (01.11.2010 - 31.03.2011 und 01.11.2011 - 31.03.2012) und aus extrapolierten Werten für die Zeit ohne Messwerte zusammen (Bild 44). Die relative Feuchte wird mit konstant 50 % angesetzt, sie spielt für das hygrothermische Verhalten der Perimeterdämmung keine Rolle.

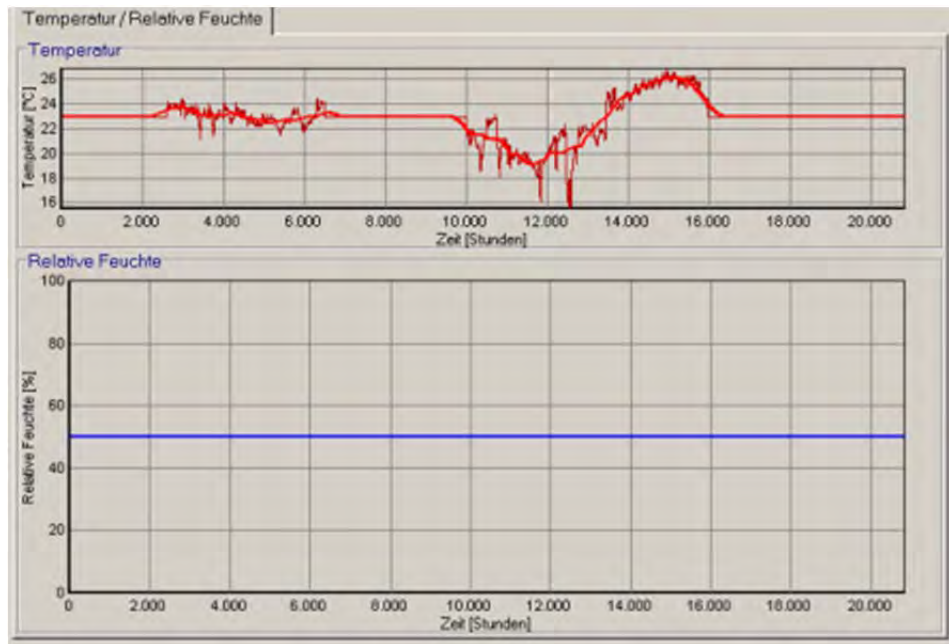


Bild 44: Innenklimabedingungen während des Berechnungszeitraumes (16.07.2010 – 01.12.2012).

Der auf die Bodenoberfläche auftreffende und in den Boden versickernde Regen sowie der an der Fassade ablaufende Schlagregen wird mit Hilfe einer Feuchtequelle im Simulationsprogramm berücksichtigt (Bild 45). Als Basis dienen die Messwerte für Regen der Wetterstation des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik. Das Abfließen des Regens durch das Material wird durch entsprechende Feuchtetransportkoeffizienten realisiert. Das Vorhandensein einer Abdeckfolie bei der Verwendung der Schaumglasschüttung des Materials B wird während der Berechnungen bei der Regenmenge berücksichtigt.

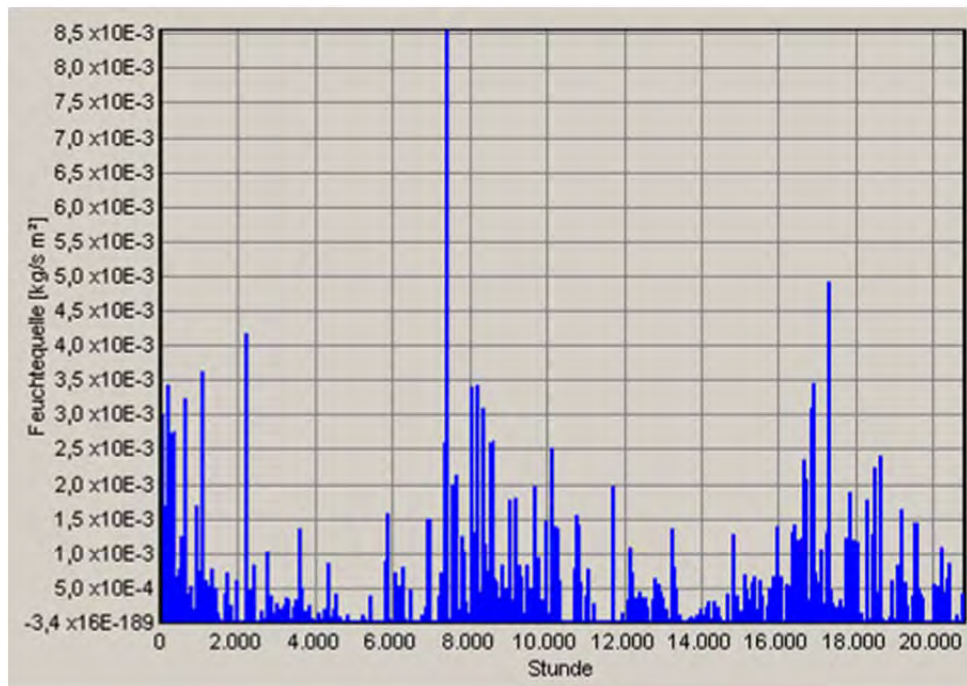


Bild 45:
Zeitlicher Verlauf des Feuchteeintrages durch Regen während des Berechnungszeitraumes (16.07.2010 – 01.12.2012).

Der angesetzte außenseitige Wärmeübergangswiderstand beträgt $0,0001 \text{ m}^2\text{K/W}$ für Erdreich mit gutem, thermischem Kontakt und der Wärmeübergangswiderstand der Innenoberfläche entsprechend DIN 4108-4 $0,125 \text{ m}^2\text{K/W}$. Die Berechnungen werden in der Regel unter Berücksichtigung von Latentwärmeeffekten durchgeführt.

Die Materialkennwerte werden aus der WUFI® Pro-Materialdatenbank entnommen und mit den Daten aus den Datenblättern der Materialien A und B abgeglichen. Im Rahmen dieses Projektes ermittelte Stoffkennwerte werden berücksichtigt. Dies sind u.a. die in Tabelle 13 aufgeführten feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten, welche im Plattenapparat an Proben ermittelt worden sind, die dem Messaufbau (Kellerwand) entnommen wurden (siehe Tabelle 26). Ausgehend davon werden die Berechnungen durchgeführt und mit den Messwerten verglichen. Es erfolgt eine schrittweise Optimierung der Simulation.

Tabelle 13:

Für die ersten Berechnungen genutzte, im Plattenapparat gemessene, feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeiten der Schaumglasschüttungen der Materialien A und B.

Feuchtegehalte [Vol.-%]	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	
	Material A	Material B
Lieferzustand	0,0920	0,0902
10,2 %	0,166	0,142
11,0 %	-	0,150
11,2 %	0,165	-

2.3.3.2 Ergebnisse der instationären Berechnungen

In Bild 46 sind die mit den Wärmeleitfähigkeiten aus Tabelle 13 berechneten Wärmestromdichten für den Dämmstoff des Materials A an der Grenzschicht zwischen dem Dämmstoff und der Betonwand im Vergleich zu den Messwerten aus dem Freilandversuch während der zwei Messzeiträume dargestellt.



Bild 46: Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material A während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten.

Die Berechnungsergebnisse für die Wärmestromdichten liegen überwiegend über den gemessenen Werten.

Für die Berechnung des R-Wertes ist jedoch zusätzlich die Temperaturdifferenz notwendig. Die sich aus den Berechnungsergebnissen ergebenden Temperaturdifferenzen zwischen der Temperatur an der Grenzschicht zwischen Dämmstoff und Betonwand und der Außenoberfläche des Dämmstoffes sind in Bild 47 zu sehen.



Bild 47:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen an dem Material A während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten.

Auch die berechneten Temperaturdifferenzen liegen nahezu während der gesamten Dauer über den gemessenen Werten.

Die sich aus den berechneten mittleren Wärmestromdichten und mittleren Temperaturdifferenzen ergebenden mittleren R-Werte jeweils für die beiden Messzeiträume sind in Tabelle 14 aufgeführt. Zum besseren Vergleich sind die aus den Messwerten ermittelten R-Werte (siehe Kapitel 2.3.1.2) ebenfalls mitaufgeführt. Die berechneten R-Werte liegen in beiden Messzeiträumen über den gemessenen R-Werten.

Tabelle 14:

Zusammenstellung der mit den Werten aus Tabelle 13 berechneten und der gemessenen Durchschnittswerte der R-Werte der Kellerwanddämmung bei der Dämmvariante mit dem Material A.

Material A	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperaturdifferenz [K]	berechnete Wärmestromdichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	1,52	2,70	10,5	-4,3
2. Messzeitraum	1,45	2,30	10,3	-5,0

In den folgenden Bildern sind die berechneten Wärmestromdichten und Temperaturdifferenzen (analog zu den vorangegangenen Bildern) für den Dämmstoff des Materials B aufbereitet.



Bild 48:

Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material B während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten.

Die berechneten Wärmestromdichten liegen auch hier deutlich über den gemessenen Werten. Auch die berechneten Temperaturdifferenzen liegen überwiegend über den gemessenen Werten.



Bild 49:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen an dem Material B während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten.

In Tabelle 15 sind die sich aus den berechneten und den gemessenen mittleren Wärmestromdichten und mittleren Temperaturdifferenzen ergebenden mittleren R-Werte jeweils für die beiden Messzeiträume (siehe Kapitel 0) aufgelistet. Die berechneten R-Werte liegen in beiden Messzeiträumen deutlich über den gemessenen R-Werten.

Tabelle 15:
Zusammenstellung der mit den Werten aus Tabelle 13 berechneten und der gemessenen Durchschnittswerte der R-Werte der Kellerwanddämmung bei der Dämmvariante mit dem Material B.

Material B	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperaturdifferenz [K]	berechnete Wärmestromdichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	1,48	3,87	12,5	-3,25
2. Messzeitraum	1,37	3,71	12,2	-3,3

Die berechneten R-Werte sowohl für die Varianten der Kellerwanddämmung mit dem Material A als auch mit dem Material B liegen deutlich über den gemessenen R-Werten. Einen Einfluss auf den R-Wert haben sicherlich Latentwärmeeffekte. Um beurteilen zu können, wie groß dieser Einfluss überhaupt ist, wird exemplarisch eine zusätzliche Berechnung durchgeführt, bei denen die Latentwärmeeffekte **nicht** berücksichtigt werden. Die damit berechneten Durchschnittswerte für die R-Werte der Kellerwanddämmung mit dem Material B liegen für den ersten Messzeitraum bei 4,25 m²K/W und für den zweiten

Messzeitraum bei $4,05 \text{ m}^2\text{K/W}$. Sie sind damit, wie es zu erwarten ist, noch höher im Vergleich zu den Berechnungen mit Berücksichtigung der Latentwärmeeffekte (Tabelle 15). Der Unterschied zwischen den berechneten R-Werten mit und ohne Berücksichtigung der Latentwärmeeffekte liegt bei ca. 9 %. Dies zeigt, dass in der Anwendung als Kellerdämmung die Dämmwirkung durch Latentwärmeeffekte verschlechtert wird, allerdings nicht in dem Maße, dass damit die gemessenen, deutlich niedrigeren R-Werte, erklärt werden könnten.

Es wird vermutet, dass es eventuell zu einem Luftaustausch mit der Außenluft entlang der Bestandswand kommt. Deshalb werden Berechnungen mit einem Luftspalt zwischen der Dämmung und der Betonwand durchgeführt. In diesem Luftspalt wird ein Luftwechsel von 10 1/h angesetzt. Die Berechnungen ergeben jedoch größere R-Werte als ohne diesen Luftspalt und den Luftwechsel.

Da die berechneten und gemessenen R-Werte deutlich voneinander abweichen (siehe Tabelle 14 und Tabelle 15), werden weitere Berechnungen mit den Werten für die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit für die Schaumglasschüttungen aus den Materialien A und B, welche sich aus den aus den Freilandmessungen ermittelten R-Werten aus den Dämmstoffdicken und den Übergangskoeffizienten ergeben, durchgeführt. Diese Wärmeleitfähigkeiten liegen bei $0,31 \text{ W/m K}$ für das Material A und bei $0,43 \text{ W/m K}$ für das Material B bei jeweils im Mittel 10 Vol. % Wassergehalt und bei einer Einbautiefe von ca. 1 m. Da die sich aus diesen Berechnungen ergebenden R-Werte jedoch noch immer etwas höher als die gemessenen R-Werte sind, wird in einem weiteren Schritt zusätzlich die Wärmeleitfähigkeit von Wasser als Maximalwert der Wärmeleitfähigkeit bei freier Wassersättigung angesetzt. Erst durch diese insgesamt deutlich erhöhte feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit werden bei den Berechnungen die gemessenen R-Werte erreicht (siehe Tabelle 16 und Tabelle 17). Die folgenden Bilder zeigen analog zu Bild 46 bis Bild 49 die berechneten Wärmestromdichten und Temperaturdifferenzen der Materialien A und B. Es zeigt sich, dass durch die Anpassung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten eine bessere Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Berechnungsergebnissen erzielt wird.



Bild 50:
Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material A während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit gemessener und angepasster feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit.

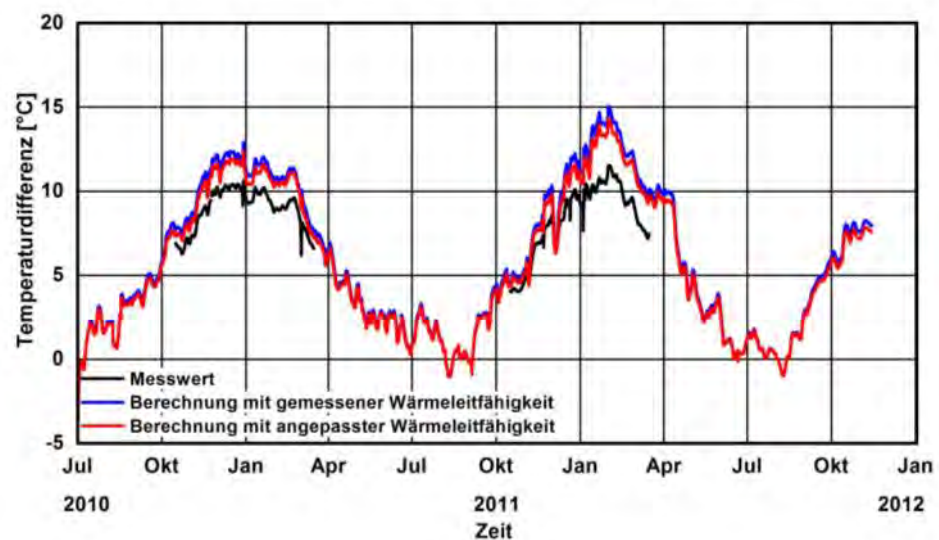


Bild 51:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen an dem Material A während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit gemessener und angepasster feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit.

Tabelle 16:

Zusammenstellung der Durchschnittswerte der R-Werte der Kellerwanddämmung aus dem Material A, berechnet mit aus den Freilandmessungen angepassten Werten für die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit.

Material A	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperatur-differenz [K]	berechnete Wärmestrom-dichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	1,52	1,67	10,1	-6,6
2. Messzeitraum	1,45	1,39	9,8	-7,6

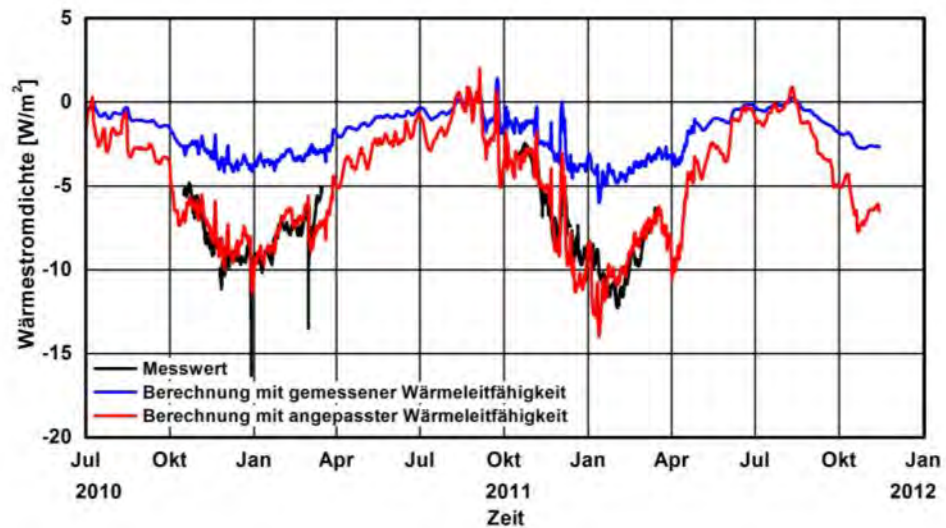


Bild 52:

Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material A während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit gemessener und angepasster feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit.

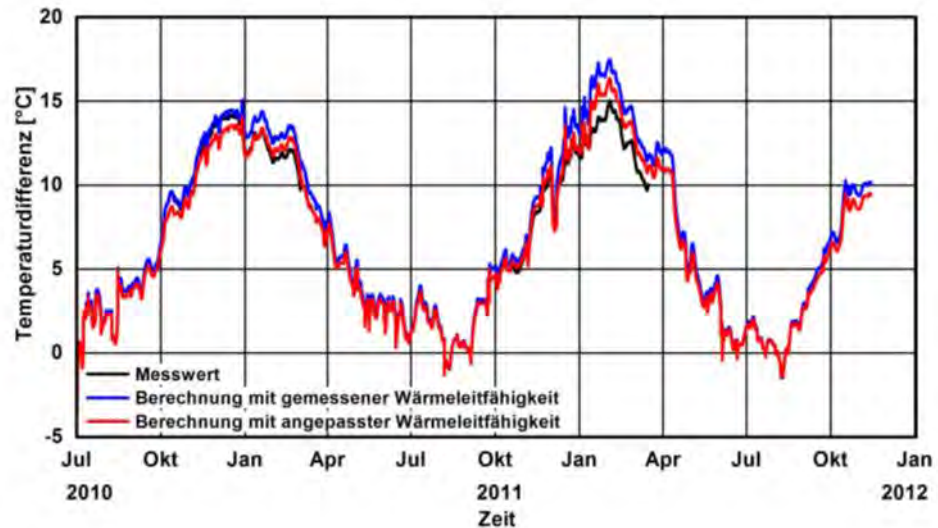


Bild 53:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen an dem Material B während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit gemessener und angepasster feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit.

Tabelle 17:
Zusammenstellung der Durchschnittswerte der R-Werte der Kellerwanddämmung aus dem Material B, berechnet mit aus den Freilandmessungen angepassten Werten für die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit.

Material B	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperaturdifferenz [K]	berechnete Wärmestromdichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	1,48	1,53	11,7	-7,8
2. Messzeitraum	1,37	1,43	11,3	-8,0

2.3.3.3 Diskussion und Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

Ziel der Berechnungen ist es, das instationäre hygrothermische Verhalten der Dämmstoffvarianten aus den Materialien A und B bei ihrem Einsatz als Perimeterdämmung an der Kellerwand der Versuchshalle in Holzkirchen rechnerisch nachzuvollziehen.

Die Dämmung an der Kellerwand ist verschiedenen Feuchtequellen ausgesetzt: Zum einen gelangt an der Fassade ablaufender Schlagregen in die Dämmung, zum anderen dringt Regenwasser über die Oberfläche in den Boden und damit in die Dämmung ein und es gelangt Feuchtigkeit und Regenwasser aus dem

Erdreich in die Dämmung. Um die, durch Regen und an der Fassade ablaufenden Schlagregen in die Dämmung gelangende Feuchtigkeit zu minimieren, wird bei Verwendung des Dämmstoffes des Materials B eine Teichfolie zum Schutz eingesetzt. Die aus dem Erdreich in den Dämmbereich eindringende Feuchtigkeit kann damit jedoch nicht unterbunden werden. Das Material hat innerhalb der ersten Zentimeter am Erdreich Drainagewirkung. Dadurch ist die Dämmwirkung in diesem Bereich reduziert. Es wurde versucht, diese Bedingungen bei den Berechnungen zu berücksichtigen. Dennoch konnten die Messergebnisse der Freilanduntersuchungen bei Verwendung der auf der Basis der Materialproben ermittelten Stoffkennwerte rechnerisch nicht nachvollzogen werden. Die damit berechneten R-Werte sind deutlich größer als die gemessenen R-Werte.

Berechnungen mit einem Luftspalt zwischen Außenwand und Dämmung und einem Luftwechsel mit der Außenluft entlang der Bestandswand führen zu einem höheren R-Wert. Ein Austausch mit der Außenluft hätte somit eine gewisse Trocknungswirkung und würde die Dämmwirkung verbessern.

Berechnungen ohne Latentwärmeeffekt zeigen einen Einfluss von ca. 9 %. Der Latentwärmeeffekt ist somit nicht zu vernachlässigen. Jedoch auch mit Berücksichtigung dieses Effektes sind die mit den aus den Materialproben ermittelten Stoffkennwerten berechneten R-Werte zu groß.

Die Möglichkeit, dass durch die Probennahme, den Transport und die Messung der Proben eine Verfälschung der Messwerte für die Stoffkennwerte erfolgt sein könnte, ist nicht gegeben. Zwar sinkt der Wasseranteil in den Proben während dieser Prozesse zwangsläufig trotz umfassender Vorkehrungen, wie z.B. zügige Probennahme, sorgfältiges Verpacken, zeitnahes Bestimmen der Kennwerte, jedoch sind die Stoffkennwerte (feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit) eindeutig dem Wassergehalt der Probe zuzuordnen, da beide nahezu zeitgleich bestimmt werden.

Werden die, mit Hilfe der Probennahmen bestimmten, feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten bei den WUFI® Pro-Berechnungen verwendet, ergeben sich deutlich größere R-Werte als die, die sich bei den Freilanduntersuchungen zeigen. Die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien A und B, die sich rechnerisch aus den Messergebnissen der Freilanduntersuchungen ergeben, sind mehr als doppelt so groß wie die feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten, die aus den entnommenen Proben bestimmt werden. Dies deutet daraufhin, dass noch andere Prozesse eine Rolle spielen, die zu einem erhöhten Wärmefluss (und damit zu einer erhöhten "Wärmeleitfähigkeit") führen. Allein aus den Eigenschaften des Materials lassen sich die hohen Wärmeflüsse nicht erklären. Es wird vermutet, dass so viel Wasser im Dämmmaterial bzw. zwischen den Dämmstoffbruchstücken vorhanden ist, dass innerhalb des Wassers Konvektion stattfindet. Des Weiteren erfolgt eine zusätzliche Wärmeabfuhr durch das Durchlaufen des eingetragenen Regenwassers. Hinzu kommt als zusätzlicher Effekt eine Eigenkonvektion der Luft, da für diesen Fall während der Heizperiode die Temperaturen zumeist nach unten zunehmen. Ein Aufsteigen der wärmeren Luftschicht wird

damit zu einer Konvektion führen, die ebenfalls die Gesamtdämmleistung reduziert.

Berechnungen unter Berücksichtigung von Konvektion im Material lassen sich mit WUFI® Pro nicht durchführen. Diesem Effekt wird deshalb dadurch Rechnung getragen, indem bei den Berechnungen die Wärmeleitfähigkeit erhöht wird. Damit erklären sich die für die Berechnungen angesetzten deutlich erhöhten feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten gegenüber den im Labor bestimmten Werten.

Des Weiteren wird bei den Untersuchungen ein Effekt beobachtet, der darauf hindeutet, dass die Feuchtigkeit tiefer in das Material eindringt. Bei den aus dem Freilandversuch entnommenen Proben ist die Trocknungsdauer erhöht (gegenüber z.B. Proben nach 28 Tagen Unterwasserlagerung).

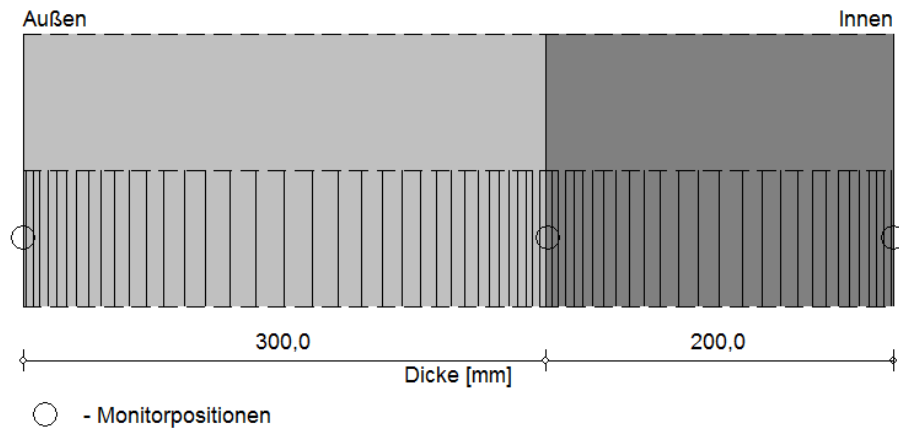
2.3.4 Instationäre hygrothermische Berechnungen zu der Wärmedämmung der Bodenplatte des Versuchshauses

Das instationäre hygrothermische Verhalten der Dämmstoffvarianten der Materialien B und C bei ihrem Einsatz als Dämmung unter der Bodenplatte des Versuchsgebäudes in Holzkirchen wird rechnerisch nachvollzogen. Dazu werden die auf der Basis der Materialproben ermittelten Stoffkennwerte verwendet. Die Rechenergebnisse werden mit den Messergebnissen verglichen.

2.3.4.1 Durchführung der Berechnungen

Analog zu 2.3.3 wird mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP entwickelten Verfahrens zur Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen (WUFI® Pro) exemplarisch das hygrothermische Verhalten des Bodenaufbaus in der Mitte der Bodenplatte bis in ca. 0,5 m Tiefe ab Oberkante Bodenplatte untersucht.

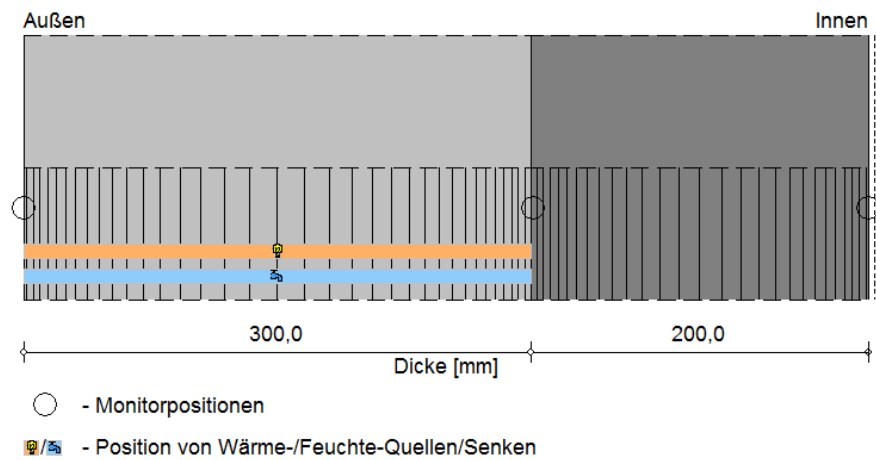
Der Wandaufbau wird gemäß Bild 54 (Material B) und Bild 55 (Material C) in das Programm implementiert. Es werden u.a. die Wärmestromdichten und die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen der Betonbodenplatte und den Dämmstoffen, die Temperaturen an der Außenoberfläche der Dämmstoffe und der Wassergehalt der Dämmstoffe ermittelt und ausgewertet.



Materialien :

- *Material B
- *Beton W/Z=0.5

Bild 54:
Schematischer Wandaufbau der Bodenplatte mit dem Dämmmaterial des Materials B.



Materialien :

- *Material C
- *Beton W/Z=0.5

Bild 55:
Schematischer Wandaufbau der Bodenplatte mit dem Dämmmaterial des Materials C.

Die Berechnungen erfolgen für den Zeitraum 01.12.2011 bis zum 31.03.2014 in Ein-Stunden-Schritten. Dadurch wird das hygrothermische Verhalten ab Einbau des Materials im Herbst 2011 bis zum Ende des um einen Winter verlängerten Untersuchungszeitraumes im Frühjahr 2014 simuliert.

Als äußere Randbedingung für die Berechnungen dienen die in einer Tiefe von 0,5 m ab dem Einbauzeitraum gemessenen Temperaturen im Erdreich (Bild 56). Die relative Feuchte wird mit 100 % angesetzt.

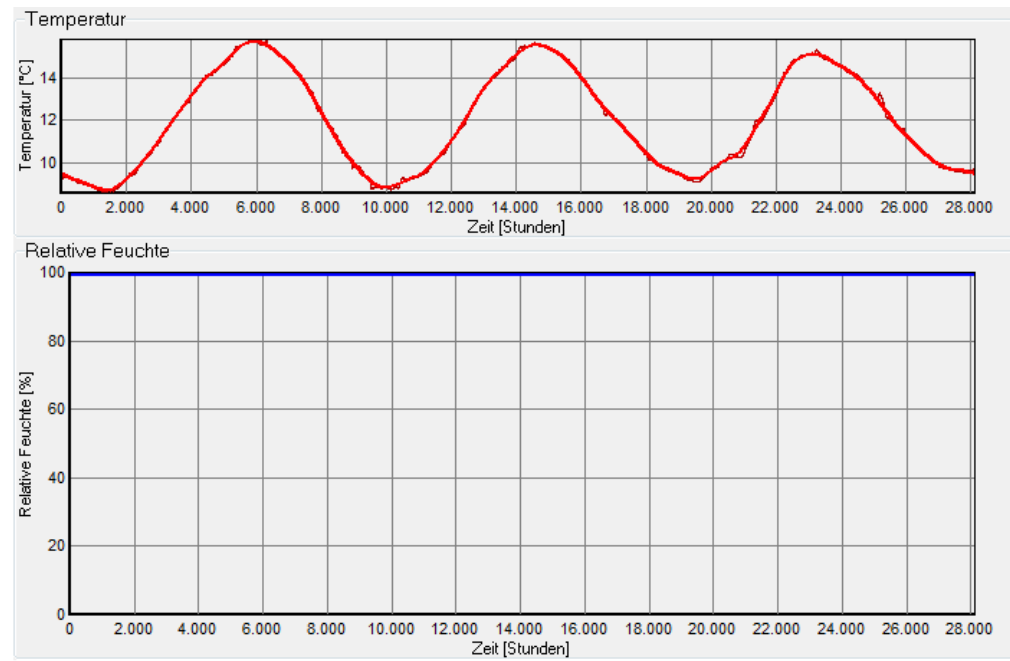


Bild 56:
Außenklimabedingungen in 0,5 m Tiefe (01.12.2011 - 31.03.2014).

Die Innenklimabedingungen, welche für die Berechnungen verwendet werden, sind in Bild 57 dargestellt. Sie beruhen auf den Messwerten für die Raumlufttemperatur und die relative Raumluftfeuchte im Innenraum des Versuchsgebäudes während des Untersuchungszeitraumes.

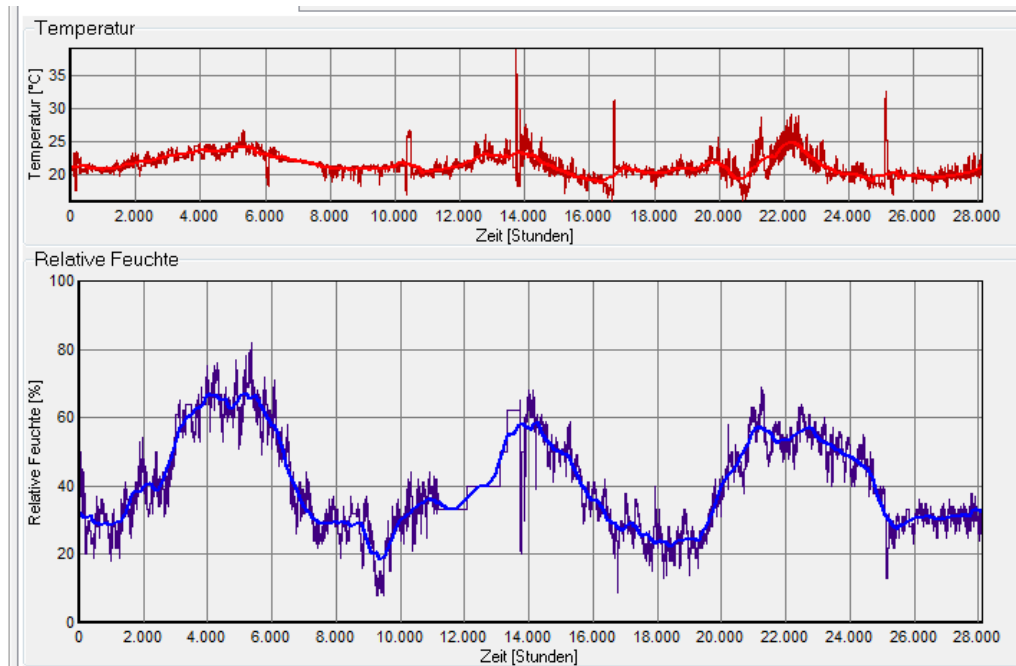


Bild 57:
Innenklimabedingungen während des Berechnungszeitraumes (01.12.2011 - 31.03.2014).

Da die Berechnungen für den Bereich der Mitte der Bodenplatte durchgeführt werden, wird davon ausgegangen, dass kein Regen direkt auf die Dämmung auftrifft, da die Bodenplatte und das Gebäude einen direkten Eintrag von Regen verhindern. Wenn Regen in die Dämmung eindringen sollte, dann nur seitwärts über den Frostschirm und über die bodenberührenden Seiten. Deshalb wird bei den Berechnungen kein direkter Regeneintrag über eine Feuchtequelle, wie dies bei der Kellerwand geschehen ist, berücksichtigt. Allerdings hat sich sowohl bei den Berechnungen, als auch bei der Probennahme gezeigt, dass ein Luftwechsel mit der Außenluft vorhanden sein muss. Erst durch den Ansatz eines Luftwechsels mit der Außenluft können, wie im Folgenden gezeigt wird, die Messwerte nachvollzogen werden. Der Ansatz eines Luftwechsels mit der Außenluft bedeutet, dass die Werte für die Außenlufttemperatur als Wärme-(bzw. „Kälte-)quelle und die relative Außenluftfeuchte als Feuchtequelle im Material wirken. Für die Berechnungen werden dafür die Außenklimabedingungen aus Bild 56 angesetzt. Die Auswirkungen der Teichfolie werden über unterschiedliche Luftwechselraten berücksichtigt. Dies ist möglich, da die Materialien der beiden Material durch eine EPS-Platte voneinander getrennt sind. Ausgehend von Berechnungen ohne Luftwechsel wird iterativ die anzusetzende Luftwechselrate bestimmt.

Der angesetzte außenseitige Wärmeübergangswiderstand beträgt $0,0001 \text{ m}^2\text{K/W}$ für Erdreich mit gutem, thermischem Kontakt und der Wärmeübergangswiderstand der Innenoberfläche entsprechend DIN 4108-4 $0,125 \text{ m}^2\text{K/W}$. Die Berechnungen werden unter Berücksichtigung von Latentwärmeeffekten durchgeführt.

Die Materialkennwerte werden aus der WUFI® Pro-Materialdatenbank entnommen und mit den Daten aus den Datenblättern der Materialien B und C abgeglichen. Im Rahmen dieses Projektes ermittelte Stoffkennwerte werden berücksichtigt. Dies sind u.a. die in Tabelle 13 aufgeführten feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten, welche im Plattenapparat an Proben ermittelt worden sind, die dem Messaufbau (Bodenplatte) entnommen worden sind (siehe Tabelle 26). Ausgehend davon werden die Berechnungen durchgeführt und mit den Messwerten verglichen. Es erfolgt eine schrittweise Optimierung der Simulation.

Tabelle 18:

Für die ersten Berechnungen genutzte, im Plattenapparat gemessene, feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeiten der Schaumglasschüttungen der Materialien B und C.

Feuchtegehalte [Vol.-%]	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	
	Material B	Material C
Lieferzustand	0,0902	0,0890
0,3	-	0,101
2,7	0,109	
8,2	-	0,152
15,8	0,165	-

2.3.4.2 Ergebnisse der instationären Berechnungen

In Bild 58 sind die mit den Wärmeleitfähigkeiten aus Tabelle 18 und ohne Berücksichtigung eines Luftwechsels mit der Außenluft berechneten Wärmestromdichten für das Material B an der Grenzschicht zwischen dem Dämmstoff und der Betonplatte im Vergleich zu den Messwerten aus dem Freilandversuch während des Untersuchungszeitraumes dargestellt.

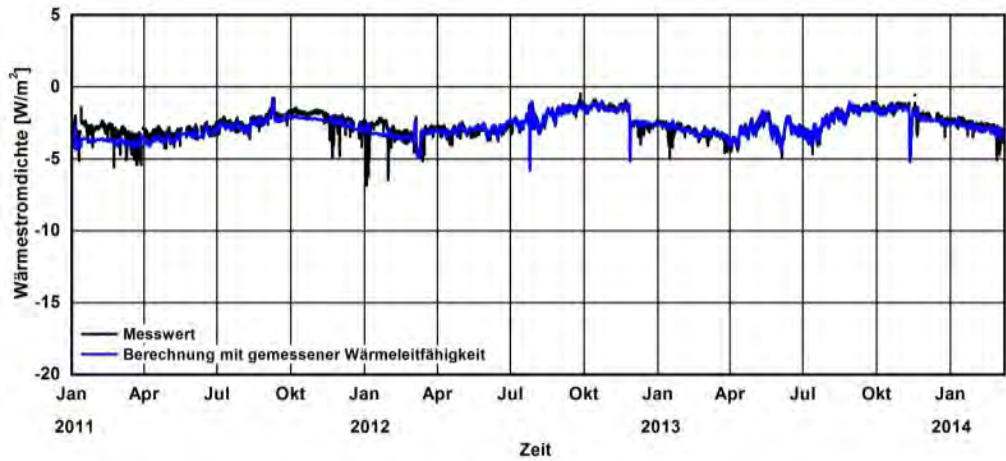


Bild 58:
Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material B während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten, ohne Berücksichtigung einer Luftwechselrate mit der Außenluft.

Die Berechnungsergebnisse für die Wärmestromdichten verlaufen annähernd gleich wie die gemessenen Werte.

Für die Berechnung des R-Wertes ist jedoch zusätzlich die Temperaturdifferenz notwendig. Die sich aus den Berechnungsergebnissen ergebenden Temperaturdifferenzen zwischen der Temperatur an der Grenzschicht zwischen Dämmstoff und Betonplatte und der Außenoberfläche des Dämmstoffes sind in Bild 59 zu sehen.

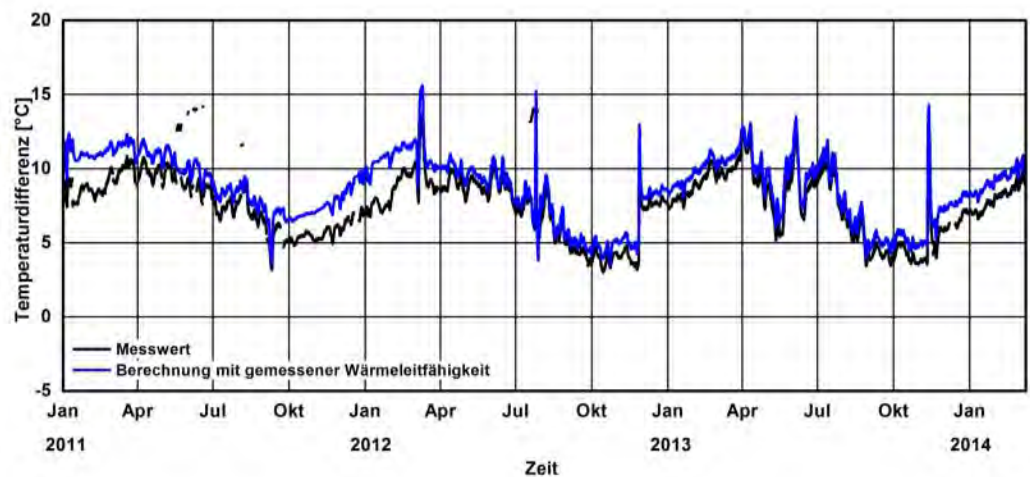


Bild 59:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen am Material B während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten, ohne Berücksichtigung einer Luftwechselrate mit der Außenluft.

Die berechneten Temperaturdifferenzen liegen nahezu während der gesamten Dauer über den gemessenen Werten.

Die sich aus den berechneten mittleren Wärmestromdichten und mittleren Temperaturdifferenzen ergebenden mittleren R-Werte jeweils für die vier Messzeiträume sind in Tabelle 19 aufgeführt. Zum besseren Vergleich sind die aus den Messwerten ermittelten R-Werte (siehe Kapitel 2.3.2.2) ebenfalls mit aufgeführt. Die berechneten R-Werte liegen in allen vier Messzeiträumen etwas über den gemessenen R-Werten.

Tabelle 19:

Zusammenstellung der mit den Werten aus Tabelle 18 berechneten Durchschnittswerte der R-Werte der Bodenplattendämmung mit dem Material B, ohne Berücksichtigung einer Luftwechselrate mit der Außenluft.

Material B	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperaturdifferenz [K]	berechnete Wärmestromdichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	2,89	2,94	11,0	-3,7
2. Messzeitraum	2,68	3,24	10,1	-3,1
3. Messzeitraum	2,91	3,25	8,9	-2,7
4. Messzeitraum	2,93	3,27	8,7	-2,6

In den folgenden Bildern sind die berechneten Wärmestromdichten und Temperaturdifferenzen (analog zu den vorangegangenen Bildern) für das Material C aufbereitet.

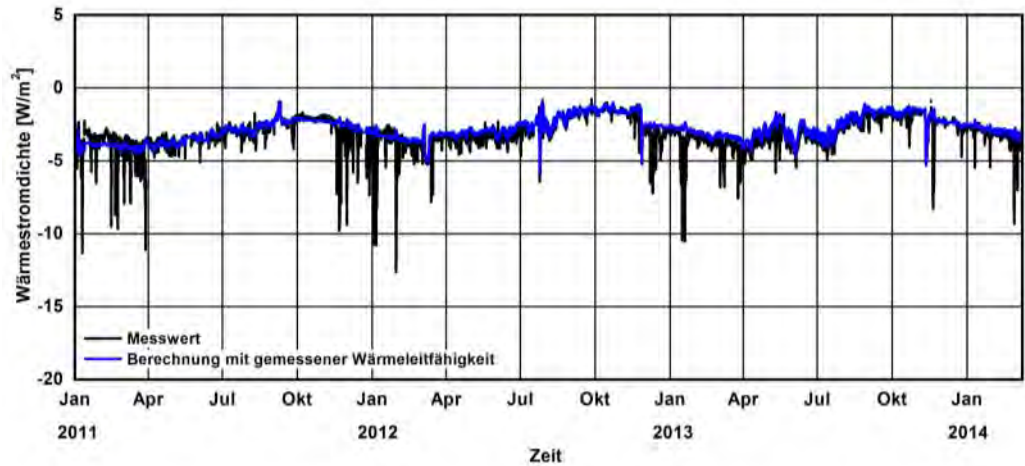


Bild 60:
Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material C während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten, ohne Berücksichtigung einer Luftwechselrate mit der Außenluft.

Die berechneten Wärmestromdichten verlaufen auch hier annähernd gleich wie die gemessenen Werte.

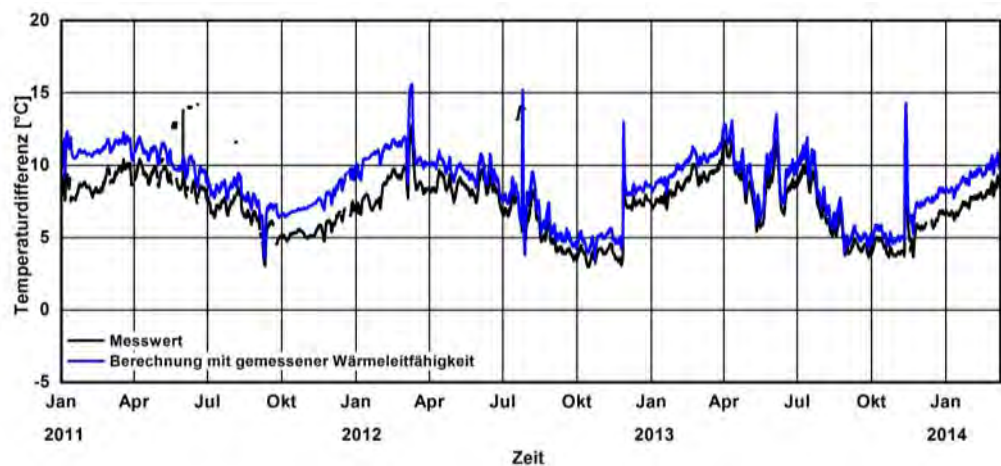


Bild 61:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen an dem Material C während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten, ohne Berücksichtigung einer Luftwechselrate mit der Außenluft.

Die berechneten Temperaturdifferenzen liegen ebenso überwiegend über den gemessenen Werten.

In Tabelle 20 sind die sich aus den berechneten mittleren Wärmestromdichten und mittleren Temperaturdifferenzen ergebenden mittleren R-Werte jeweils für die beiden Messzeiträume (siehe Kapitel 2.3.2.3) aufgelistet. Die berechneten R-Werte liegen in beiden Messzeiträumen deutlich über den gemessenen R-Werten.

Tabelle 20:

Zusammenstellung der mit den Werten aus Tabelle 18 berechneten Durchschnittswerte der R-Werte der Bodenplattendämmung mit dem Material C, ohne Berücksichtigung einer Luftwechselrate mit der Außenluft.

Material C	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperaturdifferenz [K]	berechnete Wärmestromdichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	2,26	2,77	11,0	-4,0
2. Messzeitraum	2,04	3,17	10,1	-3,2
3. Messzeitraum	2,27	3,20	8,9	-2,8
4. Messzeitraum	2,34	3,27	8,6	-2,7

Die berechneten R-Werte sowohl für die Kellerwanddämmung aus dem Material B als auch aus dem Material C liegen zum Teil deutlich über den gemessenen R-Werten.

Beobachtungen während der Probennahmen weisen darauf hin, dass es zu einem Luftaustausch mit der Außenluft durch das Material kommt. Deshalb werden iterativ Berechnungen durchgeführt, die den Luftwechsel mit der Außenluft (Bild 56) mit unterschiedlicher Luftwechselrate berücksichtigen. Wird eine Luftwechselrate von 2 1/h bei Verwendung des Materials B und eine Luftwechselrate von 7 1/h bei Verwendung von Dämmstoff des Materials C bei den Berechnungen angesetzt, dann werden bei den Berechnungen die gemessenen R-Werte annähernd erreicht (siehe Tabelle 21 und Tabelle 22). Die Unterschiede in den Luftwechselraten sind dadurch erklärbar, dass bei Material B eine Teichfolie zur Abdeckung des Frostschirms verwendet wird und somit die Luftwechselrate mit der Außenluft geringer ist. Die folgenden Bilder zeigen analog zu den vorangegangenen Bildern die berechneten Wärmestromdichten und Temperaturdifferenzen der Materialien B und C. Es zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung des Luftwechsels mit der Außenluft eine bessere Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Berechnungsergebnissen erzielt wird.

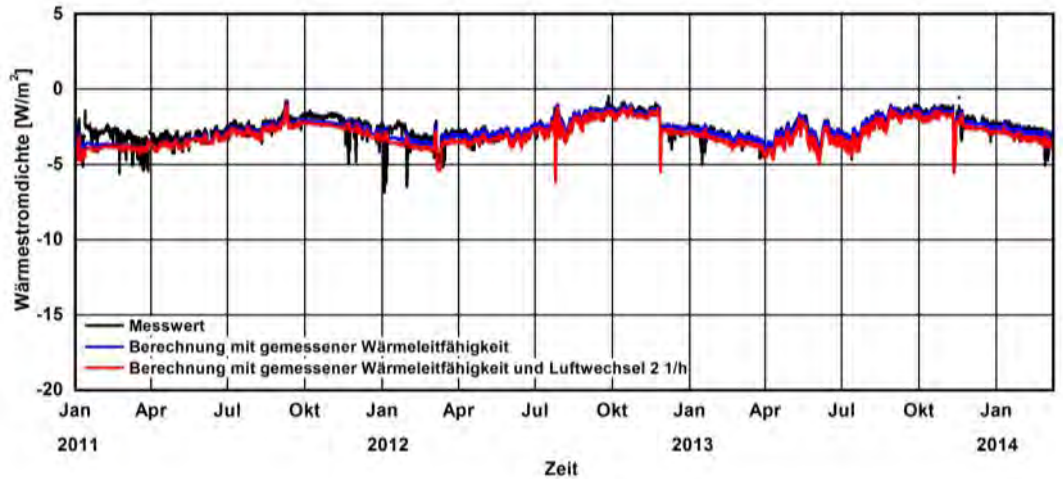


Bild 62:
Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material B während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit einer Luftwechselrate von 2 1/h.

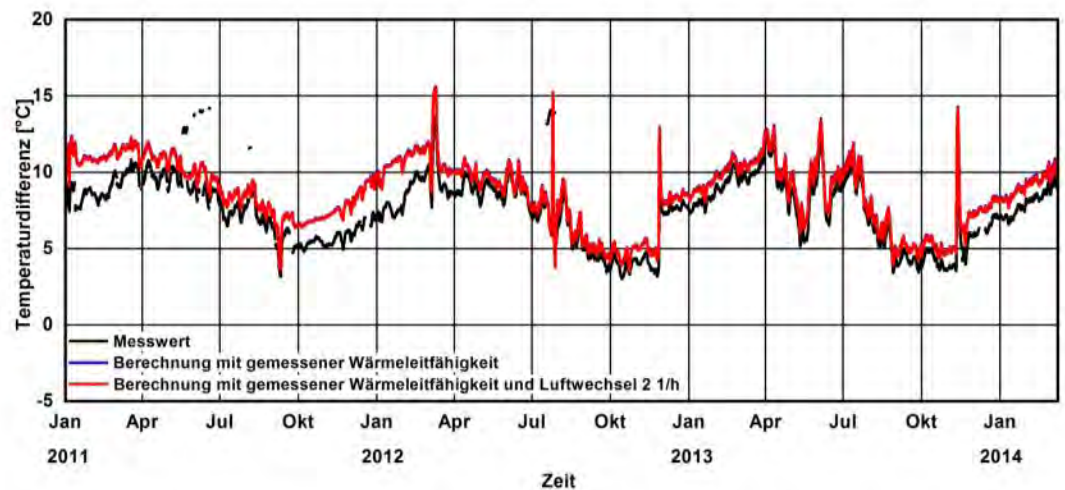


Bild 63:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen an den Materialien B während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit einer Luftwechselrate von 2 1/h.

Tabelle 21:

Zusammenstellung der mit den Werten aus Tabelle 18 berechneten Durchschnittswerte der R-Werte der Bodenplattendämmung aus Material B, mit Berücksichtigung einer Luftwechselrate von 2 1/h mit der Außenluft.

Material B	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperaturdifferenz [K]	berechnete Wärmestromdichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	2,89	2,77	10,9	-3,9
2. Messzeitraum	2,68	2,92	10,0	-3,4
3. Messzeitraum	2,91	2,89	8,8	-3,1
4. Messzeitraum	2,93	2,88	8,5	-3,0

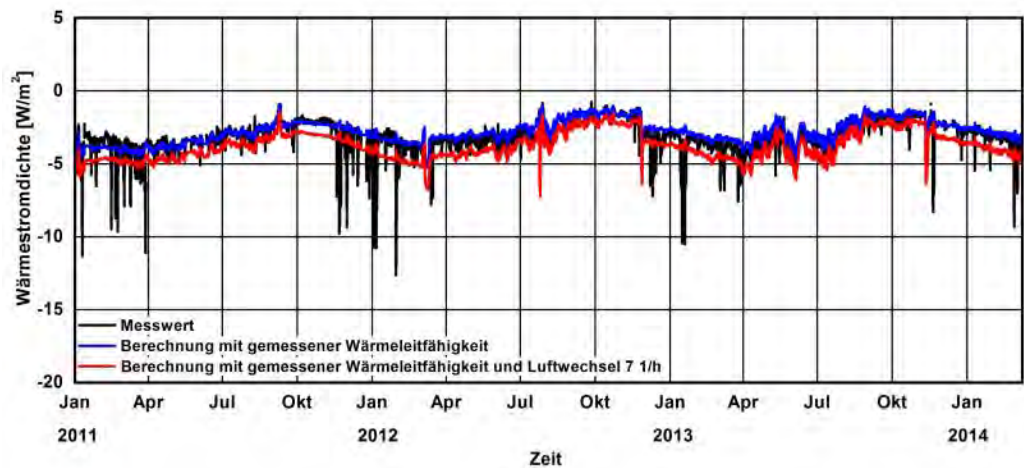


Bild 64:

Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte durch das Material C während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit einer Luftwechselrate von 7 1/h.

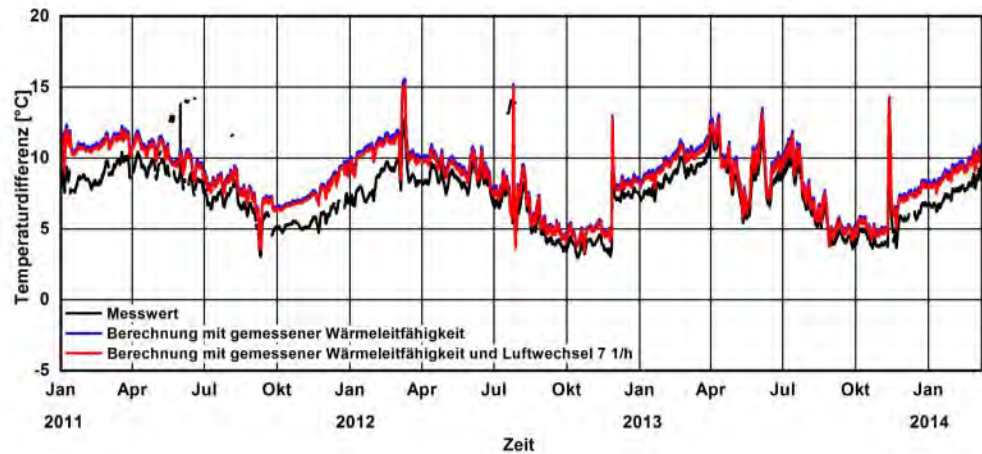


Bild 65:
Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenzen am Material C während des Berechnungszeitraumes im Vergleich zu den Messwerten; Berechnungen mit einer Luftwechselrate von 7 1/h.

Tabelle 22:
Zusammenstellung der mit den Werten aus Tabelle 18 berechneten Durchschnittswerte der R-Werte der Bodenplattendämmung aus Materials C, mit Berücksichtigung einer Luftwechselrate von 7 1/h mit der Außenluft.

Material C	gemessene R-Werte [m ² K/W]	berechnete R-Werte [m ² K/W]	berechnete Temperaturdifferenz [K]	berechnete Wärmestromdichte [W/m ²]
1. Messzeitraum	2,26	2,22	10,7	-4,8
2. Messzeitraum	2,04	2,27	9,8	-4,3
3. Messzeitraum	2,27	2,25	8,7	-3,9
4. Messzeitraum	2,34	2,24	8,3	-3,7

2.3.4.3 Diskussion und Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

Ziel der Berechnungen ist es, das instationäre hygrothermische Verhalten der Dämmstoffvarianten B und C bei ihrem Einsatz als Dämmung unter einer Bodenplatte eines Versuchsgebäudes in Holzkirchen rechnerisch nachzuvollziehen. Wie die Berechnungsergebnisse zeigen, werden die gemessenen R-Werte nur erreicht, wenn ein gewisser Luftaustausch mit der Außenluft, also eine Durchströmung des Dämmmaterials mit Außenluft, bei den Berechnungen berücksichtigt wird. Durch diesen Luftaustausch reduziert sich im Winter die Dämmwirkung, da angewärmte Luft unter der Bodenplatte „weggeblasen“ wird. Zu-

gleich wird Feuchtigkeit in das Material eingetragen. Ob dieser Luftaustausch bei einem größeren Gebäude geringer wäre, ist offen. Die Berechnungen zeigen, dass für den Fall des Versuchshauses der Einsatz der Teichfolie als Abdeckung der Frostschräge von Vorteil ist, da dadurch die Luftwechselrate geringer und die R-Werte größer sind. Die windgetriebene Durchströmung durch das Dämmmaterial wird durch den Einsatz der Teichfolie reduziert. Zugleich wird der Feuchteintrag durch Regen in das Material der Frostschräge reduziert.

2.4 Anschaffung von Geräten und Ausrüstungen

Im Kalenderjahr 2010 wurden Investitionen in Höhe von € 2.172,84 gemäß Anlage 1 getätigt.

2.5 Laborversuche

2.5.1 Versuche an den Schaumglasschotterproben im Lieferzustand

Von den drei in den Forschungshäusern eingebauten Schaumglasschottern wurden auf der Baustelle Proben für die Untersuchung im Labor zurückgestellt. An diesen Proben wurden im Wesentlichen gemäß der jeweiligen Zulassung die physikalischen und wärmetechnischen Eigenschaften im „Lieferzustand“ ermittelt. So wurde jeweils die Schüttdichte in Anlehnung an DIN EN 1097-3 [4], die Druckspannung bei 10 % Stauchung in Anlehnung an DIN EN 826 [3] und die Wärmeleitfähigkeit im Prüfrahm in Anlehnung an DIN EN 12667 [2] geprüft. Da die Zulassungen für die Anwendung als lastabtragende Dämmung unter Bodenplatten gelten, können die Prüfverfahren und daraus resultierenden Werte nicht direkt auf die Anwendung als Perimeterdämmung an Kellerwänden übernommen werden: So wird z.B. beim Einbauverfahren für das Taschensystem des Materials A, der Schaumglasschotter nicht mit einem Rüttler verdichtet. Es ergibt sich so ein geringeres Verdichtungsverhältnis als die in der Zulassung angegebenen (1,3 : 1,0). Im Labor wurde das Verfahren nachgestellt und die Proben in einem Prüfzylinder per Hand ohne mechanische Hilfsmittel verdichtet (Tabelle 33 in Anhang). In der Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Laborprüfungen zusammengestellt. Die Einzelergebnisse können in Tabelle 33 bis Tabelle 41 im Anhang nachgeschlagen werden.

Tabelle 23:
bersicht der physikalischen und wärmetechnischen Eigenschaften der unter-
suchten Schaumglasschotter im Lieferzustand.

Material	Schütt- dichte	Einbau- dichte	Druck- spannung bei 10 % Stauchung	Wärme- leitfähigkeit λ in trockenem Zustand
	kg/m ³	kg/m ³	KPa	W/(m·K)
A (Anwendung Kellerwand)	140,8	162,2	243	0,0920
B (Anwendung Kellerwand und Bodenplatte)	149,4	194,2	609	0,0902
C (Anwendung Bodenplatte)	150,6	195,8	632	0,0890

2.5.2 Kennwerte nach Belastungen im Labor

Die vor dem Freilandversuch zurückgestellten Materialproben wurden umfangreichen Belastungstests im Labor unterzogen. Es wurde der Frostangriff durch den Frost-Tau-Wechselversuch nach DIN 52104 [6], die Wasseraufnahme durch Diffusion in Anlehnung an DIN EN 12088 [5] und die Wasseraufnahme durch Unterwasserlagerung gemäß den Zulassungen geprüft. Anschließend wurde an den Proben die Wärmeleitfähigkeit bzw. die Druckfestigkeit geprüft. An den als Perimeterdämmung im Kellerbereich eingesetzten Materialien wurde die Feuchteaufnahme nach Belastung durch erhöhten Frostangriff (300 Frost-Tau-Wechselzyklen) sowie die Feuchteaufnahme beim Diffusionsversuch und die Wärmeleitfähigkeit getestet. Für die Materialien, die als lastabtragende Dämmung unter Bodenplatten eingesetzt werden, wurde die Wasseraufnahme bei Unterwasserlagerung über 28 Tage und das Verhalten des Schaumglasschotters bei Frost-Wechselbelastung mit 20 Zyklen getestet. Die Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung im feuchten und trockenen Zustand wurde nach den Frost-Tau-Wechselbelastungen getestet. Die Wärmeleitfähigkeit am feuchten Material wurde nach der Unterwasserlagerung und dem Diffusionsversuch gemessen.

In Tabelle 24 sind die durchgeführten Belastungstests und anschließenden Prüfungen für alle drei Materialien aufgelistet.

Tabelle 24:
Belastungen im Labor und anschließend durchgeführte Prüfungen.

Belastung	Wasser- aufnahme durch Diffusion	Wasser- aufnahme durch Unterwasser- lagerung	Frostangriff 20 Frost- Tau- Wechsel	Frostangriff 300 Frost- Tau- Wechsel
Material				
Material A, Kellerwand	Wärme- leitfähigkeit	Wärme- leitfähigkeit	-	Druck- spannung feucht und trocken
Material B, Bodenplatte; Kellerwand	Wärme- leitfähigkeit	Wärme- leitfähigkeit	Druck- spannung feucht und trocken	Druck- spannung feucht und trocken
Material C, Bodenplatte	-	Wärme- leitfähigkeit	Druck- spannung feucht und trocken	-

Bei dem Diffusionsversuch nach DIN EN 12088 [5] zeigten sich verschiedene Probleme bei der Anwendung des Verfahrens auf Schaumglasschotter: Für die Prüfung wurde der Schotter in einem Behälter aus verzinktem Lochblech verdichtet, eingebaut und im Diffusionsapparat zwischen dem Warmwasserbehälter und der Kühlplatte positioniert. Da die Schüttungen beim Einbau gemäß der ermittelten Einbaudichte (Tabelle 23) nur lockeren Kontakt mit der Kühlplatte auf der Oberseite hatten, wurde bei diesem Versuch die Einbaudichte etwas erhöht, um einen guten Kontakt von Material und Kühlplatte sicherzustellen. Außerdem war zu beobachten, dass die Proben nach dem Versuch ungleichmäßig und zum Teil nur von oben befeuchtet waren.

Im Gegensatz zu Materialien, die einen höheren SD Wert aufweisen, wie z.B. XPS, kann der Wasserdampf durch die Hohlräume der Schaumglasschotter-schüttungen nahezu ungehindert zwischen den Einzelkörnern der Dämmung aufsteigen. Ein Teil dieses Wassers kondensiert dann an der Kühlplatte und tropft wieder auf den Schaumglasschotter. So wird der Schotter in diesem Versuch zusätzlich zur Feuchteaufnahme durch das Partialdruckgefälle im Diffusionsstrom auch noch durch das „Tropfwasser“ befeuchtet. An den Ergebnissen in Tabelle 42 und Tabelle 43 im Anhang kann man erkennen, dass die Wasseraufnahme bei den einzelnen Proben unterschiedlich groß war. Dies liegt vermutlich daran, dass das Wasser an der Kühlplatte kondensiert, sich dort sammelt und ungleichmäßig wieder von der Kühlplatte abtropft. Es wird daher vorgeschlagen, das Prüfverfahren für die Anwendung bei diffusionsoffenen Materialien genauer zu überprüfen und ggf. weiter zu entwickeln.

Die detaillierten Ergebnisse zur Wasseraufnahme bei 28 Tagen Unterwasserlagerung und 28 Tagen im Diffusionsapparat können aus Tabelle 42 bis Tabelle

46 im Anhang entnommen werden. Tabelle 26 enthält eine Übersicht der Messergebnisse der Diffusionsversuche und Unterwasserlagerungen.

Nach der Unterwasserlagerung bzw. dem Diffusionsversuch wurde jeweils eine Wärmeleitfähigkeitsmessung im Einplattengerät durchgeführt. Die Ergebnisse sind ebenfalls in der Übersicht in Tabelle 26 aufgeführt. Die einzelnen Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen im feuchten Zustand sind von Tabelle 47 bis Tabelle 51 im Anhang aufgeführt.

Der Angriff durch Frost wurde nach dem Verfahren G nach DIN 52104 [6] geprüft. In Tabelle 52 bis Tabelle 55 im Anhang sind die Wasseraufnahmen während des Frost-Tau-Wechselversuchs für 300 Zyklen (Material A und B) und 20 Zyklen (Material B und C) aufgeführt.

Direkt nach dem Frost-Tau-Wechsel wurde die Druckspannung bei 10% Stauchung gemessen. Zudem wurde ein Teil der Proben nach dem Versuch zurückgetrocknet und die Druckspannung im trockenen Zustand bestimmt. In Tabelle 56 bis Tabelle 59 im Anhang sind die Ergebnisse der Druckspannungsmessungen nach dem Frost-Tau-Wechsel aufgeführt und in Tabelle 27 sind diese Ergebnisse zusammen mit den Ergebnissen aus den Freilandversuchen zusammengefasst.

2.5.3 Kennwerte nach Entnahmen im Freiland

An insgesamt vier Entnahmetermine wurde Probenmaterial an den als Kellerdämmung und als lastabtragende Dämmung eingebauten Schaumglasschotttern entnommen und anschließend im Labor untersucht. An allen Proben aus dem Freiland wurde gravimetrisch der Feuchtegehalt durch Trocknung bei 105°C bestimmt. Die so ermittelte Feuchte in Massenprozent wurde zur besseren Vergleichbarkeit in Volumenprozent umgerechnet. Hierzu wurde als Bezugsdichte die im Labor ermittelte Einbaudichte im trockenen Zustand herangezogen. Zusätzlich wurde von einigen Proben noch die Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand und die Druckspannung bei 10% Stauchung feucht und nach Rücktrocknung bestimmt. Tabelle 25 gibt eine Übersicht der Entnahmetermine und den an dem ausgebauten Material durchgeführten Prüfungen.

Tabelle 25:
Übersicht der Entnahmetermine von Schaumglasschotter an Keller und Bodenplatte.

Entnahmedatum	Entnahme von:	Zusätzliche Prüfungen am entnommenen Material
1. Entnahme 22. September 2011	Material A, Kellerwand	Wärmeleitfähigkeit feucht
	Material B, Kellerwand	Wärmeleitfähigkeit feucht
	Material B, Bodenplatte	-
	Material C, Bodenplatte	-
2. Entnahme 26. November 2012	Material A, Kellerwand	Wärmeleitfähigkeit feucht Druckspannung feucht/ trocken
	Material B, Kellerwand	Wärmeleitfähigkeit feucht Druckspannung feucht/ trocken
3. Entnahme 06. Mai 2013	Material B, Bodenplatte	Wärmeleitfähigkeit feucht
	Material C, Bodenplatte	Wärmeleitfähigkeit feucht
4. Entnahme 12. Mai 2014	Material B, Bodenplatte	Wärmeleitfähigkeit feucht Druckspannung feucht/ trocken
	Material C, Bodenplatte	Wärmeleitfähigkeit feucht Druckspannung feucht/ trocken

Die Ergebnisse zur Ermittlung des Feuchteanteils, der Druckspannungsmessung und der Wärmeleitfähigkeit nach der Belastung im Freiland sind in Tabelle 60 bis Tabelle 81 im Detail aufgeführt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen in Tabelle 26 und die Ergebnisse der Druckspannungsmessungen in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 26: Vergleich der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten und Feuchtegehalte an den Proben aus den Freilandversuchen und an im Labor konditionierten Proben.

	Vorbehandlung	Einbaudichte trocken	Einbaudichte feucht	Feuchtegehalt	Wärmeleitfähigkeit
		kg/m ³	kg/m ³	Vol.-%	W/(m·K)
Material A	Lieferzustand	162,2	-	-	0,0920
	Unterwasserlagerung	162,2	245,2	8,3*	0,141
	Diffusion 28 Tage	169,0	231,7	6,2*	0,140
	1. Entnahmetermin: Probe aus der Kellerwand	179,2	281,7	10,2	0,166
	2. Entnahmetermin: Probe aus der Kellerwand	202,3	314,8	11,2	0,165
Material B	Lieferzustand	194,2	-	-	0,0902
	Unterwasserlagerung	194,2	249,4	5,5*	0,129
	Diffusion 28 Tage	195,7	238,4	4,3*	0,123
	1. Entnahmetermin: Probe aus der Kellerwand	208,9	311,2	10,2	0,142
	2. Entnahmetermin: Probe aus der Kellerwand	208,9	346,9	11,0	0,150
	3. Entnahmetermin: Probe aus der Frostschräge der Bodenplatte	209,5	367,9	15,8	0,165
4. Entnahmetermin: Probe aus der Bodenplatte	200,4	228,4	2,7	0,109	
Material C	Lieferzustand	195,8	-	-	0,0890
	Unterwasserlagerung	195,3	260,0	6,4*	0,134
	3. Entnahmetermin: Probe aus der Frostschräge der Bodenplatte	205,4	287,4	8,2	0,152
	4. Entnahmetermin: Probe aus der Bodenplatte	203,6	206,2	0,3	0,101

* Es sind die Feuchtegehalte der im Plattenapparat gemessenen Proben angegeben. Die mittlere Feuchteaufnahme für die Proben nach der Unterwasserlagerung und dem Diffusionsversuch kann davon abweichen.

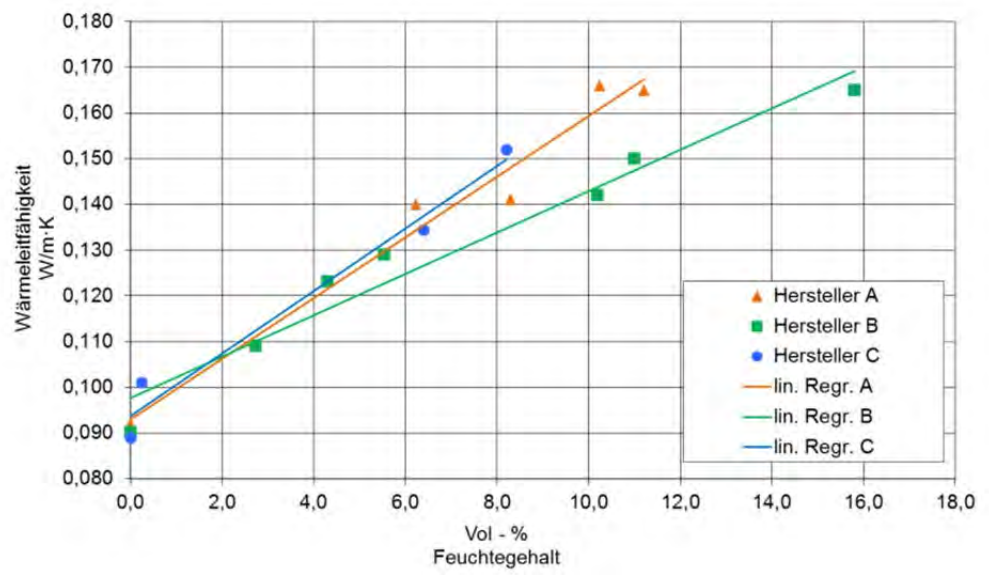


Bild 66:
Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes des Schaumglasschotters.

Tabelle 27:

Vergleich der ermittelten Druckspannungen bei 10% Stauchung an Proben aus den Freilandversuchen und an im Labor konditionierten Proben.

	Vorbehandlung	Einbaudichte trocken	Einbaudichte feucht	Druckspannung bei 10% Stauchung trocken	Druckspannung bei 10% Stauchung feucht
		kg/m ³	kg/m ³	KPa	KPa
Material	Lieferzustand		-	243	-
	nach 300 Frost-Tau-Wechseln	162,2	278,9	205	211
	2. Entnahmetermin: Probe aus der Kellerwand		255,4	215	268
Material B	Lieferzustand		-	609	-
	nach 300 Frost-Tau-Wechseln	194,2	278,5	635	392
	nach 20 Frost-Tau-Wechseln		225,2	557	435
	2. Entnahmetermin: Probe aus der Kellerwand		319,1	377	690
	4. Entnahmetermin: Probe aus der Bodenplatte		203,3	511	777
Material C	Lieferzustand		-	632	-
	nach 20 Frost-Tau-Wechseln	195,8	267,0	610	472
	4. Entnahmetermin: Probe aus der Bodenplatte		197,0	574	674

3 Vergleich der Wärmedurchlasswiderstände ermittelt an Bodenplattendämmungen des Versuchshauses und aus Labor-messwerten mit den Bemessungswerten der Zulassungen

Ein Ziel der Untersuchungen war es, die Bemessungswerte für die Wärmeleitfähigkeit von Dämmungen unter lastabtragenden Bodenplatten aus Schaumglasschotter zu überprüfen. Zudem sollte die funktionale Dauerhaftigkeit der Wärmedämmung unter realen Bedingungen geprüft werden. Wie in dem Kapitel 2.3 aufgeführt, konnte über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren der mittlere Wärmedurchlasswiderstand der zwei Dämmungen unter der Bodenplatte im realen Betrieb ermittelt werden. Zudem wurde an Material, das nach dem Ende des Freilandversuchs ausgebaut wurde, im Labor die Wärmeleitfähigkeit gemessen (Kapitel 2.5.3). In der Tabelle 28 und der Tabelle 29 sind die Messwerte aus dem Freiland und dem Labor sowie der Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit von den Materialien der Materialien B und C zusammengefasst. Für den Vergleich wurde der Wärmedurchlasswiderstand aus der mittleren Schichtdicke und den Messwerten bzw. Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit berechnet.

Tabelle 28:

Material B, Vergleich der im Freiland und im Labor ermittelten Wärmedurchlasswiderstände für die Anwendung unter der Bodenplatte mit dem Bemessungswert aus Schaumglasschotterzulassungen.

Zeitraum		Messungen Versuchshaus		Be- messung*	Berechnung auf Basis von Messung im Labor nach Entnahme**	
		Bodenplatte Rand	Bodenplatte Mitte		Frostschürze	Bodenplatte
		R- Wert m ² K/W	R- Wert m ² K/W			
von	bis					
15.01.2011	31.03.2011	2,58	2,89			
01.12.2011	31.03.2012	2,02	2,68	2,5 bis 2,6	1,82	2,75
01.12.2012	31.03.2013	2,65	2,91			
01.12.2013	31.03.2014	2,65	2,93			

* Berechnet aus der mittleren Schichtdicke und dem Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit aus Schaumglasschotterzulassungen.

** Berechnet aus der mittleren Schichtdicke und dem Messwert für die Wärmeleitfähigkeit nach der Entnahme im Freiland.

Tabelle 29:

Material C, Vergleich der im Freiland und im Labor ermittelten Wärmedurchlasswiderstände für die Anwendung unter der Bodenplatte mit dem Bemessungswert von Schaumglasschotterzulassungen.

Zeitraum		Messungen im Freiland		Bemessungswert*	Berechnung auf Basis von Messung im Labor nach Entnahme**	
von	bis	Bodenplatte Rand R- Wert m ² K/W	Bodenplatte Mitte R- Wert m ² K/W		Frostschürze R- Wert m ² K/W	Bodenplatte R- Wert m ² K/W
15.01.2011	31.03.2011	2,00	2,26	2,5 bis 2,6	1,97	2,97
01.12.2011	31.03.2012	1,42	2,04			
01.12.2012	31.03.2013	1,79	2,27			
01.12.2013	31.03.2014	1,92	2,34			

* Berechnet aus der mittleren Schichtdicke und dem Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit aus Schaumglasschotterzulassungen.

** Berechnet aus der mittleren Schichtdicke und dem Messwert für die Wärmeleitfähigkeit nach der Entnahme im Freiland.

Für das Material B übertrifft der im Freiland gemessene Wärmedurchlasswiderstand unter der Bodenplatte den Bemessungswertebereich entsprechend den Schaumglasschotterzulassungen. Bei Material C wird der Bereich leicht unterschritten. Es kann auch festgestellt werden, dass der R-Wert über den Beobachtungszeitraum schwankt. Es ist aber keine Tendenz zu beobachten, dass die Dämmleistung mit der Zeit kontinuierlich abnimmt. Vielmehr ist der R-Wert bei beiden Materialien im letzten Beobachtungszeitraum in Raummitte unter der Bodenplatte höher als am Anfang der Untersuchungen. Die am Versuchshaus gemessenen Werte für den Randbereich liegen z.T. unter den Bemessungswerten. Aber am Ende des Versuchs werden bei dem Material B auch in diesen feuchteren Bereichen wieder die Bemessungswerte erreicht. Diese Ergebnisse sprechen für eine dauerhaft gute Dämmwirkung des Schaumglasschotters. Bei Material C liegt der R-Wert aus dem Freiland für den Bereich in der Mitte der Bodenplatte etwas unter dem Bemessungswertebereich, während das ausgebaute Material bei der Labormessung auch noch nach 4 Jahren die Anforderungen erfüllt. Es liegt deshalb wahrscheinlich nicht direkt am Material, sondern an der spezifischen Einbausituation, dass die Bemessungswerte leicht unterschritten werden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der Messungen im Labor und im Freiland zueinander passen und die Bemessungswerte für die reale Einbausituation angemessen sind.

4 Gleichwertigkeitsnachweise

4.1 Untersuchungssystematik

Bei der Bewertung einer Wärmedämmung spielt neben dem U-Wert im „ungestörten Bereich“ auch der Wärmeverlust in den Randbereichen, die Wärmebrücken, eine Rolle. Seit der Einführung der EnEV 2002 wird in dem öffentlich-rechtlichen Nachweis der Verlust über diese Wärmebrücken mit Hilfe eines pauschalen Zuschlags auf den U-Wert der Gebäudehülle berücksichtigt. Um einen geringeren Zuschlag und damit besseren U-Wert bei der Berechnung ansetzen zu können müssen die Bauteilanschlüsse gleichwertig mit den Wärmebrücken aus Beiblatt 2 der DIN 4108 [7] sein. Daher wurde die Gleichwertigkeit des Schaumglasschotters mit einer herkömmlichen Wärmedämmung nach Beiblatt 2 geprüft.

Für drei verschiedene Wandarten und deren Anschluss an der Bodenplatte wurde der Wärmedurchgang mittels einer zweidimensionalen Finite-Differenzen-Methode unter Annahme stationärer Klimabedingungen berechnet. Um die Gleichwertigkeit des neuen Schaumglasschotters mit einem herkömmlichen Dämmstoff nachzuweisen, muss der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient Ψ der Konstruktion niedriger sein als die Referenzwerte der Konstruktionsbeispiele im Beiblatt 2 der DIN 4108 [7].

4.2 Geprüfte Varianten

Der Schaumglasschotter unterhalb der Bodenplatte soll ein Streifenfundament ersetzen und zusätzlich eine Frostschräge bilden. Für die Berechnung wurde die Dicke der Schüttung unterhalb der Bodenplatte mit 30 cm angenommen. An den Stirnseiten der Bodenplatte steht die Schüttung 50 cm über (Frostschräge) und schließt mit der Oberkante der Bodenplatte ab. Als Mauerwerk wurden für die Variantenauswahl drei verschiedene Wandkonstruktionen, Massivwand, Wand mit Außendämmung und Holzbauwand, ausgewählt. Als Grundlage für die Berechnung und Referenz für den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten wurden die Anschlussdetails gemäß Beiblatt 2 der DIN 4108 [7] aus dem Bild 10 (Massivwand), Bild 13 (Wand mit Außendämmung) und Bild 19 (Holzbauweise) herangezogen. Für diese drei untersuchten Maueranschlüsse wurde jeweils ein 2-D Modell erstellt. Von Bild 67 bis Bild 72 sind die Skizzen aus dem Beiblatt 2 und die Umsetzung im Berechnungsmodell dargestellt.

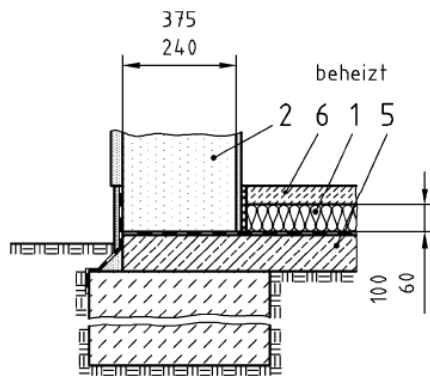


Bild 67:
Anschlussdetail Bild 10 aus Beiblatt 2 der DIN 4108: monolithisches Mauerwerk auf Streifenfundament und Bodenplatte, Quelle [7].

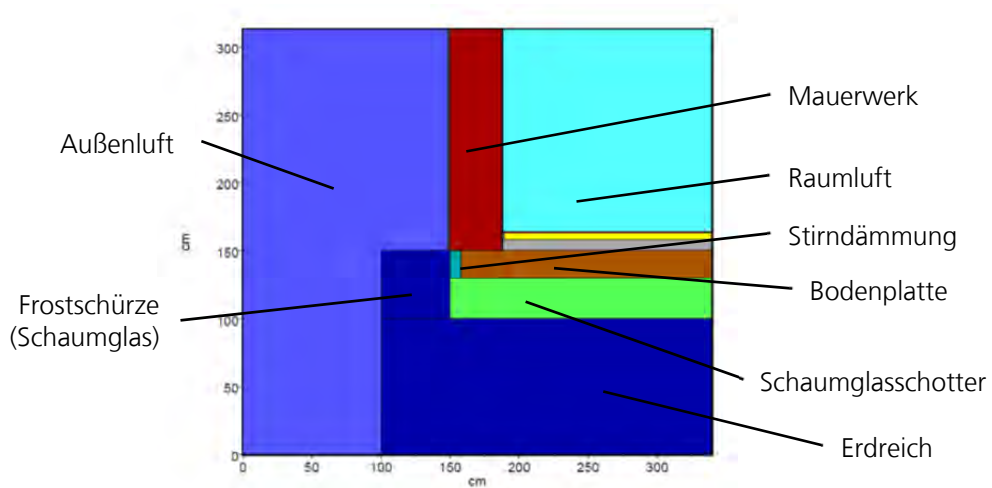


Bild 68:
Berechnungsvariante mit monolithischem Mauerwerk, schematische Darstellung der untersuchten Konstruktion mit Darstellung der Baustoffe wie sie im Berechnungsmodell verwendet wurde.

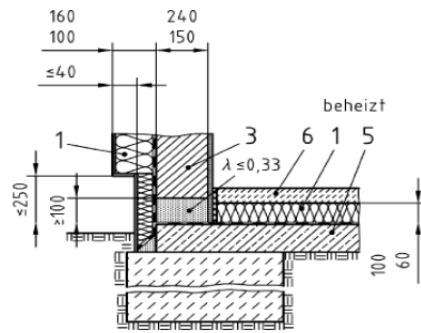


Bild 69:
Anschlussdetail Bild 13 aus Beiblatt 2 der DIN 4108: außengedämmtes Mauerwerk auf Streifenfundament und Bodenplatte, Quelle [7].

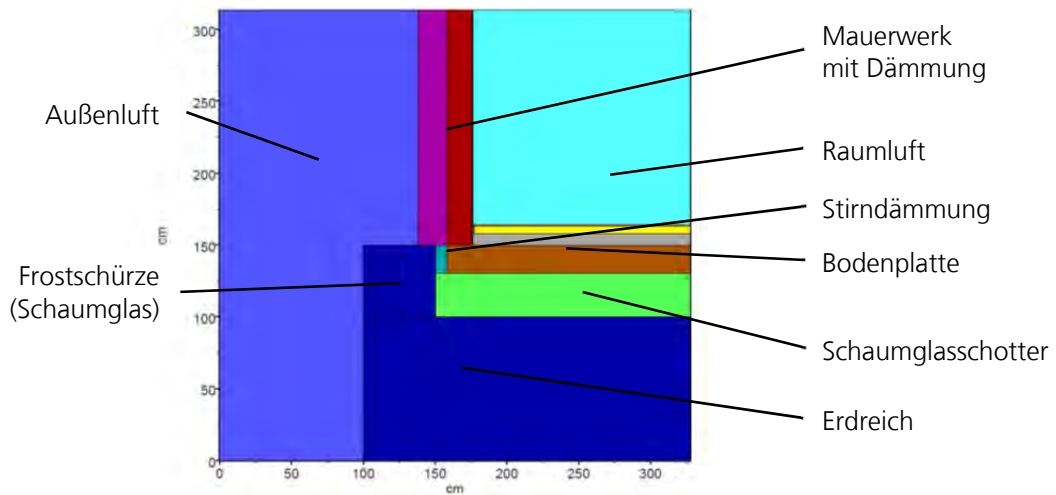


Bild 70:
Berechnungsvariante mit außengedämmtem Mauerwerk, schematische Darstellung der untersuchten Konstruktion mit Darstellung der Baustoffe, wie sie im Berechnungsmodell verwendet wurde.

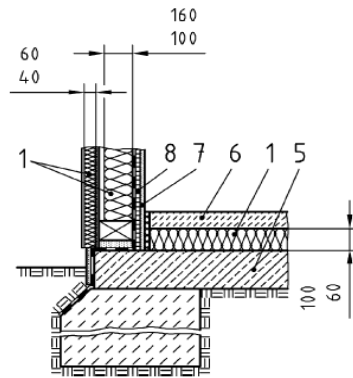


Bild 71:
Anschlussdetail Bild 19 aus Beiblatt 2 der DIN 4108: Holzbauweise auf Streifenfundament und Bodenplatte, Quelle [7].

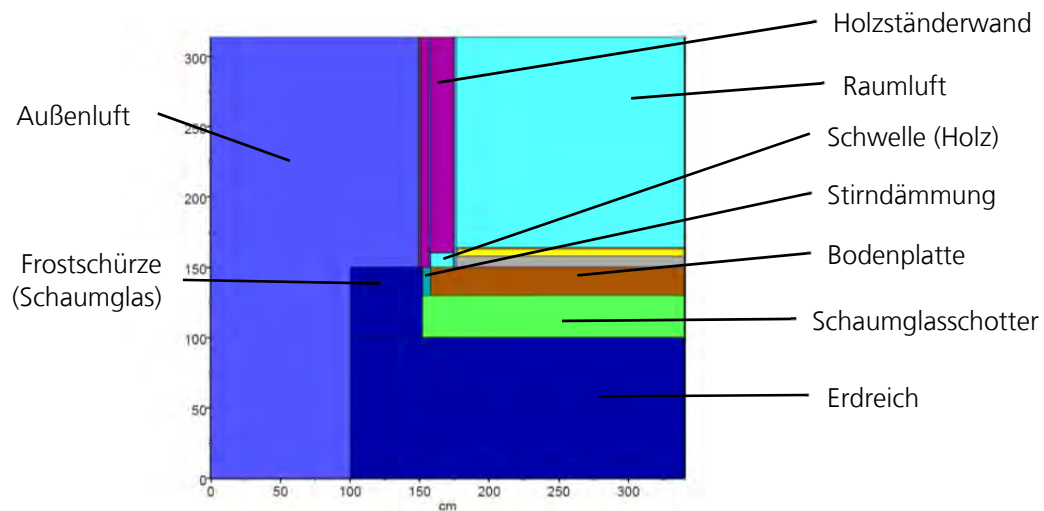


Bild 72:
Berechnungsvariante in Holzbauart, schematische Darstellung der untersuchten Konstruktion mit Darstellung der Baustoffe, wie sie im Berechnungsmodell verwendet wurde.

Die Randbedingungen für die Berechnung wurden nach Tabelle 7 in [7] ausgewählt. Für Anschlüsse mit einer Bodenplatte gibt es in dieser Tabelle zwei verschiedene Möglichkeiten die Außenflächen zu definieren: Ausführungsart 1 innen gedämmt und Ausführungsart 2 außen gedämmt. Um den ungünstigsten Fall zu ermitteln wurden beide Varianten berechnet.

Für den Schaumglasschotter wurde die Wärmeleitfähigkeit aus dem Wertebereich von $0,115 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bis $0,120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ angesetzt. Bei den Freiland- und Laborversuchen zeigte sich, dass zum einen der Schaumglasschotter bei freier Bewitterung viel Feuchte aufnimmt (Bereich der Frostschürze) und zum anderen die Wärmeleitfähigkeit des feuchten Materials größer als der Bemessungswert ist. Daher wurde als weitere Berechnungsvariante untersucht, wie sich diese erhöhte Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Frostschürze auf den längenbezogenen Wärmedurchgangs-

koeffizienten auswirkt. In der Summe ergeben sich so für jedes Material 12 verschiedene Varianten, die berechnet wurden. In der Tabelle 30 sind die berechneten Varianten aufgeführt.

Tabelle 30:
Untersuchungsvarianten für die drei Schaumglasschotter.

Anschlussdetail nach DIN 4108 Beiblatt 2 Tabelle 4	Randbedingungen nach DIN 4108 Beiblatt 2 Tabelle 7	Wärmeleitfähigkeit des Schaumglasschotters in der Frostschräge in $W/(m \cdot K)$
Bild 10 monolithisches Mauerwerk Streifenfundament	Ausführungsart 1 Bodenplatte innengedämmt	Wertebereich 0,115 bis 0,120
		Messwert für feuchtes Material
	Ausführungsart 2 Bodenplatte außengedämmt	Wertebereich 0,115 bis 0,120
		Messwert für feuchtes Material
Bild 13 außengedämmtes Mauerwerk- Streifenfundament	Ausführungsart 1 Bodenplatte innengedämmt	Wertebereich 0,115 bis 0,120
		Messwert für feuchtes Material
	Ausführungsart 2 Bodenplatte außengedämmt	Wertebereich 0,115 bis 0,120
		Messwert für feuchtes Material
Bild 19 Holzbauart ohne Hinterlüftung- Streifenfundament	Ausführungsart 1 Bodenplatte innengedämmt	Wertebereich 0,115 bis 0,120
		Messwert für feuchtes Material
	Ausführungsart 2 Bodenplatte außengedämmt	Wertebereich 0,115 bis 0,120
		Messwert für feuchtes Material

4.3 Modellannahmen und Berechnungsmethode

Die Berechnung der Varianten erfolgte nach [8] mit einem zweidimensionalen Finite-Differenzen-Programm, das in [9] beschrieben ist, unter Annahme stationärer Klimabedingungen. In der Tabelle 31 sind die für die Berechnung verwendeten Modellparameter aufgelistet. Die Wärmeleitfähigkeiten der verwendenden Baustoffe wurden, abgesehen von den Werten für den Schaumglasschotter aus der DIN EN ISO 10456 [10] und DIN V 4108-4 [11] übernommen. Alle weiteren Angaben wurden aus dem Beiblatt 2 [7] übernommen.

Tabelle 31:
Modellparameter für die Berechnungen mit dem Finite-Elemente Programm.

Wandaufbau monolithisch Bild 10 Beiblatt 2	Putz 15 mm, $\lambda = 0,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Mauerwerk 375 mm, $\lambda = 0,11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Putz 10 mm, $\lambda = 0,57 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Wandaufbau außengedämmt Bild 13 Beiblatt 2	Dämmung 200 mm, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Mauerwerk 175 mm, $\lambda = 0,99 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Putz 10 mm, $\lambda = 0,57 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Wandaufbau Holzbauweise Bild 19 Beiblatt 2	Putz 15 mm, $\lambda = 0,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Dämmung 60 mm, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Holz 12 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Dämmung 160 mm, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Holz 12 mm, $\lambda = 0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ GK-Platte 12,5 mm, $\lambda = 0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Bodenaufbau (für alle drei Mauerwerks- varianten)	Erdreich: $1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Schüttung aus Schaumglas 30 cm, mit Frostschräge 50 cm breit. λ siehe Kennwerte der Materialien unten Stahlbeton Bodenplatte: 25 cm, $\lambda = 2,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Stirnseitige Dämmung der Bodenplatte: 8 cm, $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Trittschalldämmung XPS: 8 cm, $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Estrich: 5 cm, $\lambda = 1,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Wärmeleitfähigkeit Material A	$\lambda = 0,120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Schlechtester Fall nach Messung: Entnahme aus der Kellerwand: $\lambda = 0,166 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Wärmeleitfähigkeit Material B	$\lambda = 0,115 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Schlechtester Fall nach Messung: Entnahme aus der Frostschräge: $\lambda = 0,165 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Wärmeleitfähigkeit Material C	$\lambda = 0,120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Schlechtester Fall nach Messung: Entnahme aus der Frostschräge: $\lambda = 0,152 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
Temperaturen	Lufttemperatur innen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Lufttemperatur außen $0 \text{ }^\circ\text{C}$
Wärmeübergangs- widerstand innen	Außenwand $0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ Fußboden $0,17 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$
Wärmeübergangs- widerstand außen	Außenwand $0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ Erdreich $0,00 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$

Wärmeleitfähigkeiten soweit nicht anders angegeben nach [10] und [11],
Wärmeübergangswiderstände nach [7].

4.4 Ergebnisse und Bewertung

In der Tabelle 32 sind die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ für alle 36 berechneten Varianten aufgeführt. Bei allen Varianten liegt der berechnete Wert unter dem Referenzwert nach Beiblatt 2. Somit ist davon auszugehen, dass Konstruktionen mit Schaumglasschotter auch bei ungünstigen Randbedingungen die Anforderungen nach Beiblatt 2 erfüllen und die Gleichwertigkeit der Konstruktion gegeben ist.

Tabelle 32: Ergebnisübersicht längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient Ψ .

Wandaufbau	Material	Ausführungsart nach DIN 4108, Beiblatt 2, Tabelle 7	Schaumglas in der Frostschürze	Ergebnis	Referenz	
			λ	Ψ -Wert	Ψ -Wert	
			W/(m·K)	W/(m·K)	W/(m·K)	
mono-lithisches Mauerwerk Bild 10 nach DIN 4108, Beiblatt 2	A	1 Bodenplatte innengedämmt	0,120	-0,41	≤ -0,05	
			0,166	-0,41		
			B	0,115		-0,42
				0,165		-0,42
			C	0,120		-0,41
				0,152		-0,41
	A	2 Bodenplatte außengedämmt	0,120	-0,17		
			0,166	-0,17		
			B	0,115		-0,16
				0,165		-0,16
			C	0,120		-0,17
				0,152		-0,17
außen-gedämmtes Mauerwerk Bild 13 nach DIN 4108, Beiblatt 2	A	1 Bodenplatte innengedämmt	0,120	-0,32	≤ 0,14	
			0,166	-0,32		
			B	0,115		-0,33
				0,165		-0,33
	C	0,120	-0,32			
		0,152	-0,32			
	A	2 Bodenplatte außengedämmt	0,120	-0,02		
			0,166	-0,02		
			B	0,115		-0,01
				0,165		-0,01
	C	0,120	-0,02			
		0,152	-0,02			
Holzbauweise Bild 19 nach DIN 4108, Beiblatt 2	A	1 Bodenplatte innengedämmt	0,120	-0,38	≤ -0,02	
			0,166	-0,38		
			B	0,115		-0,39
				0,165		-0,39
			C	0,120		-0,38
	0,152	-0,38				
	A	2 Bodenplatte außengedämmt	0,120	-0,08		
			0,166	-0,08		
			B	0,115		-0,07
				0,165		-0,07
			C	0,120		-0,08
	0,152	-0,08				

5 Zusammenfassung

Schaumglasschotter wird als Wärmedämmung unter lastabtragenden Bodenplatten und als Frostschwelle (Frostschutz, Frostschürze, Frostschirm) eingesetzt und ist bauaufsichtlich zugelassen. Von mehreren Schaumglasherstellern gibt es außerdem Systeme für eine außenliegende Wärmedämmung von wohnähnlich genutzten Kellern (Perimeterdämmung). Die Anwendungen des Dämmstoffs im Randbereich der Bodenplatte als Frostschwelle wie auch als Perimeterdämmung haben zur Folge, dass der Dämmstoff Oberflächenwasser und Frost-Tau-Wechseln in hohem Maße ausgesetzt sein kann. Zur Absicherung existierender und gegebenenfalls neuer oder ergänzter Regelungen sollte die Leistungsfähigkeit des Dämmstoffs, das heißt insbesondere dessen Dämmwirkung bei erhöhtem Feuchtegehalt und dessen Dauerhaftigkeit im Freiland, unterstützt durch Labor- und rechnerische Untersuchungen, ermittelt werden. Im Zeitraum von 2010 bis 2014 wurden in dem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geförderten Projekt, mit Beteiligung von drei Schaumglasschotter-Herstellern, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP auf dem Freilandversuchsgelände Untersuchungen zur Erforschung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Schaumglasschotter in eingebautem Zustand durchgeführt. Es wurde einmal der Einbau von Schaumglasschotter als Kellerdämmung über zwei Winterperioden und einmal als Bodenplattendämmung über 4 Winterperioden, jeweils an Versuchshäusern, untersucht. Die Messergebnisse wurden von Labormessungen und auch durch Simulationsrechnungen begleitet und nachvollzogen. Außerdem wurden, basierend auf Messergebnissen und mit Werten aus dem Wärmeleitfähigkeitsbereich von $0,115 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bis $0,120 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ Gleichwertigkeitsnachweise durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Anwendung als Außendämmung von wohnähnlich genutzten Kellern – Hygrothermische Betrachtung

Von Material A wurde eine ca. 45 cm und von Material B eine im Mittel ca. 58 cm breite Schaumglasschotterdämmung über eine Höhe von ca. 2,2 m an einem Versuchshaus im Freigelände des Fraunhofer IBP in Holzkirchen eingebaut. Es handelte sich dabei einmal um trockengeschäumtes Material, welches unverdichtet und ohne Abdeckung eingebaut wurde, und bei dem zweiten Material um nassgeschäumtes Material, welches mit der üblichen 1,3 : 1 Verdichtung und einer Teichfolie als obere Abdeckung verbaut wurde. Es zeigte sich, dass die im realen Einbau - während der zweiten Winterperiode (danach wurde die Messung gestoppt) - messtechnisch ermittelten Wärmedurchlasswiderstände beim Material A im Mittel mit $R = 1,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ deutlich unter dem rechnerisch ermittelten Wert von $4,9 \text{ m}^2\text{K/W}$ liegen (Trockenmessung im Lieferzustand). Ähnlich verhält es sich bei der B Anwendung mit oberer wasserdichter Abdeckung; der gemessene, gemittelte R-Wert von ca. $1,9 \text{ m}^2\text{K/W}$ steht einem für einen trockenen Dämmstoffzustand berechneten R-Wert von $6,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ gegenüber. Somit wären für diese Anwendung enorme Zuschläge notwendig. Als Ursachen für diese geringen R-Werte bei dieser Anwendung werden die hohen Feuchteaufnahmen der Dämmstoffe, bei Material A von im Mittel 11 Vol.-% (am Untersuchungsende), bei Material B mit Abdeckung von 14 Vol.%, Luftdurchströmung (Luftwalzen), Wärmetransport durch

Regen und Latentwärmetransporte, gesehen. Um diese Effekte nachzuweisen wurden mit dem Simulationsprogramm WUFI® Pro, auf Basis der realen Temperaturen im Keller und im Erdreich, Berechnungen durchgeführt und mit Berücksichtigung aller genannten Einflüsse die Messungen nachvollzogen. Die Anwendung von Schaumglasschotter als Wärmedämmschicht im Perimeterbereich sollte aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse hinterfragt werden oder könnte sich im Wettbewerb mit einer 5 cm bis 8 cm dicken EPS oder XPS –Dämmung als nicht wirtschaftlich erweisen. Bezieht man allerdings die starke Drainagefähigkeit der Dämmung mit ein, könnte die Anwendung von Schaumglasschotter als Wärmedämmung in Kombination mit dieser Eigenschaft in bestimmten Anwendungsfällen durchaus im Vorteil sein.

Anwendung als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatte – Hygrothermische Betrachtung

Von Material B und C wurde je eine ca. 30 cm dicke Schaumglasschotterdämmung als lastabtragende Wärmedämmung unter der Gründungsplatte eines neu erstellten Versuchshauses eingebaut. Während bei Material B der Bereich der Frostschräge mit einer Teichfolie überdeckt war, blieb die Frostschräge bei Material C ohne Abdeckung. Aufgrund des bindigen Bodens wurde eine Drainage eingebaut, um unter die Bodenplatte laufendes Regenwasser aus dem Bereich der Wärmedämmung abzuleiten. Es zeigte sich, dass die in-situ messtechnisch ermittelten R-Werte am Ende der Versuchsperiode bei Material B mit 2,93 m²K/W in Bodenplattenmitte und 2,65 m²K/W am Bodenplattenrand einem aus den Bemessungswerten für die Wärmeleitfähigkeit von Schaumglasschottern ermittelten R-Wert-Bereich von 2,5 m²K/W bis 2,6 m²K/W gegenüber stehen. Dies bedeutet, dass der real ermittelte R-Wert über dem theoretischen R-Wertebereich liegt und bestätigt hiermit die Bemessungswerte gemäß der Schaumglasschotterzulassungen. Es zeigte sich auch, dass ein, auf Basis der Wärmeleitfähigkeit des in Bodenplattenmitte entnommenen Materials, berechneter R-Wert von 2,75 m²K/W, gut mit dem messtechnisch ermittelten R-Wert von 2,93 m²K/W korreliert. Bei Material C ergaben die in-situ messtechnisch ermittelten R-Werte am Ende der Versuchsperiode mit 2,34 m²K/W in Bodenplattenmitte und 1,92 m²K/W am Bodenplattenrand. Bezieht man diese Werte auf den Bemessungswertebereich von 2,5 m²K/W bis 2,6 m²K/W bedeutet dies, dass der real ermittelte R-Wert etwas unter dem theoretisch zu erwartenden Bereich entsprechend der Schaumglasschotterzulassungen liegt. Es zeigte sich auch, dass ein, auf Basis der Wärmeleitfähigkeit des in Bodenplattenmitte entnommenen Materials, berechneter R-Wert von 2,97 m²K/W über dem messtechnisch ermittelten R-Wert von 2,34 m²K/W lag. Da der Dämmstoff Material C geringe Feuchtegehalte sowohl unter der Bodenplatte wie auch im Bereich der Frostschräge aufweist, werden als Gründe für die Abweichung eine wahrscheinlich größere Luftbewegung in der Dämmschicht als bei Material B vermutet. Die WUFI® Pro-Simulationen bestätigen bei Ansetzen entsprechender Durchlüftungen durch gute Übereinstimmung von Berechnungs- und Messergebnissen diese Vermutung.

Gleichwertigkeitsnachweise für die Anwendung als lastabtragende Wärmedämmung

Bei der Bewertung einer Wärmedämmung spielt neben dem Wärmedurchgang im ungestörten Bereich auch der Wärmeverlust in den Randbereichen, den Wärmebrücken eine Rolle. Um für diese Wärmebrücken geringere Werte als die anzunehmenden Pauschalwerte für die EnEV Berechnungen ansetzen zu können, muss der Nachweis geführt werden, dass die Bauteilanschlüsse gleichwertig mit den im Beiblatt 2 der DIN 4108 dargestellten Musterlösungen sind. Dies wurde für die beiden Wärmedämmvarianten B und C, Bodenplattendämmung für drei Anschlussdetails (monolithisches Mauerwerk, außengedämmtes Mauerwerk, Holzbauart ohne Hinterlüftung jeweils mit Streifenfundament) mit einer Schaumglas-schotterdicke von 30 cm durchgeführt. Jede dieser Anschlussdetails wurde mit zwei Ausführungsarten (Bodenplatte innen oder außengedämmt) und mit zwei Wärmeleitfähigkeiten (Wärmeleitfähigkeitsbereich 0,115 W/(mK) bis 0,120 W/mK) und für die Frostschräge die real gemessene Wärmeleitfähigkeit) angesetzt. Somit ergaben sich 36 Berechnungsvarianten. In allen Fällen wurden die Referenzwerte für den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten unterschritten und damit die Gleichwertigkeit nachgewiesen.

Dauerhaftigkeit über Versuchszeitraum

- Feuchteaufnahme, Wärmedurchgang, Druckspannung

Während die Feuchteaufnahmen bei den Dämmstoffen, die der freien Bewitterung ausgesetzt waren, von Entnahme zu Entnahme vermutlich aufgrund der Regenfrequenz sehr unterschiedlich und ohne eindeutige Tendenz waren, konnte bei den unter der Bodenplatte eingebauten Dämmstoffen keine Zunahme der Feuchte über den Untersuchungszeitraum festgestellt werden. Die Wärmedurchlasswiderstände der beiden Kellerwanddämmungen nahmen über die zwei Untersuchungsjahre auf mittlerer Höhe bei Material A von $R = 1,52 \text{ m}^2\text{K/W}$ auf $R = 1,45 \text{ m}^2\text{K/W}$ und bei Material B von $1,48 \text{ m}^2\text{K/W}$ auf $1,37 \text{ m}^2\text{K/W}$ ab. Bei den Bodenplattenanwendungen verliefen die R-Werte der Bodenplattendämmungen über 4 Winterperioden bei Material B von $2,89 \text{ m}^2\text{K/W}$ am Anfang über $2,68 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $2,91 \text{ m}^2\text{K/W}$ bis $2,93 \text{ m}^2\text{K/W}$ am Untersuchungsende. Bei Material C wurden Werte von $2,26 \text{ m}^2\text{K/W}$ über $2,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $2,27 \text{ m}^2\text{K/W}$ bis $2,34 \text{ m}^2\text{K/W}$ am Versuchsende gemessen. Die nach zwei Untersuchungs Jahren vermutete Tendenz zu einer Verschlechterung der Wärmedurchlasswiderstände in Abhängigkeit der Zeit, wird durch diese Werte somit widerlegt. Schaut man sich die Druckspannungen, gemessen am Dämmstoff am Versuchsbeginn und am Versuchsende ausgebautem Dämmstoff an, ergibt sich folgendes Bild. Beim Vergleich der Messungen an trockenem Dämmstoff vor Versuchsbeginn mit Messungen an rückgetrocknetem Dämmstoff nach Versuchsende ist tendenziell eine Abnahme der Druckspannung festzustellen. Vergleicht man aber die Druckspannungen, gemessen an trockenem Dämmstoff, am Versuchsbeginn mit den Werten von dem am Versuchsende ausgebauten, feuchten Dämmstoff, ist generell eine Erhöhung der Druckspannung festzustellen. Da die Unterschiede aber im Rahmen von üblichen Schwankungen der Dämmstoffqualität liegen, lassen sich aus unserer Sicht keine gesicherten Schlüsse ableiten. Generell konnte visuell aber kein Verfall der untersuchten Dämmstoffe über den Prüfungszeitraum festgestellt werden; weder

bei der Anwendung als Perimeterdämmung im Kellerbereich noch bei der Anwendung als lastabtragende Wärmedämmung unter Bodenplatten.

Bezug Labormesswerte, in-situ-Messwerte, Zuschläge

Vergleicht man die Ergebnisse der Feuchteaufnahme und der Wärmeleitfähigkeit nach 28 Tagen Unterwasserlagerung und 28 Tagen Diffusionsversuch, so ist festzustellen, dass die Feuchtegehalte nach der Unterwasserlagerung etwas höher ausfallen als beim Diffusionsversuch. Da ein Material sowohl als Perimeterdämmung im Kellerbereich, wie auch unter der Bodenplatte eingesetzt ist, wurde der Frost-Tau-Wechselversuch einmal mit 20 Zyklen und einmal mit 300 Zyklen durchgeführt. Die 300 Frost-Tau-Wechselzyklen bewirkten eine Feuchteaufnahme ungefähr des 3-fachen (10,2 Vol.% und 3,4 Vol.%) der Feuchteaufnahme nach 20 Zyklen. Die Feuchteaufnahme nach 300 Zyklen entspricht hier ungefähr der Größenordnung, die bei der Anwendung als Perimeterdämmung im Freiland im Mittel gemessen wurden. Die Wärmeleitfähigkeit der an den Frostschrüzen der Bodenplattenanwendung genommenen Dämmproben ergab Werte von 0,152 W/(m·K) bei einem Feuchtegehalt von 8,2 Vol.-% und 0,165 W/(m·K) bei einem Feuchtegehalt von 15,8 Vol.%. Werte in dieser Größenordnung werden häufig bei Zulassungsmessungen an Proben nach 28 Tagen Unterwasserlagerung und anschließendem Frost-Tau-Wechselversuch ermittelt. Das heißt für den Frostschrüzenbereich, also den Bereich außerhalb der Bodenplatte, könnte man zukünftig Werte in dieser Größenordnung für die Wärmeleitfähigkeit annehmen. Wie weiter oben schon beschrieben, lässt sich die Anwendung von Schaumglasschotter als Perimeterdämmung im Kellerbereich nur mit Einbußen der Wärmeleitfähigkeit, die man an trockenem Dämmstoff misst, realisieren. Aufgrund verschiedener Einflüsse zusätzlich zur gemessenen Feuchteaufnahme wäre die Wärmeleitfähigkeit, im trockenen Zustand gemessen, z.B. mit einem Faktor von 3 zu multiplizieren. Dieser Wert könnte dann als Bemessungswert angesetzt werden. Bei der Anwendung als Dämmung unter der Bodenplatte wurden, wie oben bereits angedeutet, die Bemessungswerte aus der Zulassung bestätigt.

6 Literatur

- [1] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart (1994).
- [2] 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. Beuth-Verlag, Berlin.
- [3] DIN EN 826:1996-05, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 826:1996 Beuth-Verlag, Berlin.
- [4] DIN EN 1097-3:1998-06, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt; Deutsche Fassung EN 1097-3:1998 Beuth-Verlag, Berlin.
- [5] DIN EN 12088:1997-08: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme durch Diffusion; Deutsche Fassung EN 12088:1997-08 Beuth-Verlag, Berlin.
- [6] DIN 52104:1982-11: Prüfung von Naturstein-Frost-Tau-Wechselversuch Verfahren A bis Q. DIN 52104 Beuth-Verlag, Berlin.
- [7] DIN 4108 Beiblatt 2:2006-03: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele. Beuth-Verlag. Berlin.
- [8] DIN EN ISO 10211:2008-04: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10211-1:2007. Beuth-Verlag. Berlin.
- [9] Tanaka T., Tanaka K.: STATWL-Rechenprogrammsystem zur Bestimmung des stationären, dreidimensionalen Wärmetransports mit Hilfe einer Finiten-Differenzen-Methode. Programmbeschreibung GS-01, Version 1.03, 1997, Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- [10] DIN EN ISO 10456:2010-05: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte. Beuth-Verlag. Berlin.
- [11] DIN V 4108-4:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Beuth-Verlag. Berlin.

7 Anhang

7.1 Tabellen zu Kapitel 2.5.1 Versuche an den Schaumglasschotterproben im Lieferzustand

Tabelle 33: Schüttdichte und Einbaudichte Material A.

Prüfung Nr.	Schüttdichte *1	Einbaudichte *2
	kg/m ³	kg/m ³
1	138,2	155,3
2	140,6	162,2
3	145,4	165,9
4	141,6	165,7
5	138,0	162,1
Mittelwert	140,8	162,2

*1 Schüttdichte nach DIN EN 1097-3,

*2 Einbaudichte per Hand verdichtet im Prüfzylinder nach DIN EN 1097-3.

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Prüfnorm: DIN EN 1097-3:1998-06.

Tabelle 34: Schüttdichte Material B.

Prüfung Nr.	Schüttdichte
	kg/m ³
1	148,6
2	151,4
3	145,0
4	150,6
5	151,2
Mittelwert	149,4

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Prüfnorm: DIN EN 1097-3:1998-06.

Tabelle 35: Schüttdichte Material C.

Prüfung Nr.	Schüttdichte
	kg/m ³
1	147,9
2	150,5
3	150,2
4	151,2
5	150,5
Mittelwert	150,1

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Prüfnorm: DIN EN 1097-3:1998-06.

Tabelle 36: Druckspannung im Lieferzustand, Material A.

Messung-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung
	KPa
1	250
2	237
3	230
4	248
5	250
Mittelwert	243

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Prüfkörper L x B x H: 200 mm x 200 mm x 160 mm
- Einbaudichte trocken: 162,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 37: Druckspannung im Lieferzustand, Material B.

Messung-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung
	KPa
1	573
2	646
3	585
4	611
5	628
Mittelwert	609

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Prüfkörper L x B x H: 200 mm x 200 mm x 160 mm
- Einbaudichte trocken: 194,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 38: Druckspannung im Lieferzustand, Material C.

Messung-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung
	KPa
1	639
2	697
3	595
4	610
5	618
Mittelwert	632

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Prüfkörper L x B x H: 200 mm x 200 mm x 160 mm
- Einbaudichte trocken: 195,8 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 39: Wärmeleitfähigkeit im Lieferzustand, Material A.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,6	5,4	9,3	10,0	0,0920

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 162,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 40: Wärmeleitfähigkeit im Lieferzustand, Material B.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,4	4,4	11,0	9,9	0,0902

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 194,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 41: Wärmeleitfähigkeit im Lieferzustand, Material C.

Messung	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,6	5,5	9,1	10,1	0,0890

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 195,8 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

7.2 Tabellen zu Kapitel 2.5.2 Kennwerte nach Belastungen im Labor

Tabelle 42: Feuchteaufnahme durch Diffusion, Material A.

Behälter Nr.	28-Tage Diffusion			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 28 Tagen	nach 28 Tagen	
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	9,50	12,9	7,2	36,2
2	8,91	13,3	9,3	49,5
Mittelwert			8,2	42,8

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Temperaturen: Kühlplatte 0°C, Warmwasser 50°C
- Maße Prüfraumen: 500 mm x 500 mm x 190 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 193,0 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 12088:1997-08.

Tabelle 43: Feuchteaufnahme durch Diffusion, Material B.

Behälter Nr.	28-Tage Diffusion			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 28 Tagen	Vor Versuch	
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	10,3	13,5	6,7	31,2
2	10,0	11,4	2,9	13,7
Mittelwert			4,8	22,4

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Temperaturen: Kühlplatte 0°C, Warmwasser 50°C
- Maße Prüfraumen: 500 mm x 500 mm x 190 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 211,9 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 12088:1997-08.

Tabelle 44: Feuchteaufnahme durch Unterwasserlagerung, Material A.

Behälter Nr.	28-Tage Unterwasserlagerung			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 28 Tagen	nach 28Tagen	
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	7,65	11,45	8,1	49,7
2	7,65	11,69	8,6	52,8
Mittelwert			8,3	51,2

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Wasser: Temperatur: ca. 23°C, Überdeckung ca. 10 cm
- Maße Prüfrahmen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 162,4 kg/m³
- Prüfnorm: allg. bauaufsichtliche Zulassung des DiBt.

Tabelle 45: Feuchteaufnahme durch Unterwasserlagerung, Material B.

Behälter Nr.	28-Tage Unterwasserlagerung			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 28 Tagen	nach 28Tagen	
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	9,16	11,75	5,5	28,3
2	9,16	11,77	5,6	28,5
Mittelwert			5,5	28,4

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Wasser: Temperatur: ca. 23°C, Überdeckung ca. 10 cm
- Maße Prüfrahmen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 194,4 kg/m³
- Prüfnorm: allg. bauaufsichtliche Zulassung des DiBt.

Tabelle 46: Feuchteaufnahme durch Unterwasserlagerung, Material C.

Behälter Nr.	28-Tage Unterwasserlagerung			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 28 Tagen	nach 28Tagen	
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	9,30	12,66	7,2	36,2
2	9,20	12,57	7,2	36,6
Mittelwert			7,2	36,4

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Wasser: Temperatur: ca. 23°C, Überdeckung ca. 10 cm
- Maße Prüfrahmen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 196,3 kg/m³
- Prüfnorm: allg. bauaufsichtliche Zulassung des DiBt.

Tabelle 47: Wärmeleitfähigkeit nach Diffusionsversuch, Material A.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,6	5,5	9,1	10,0	0,140

- Vorbehandlung: 28 Tage Diffusion
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 231,7 kg/m³
- Feuchtegehalt: 6,2 Vol.-%; 37,1 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 48: Wärmeleitfähigkeit nach Diffusionsversuch, Material B.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,9	5,2	9,7	10,0	0,123

- Vorbehandlung: 28 Tage Diffusion
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 238,4 kg/m³
- Feuchtegehalt: 4,3 Vol.-%; 21,8 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 49: Wärmeleitfähigkeit nach Unterwasserlagerung, Material A.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,6	5,1	9,6	9,8	0,141

- Vorbehandlung: 28 Tage Unterwasserlagerung
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 245,2 kg/m³
- Feuchtegehalt: 8,3 Vol.-%; 51,2 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 50: Wärmeleitfähigkeit nach Unterwasserlagerung, Material B.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,7	5,2	9,5	10,0	0,129

- Vorbehandlung: 28 Tage Unterwasserlagerung
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 249,4 kg/m³
- Feuchtegehalt: 5,5 Vol.-%; 28,4 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 51: Wärmeleitfähigkeit nach Unterwasserlagerung, Material C.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,1	5,3	9,9	10,2	0,134

- Vorbehandlung: 28 Tage Unterwasserlagerung
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 260,0 kg/m³
- Feuchtegehalt: 6,4 Vol.-%; 33,1 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 52: Wasseraufnahme nach Frost-Tau-Wechselversuch mit 300 Zyklen, Material A.

Behälter Nr.	Frost-Tau-Wechselversuch			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 300 Zyklen		
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	1,330	2,264	11,7	70,3
2	1,316	2,280	12,1	73,3
3	1,246	2,362	14,0	89,6
4	1,306	2,306	12,5	76,5
5	1,299	2,292	12,4	76,4
6	1,303	2,267	12,1	74,0
7	1,301	2,306	12,6	77,2
8	1,305	2,314	12,6	77,3
9	1,304	2,298	12,4	76,2
10	1,290	2,314	12,8	79,5
Mittelwert			12,5	77,0

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Zyklen: 300 Zyklen 4h -20 °C/ 1h +20 °C (Unterwasser)
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 200 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 162,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN 52104:1982-11, Verfahren G.

Tabelle 53: Wasseraufnahme nach Frost-Tau-Wechselversuch mit 300 Zyklen, Material B.

Behälter Nr.	Frost-Tau-Wechselversuch			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 300 Zyklen		
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	1,553	2,349	10,0	51,3
2	1,555	2,413	10,7	55,2
3	1,552	2,452	11,3	58,0
4	1,553	2,343	9,9	50,9
5	1,567	2,458	11,2	56,9
6	1,553	2,468	11,5	58,9
7	1,556	2,295	9,3	47,5
8	1,557	2,306	9,4	48,1
9	1,555	2,338	9,8	50,4
10	1,560	2,310	9,4	48,1
Mittelwert			10,2	52,5

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Zyklen: 300 Zyklen 4h -20 °C/ 1h +20 °C (Unterwasser)
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 200 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 194,5 kg/m³
- Prüfnorm: DIN 52104:1982-11, Verfahren G.

Tabelle 54: Wasseraufnahme nach Frost-Tau-Wechselversuch mit 20 Zyklen, Material B.

Behälter Nr.	Frost-Tau-Wechselversuch			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 20 Zyklen		
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	1,542	1,802	3,3	16,8
2	1,561	1,849	3,6	18,4
3	1,552	1,846	3,7	18,9
4	1,554	1,841	3,6	18,5
5	1,554	1,829	3,4	17,7
6	1,552	1,790	3,0	15,3
7	1,551	1,809	3,2	16,6
8	1,553	1,820	3,3	17,2
9	1,554	1,834	3,5	18,0
10	1,552	1,831	3,5	18,0
Mittelwert			3,4	17,6

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Zyklen: 20 Zyklen 4h -20 °C/ 1h +20 °C (Unterwasser)
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 200 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 194,1 kg/m³
- Prüfnorm: DIN 52104:1982-11, Verfahren G.

Tabelle 55: Wasseraufnahme nach Frost-Tau-Wechselversuch mit 20 Zyklen, Material C.

Behälter Nr.	Frost-Tau-Wechselversuch			
	Masse Probe		Wasseraufnahme	
	Vor Versuch	nach 20 Zyklen		
	kg	kg	Vol.-%	M.-%
1	1,557	2,182	7,8	40,2
2	1,555	2,202	8,1	41,6
3	1,559	2,185	7,8	40,2
4	1,558	2,164	7,6	38,9
5	1,559	2,165	7,6	38,9
6	1,557	2,128	7,2	36,7
7	1,558	2,167	7,6	39,1
8	1,567	2,158	7,4	37,7
9	1,558	2,140	7,3	37,3
10	1,560	2,178	7,7	39,6
Mittelwert			7,6	39,0

- Vorbehandlung: Lieferzustand
- Zyklen: 20 Zyklen 4h -20 °C/ 1h +20 °C (Unterwasser)
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 200 mm (L x B x H)
- Einbaudichte trocken: 194,9 kg/m³
- Prüfnorm: DIN 52104:1982-11, Verfahren G.

Tabelle 56: Druckspannung nach 300 Zyklen Frost-Tau-Wechsel, Material A.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht nach Frost-Tau-Wechsel	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	175	282
2	206	205
3	224	197
4	214	166
5	239	176
Mittelwert	211	205

- Vorbehandlung: Frost-Tau-Wechsel 300 Zyklen und Rücktrocknung bei 105°C
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Einbaudichte: feucht: 278,9 kg/m³; trocken: 162,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 57: Druckspannung nach 300 Zyklen Frost-Tau-Wechsel, Material B.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht nach Frost-Tau-Wechsel	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	380	685
2	448	742
3	398	760
4	383	647
5	352	340
Mittelwert	392	635

- Vorbehandlung: Frost-Tau-Wechsel 300 Zyklen und Rücktrocknung bei 105°C
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Einbaudichte: feucht: 278,5 kg/m³; trocken: 194,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 58: Druckspannung nach 20 Zyklen Frost-Tau-Wechsel, Material B.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht nach Frost-Tau-Wechsel	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	448	490
2	418	560
3	405	496
4	428	611
5	476	631
Mittelwert	435	557

- Vorbehandlung: Frost-Tau-Wechsel 20 Zyklen und Rücktrocknung bei 105°C
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Einbaudichte: feucht: 225,2 kg/m³; trocken: 194,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 59: Druckspannung nach 20 Zyklen Frost-Tau-Wechsel, Material C.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht nach Frost-Tau-Wechsel	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	459	533
2	471	705
3	516	589
4	484	613
5	432	-
Mittelwert	472	610

- Vorbehandlung: Frost-Tau-Wechsel 20 Zyklen und Rücktrocknung bei 105°C
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Einbaudichte: feucht: 267,0 kg/m³; trocken: 195,8 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

7.3 Tabellen zu Kapitel 2.5.3 Kennwerte nach Entnahmen im Freiland

Tabelle 60: Feuchtegehalt nach 1. Entnahme, Entnahme 22.09.2011, Material A, Kellerwanddämmung.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 22.09.2011			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Oben, Seite zum Erdreich	768	473	10,1	62,3
Oben, Mitte der Dämmung	827	511	10,1	62,0
Oben, Seite zur Kellerwand	595	370	9,9	60,7
90 cm tief, Seite zum Erdreich	725	465	9,1	55,9
90 cm tief, Mitte der Dämmung	482	291	10,7	65,8
90 cm tief, Seite zur Kellerwand	599	409	7,6	46,6
90 cm tief, Mitte der Dämmung	23238	-(1)	10,2	57,2

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeitsmessung verwendet

Tabelle 61: Feuchtegehalt nach 1. Entnahme, Entnahme 22.09.2011, Material B, Kellerwanddämmung.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 22.09.2011			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Oben, Seite zum Erdreich	654	456	8,4	43,2
Oben, Mitte der Dämmung	406	291	7,7	39,5
Oben, Seite zur Kellerwand	291	243	3,8	19,5
90 cm tief, Seite zum Erdreich	1124	530	21,9	112,3
90 cm tief, Mitte der Dämmung	401	302	6,4	32,8
90 cm tief, Seite zur Kellerwand	480	377	5,3	27,4
90 cm tief, Mitte der Dämmung	19961	-(1)	10,2	48,9

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeitsmessung verwendet

Tabelle 62: Feuchtegehalt nach 1. Entnahme, 22.09.2011, Material B, Dämmung unter Bodenplatte.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 22.09.2011			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Luke in Raummitte, oben	247	244	0,2	1,2
Luke in Raummitte, 15 cm tief	255	235	1,7	8,7
Luke in Raummitte, 30 cm tief	183	181	0,3	1,4
Luke am Rand, Oben	282	271	0,8	4,2
Luke am Rand, 15 cm tief	169	147	2,8	14,6
Luke am Rand, 30 cm tief	191	176	1,6	8,3
15 cm neben Mauerwerk am Rand, 10 cm tief	162	149	1,6	8,2

Tabelle 63: Feuchtegehalt nach 1. Entnahme, 22.09.2011, Material C, Dämmung unter Bodenplatte.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 22.09.2011			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Luke in Raummitte, oben	307	307	0,0	0,0
Luke in Raummitte, 15 cm tief	321	320	0,0	0,2
Luke in Raummitte, 30 cm tief	185	182	0,3	1,6
Luke am Rand, Oben	264	264	0,0	0,1
Luke am Rand, 15 cm tief	184	184	0,0	0,0
Luke am Rand, 30 cm tief	164	163	0,2	1,0
15 cm neben Mauerwerk am Rand, 10 cm tief	227	227	0,1	0,3
Frostschürze, 15 cm tief	518	418	4,7	23,9
Frostschürze, 25 cm tief	599	483	4,7	24,1
Frostschürze, 35 cm tief	384	307	4,9	25,0

Tabelle 64: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 1. Entnahme aus Freiland, Kellerwand, Material A.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,2	4,8	10,4	10,0	0,166

- Entnahme: 22.09.2011 Mitte der Kellerwanddämmung
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 281,7 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 179,2 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 10,2 Vol.-%; 57,2 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 65: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 1. Entnahme aus Freiland, Kellerwand, Material B.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,7	5,3	9,4	10,0	0,142

- Entnahme: 22.09.2011 Mitte der Kellerwanddämmung
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 311,2 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 208,9 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 10,2 Vol.-%; 48,9 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 66: Feuchtegehalt nach 2. Entnahme, 26.11.2012, Material A, Kellerwanddämmung.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 06.05.2012			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken	Vol.-%	M.-%
	g	g		
Feinabdeckung	1736	1021	11,3	69,6
65 cm tief, Seite zum Erdreich	2209	1196	13,7	84,4
65 cm tief, Mitte der Dämmung	2253	1186	14,4	88,6
65 cm tief, Seite zur Kellerwand	2034	1232	11,0	67,4
65 cm tief, Mitte der Dämmung	20669	-(1)	11,7	72,1
120 cm tief, Seite zum Erdreich	2138	1276	10,8	66,4
120 cm tief, Mitte der Dämmung	2378	1346	12,1	74,7
120 cm tief, Seite zur Kellerwand	1459	1011	7,0	42,9
120 cm tief, Mitte der Dämmung	19981	-(1)	11,2	55,6
180 cm tief, Seite zum Erdreich	2932	1607	13,2	81,3
180 cm tief, Mitte der Dämmung	1980	1122	12,2	75,2
180 cm tief, Seite zur Kellerwand	1870	1283	7,3	45,1
180 cm tief, Mitte der Dämmung	24828	-(1)	11,1	68,4
240 cm tief, Seite zum Erdreich	5070	4874	0,7	4,5
Direkt am Erdreich unten	1827	1086	11,5	70,9

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeits- und Druckspannungsmessung verwendet

Tabelle 67: Feuchtegehalt nach 2. Entnahme, 26.11.2012, Material B, Kellerwanddämmung.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 26.11.2012			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken	Vol.-%	M.-%
	g	g		
65 cm tief, Seite zum Erdreich	2909	1242	25,4	130,5
65 cm tief, Mitte der Dämmung	2901	1629	15,0	76,9
65 cm tief, Seite zur Kellerwand	1114	944	2,9	15,0
65 cm tief, Mitte der Dämmung	18634	-(1)	11,7	60,1
65 cm tief, Mitte der Dämmung	10915	246	11,0	56,3
90 cm tief, Mitte der Dämmung	23865	-(1)	11,0	56,5
120 cm tief, Mitte der Dämmung	329	-(1)	9,8	50,1
120 cm tief, Seite zum Erdreich	2755	1484	16,5	85,0
120 cm tief, Mitte der Dämmung	2131	1541	7,4	37,8
120 cm tief, Seite zur Kellerwand	1287	1139	2,5	12,6
120 cm tief, Mitte der Dämmung	2960	1175	29,3	150,7
180 cm tief, Mitte der Dämmung	2516	1216	20,6	105,7
180 cm tief, Mitte zur Kellerwand	1367	1071	5,3	27,1
180 cm tief, Mitte der Dämmung	12878	-(1)	22,7	116,9
Direkt oberhalb der Drainage	1768	817	22,5	115,5

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeits- und Druckspannungsmessung verwendet

Tabelle 68: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 2. Entnahme aus Freiland, Kellerwand, Material A.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,6	4,6	11,0	10,1	0,165

- Entnahme: 26.11.2012, Mitte der Kellerwanddämmung 120 cm tief
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 314,8 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 202,3 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 11,2 Vol.-%; 55,6 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 69: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 2. Entnahme aus Freiland, Kellerwand, Material B.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,2	4,7	10,4	9,9	0,150

- Entnahme: 26.11.2012 Mitte der Kellerwanddämmung 90 cm tief
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 346,9 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 208,9 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 11,0 Vol.-%; 56,4 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 70: Druckspannung trocken und feucht nach 2. Entnahme aus Freiland Kellerwand Material A.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht aus Freiland	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	280	200
2	274	236
3	224	198
4	283	193
5	276	247
Mittelwert	268	215

- Entnahme: 26.11.2012, Kellerwanddämmung
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Maße Prüfrahen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Trocknungstemperatur: 105°C
- Einbaudichte: feucht: 255,4 kg/m³; trocken: 162,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 71: Druckspannung trocken und feucht nach 2. Entnahme aus Freiland Kellerwand Material B.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht aus Freiland	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	740	417
2	785	348
3	563	390
4	669	329
5	691	402
Mittelwert	690	377

- Entnahme: 26.11.2012, Kellerwanddämmung
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Maße Prüfrahen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Trocknungstemperatur: 105°C
- Einbaudichte: feucht: 319,1 kg/m³; trocken: 194,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 72: Feuchtegehalt nach 3. Entnahme, 06.05.2013, Material B, Dämmung unter Bodenplatte.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 06.05.2013			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Frostschürze, oben	643	362	15,1	77,8
Frostschürze, 10 cm tief	19867	-(1)	15,8	75,7
Frostschürze, 15 cm tief,	944	481	18,7	96,0
Frostschürze, 30 cm tief,	1296	797	12,2	62,6
Luke am Rand, oben	693	684	0,3	1,3
Luke am Rand, 15 cm tief	570	559	0,4	2,0
Luke am Rand, 30 cm tief	392	374	0,9	4,8
Luke am Rand, 0-20 cm tief	391	382	0,5	2,3
Luke in Raummitte, oben	532	526	0,2	1,0
Luke in Raummitte, 15 cm tief	570	554	0,5	2,8
Luke in Raummitte, 30 cm tief	558	493	2,6	13,3

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeitsmessung verwendet

Tabelle 73: Feuchtegehalt nach 3. Entnahme, 06.05.2013, Material C, Dämmung unter Bodenplatte.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 06.05.2013			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Frostschürze, oben	703	488	8,7	44,2
Frostschürze, 25 cm tief	13248	-(1)	7,7	36,8
Frostschürze, 15 cm tief,	560	432	5,8	29,6
Frostschürze, 30 cm tief,	994	719	7,5	38,2
Luke am Rand, oben	699	697	0,1	0,3
Luke am Rand, 15 cm tief	371	371	0,0	0,1
Luke am Rand, 30 cm tief	313	308	0,3	1,5
Luke am Rand direkt neben Wand, 0-30 cm tief	423	423	0,0	0,1
Luke in Raummitte, oben	541	540	0,0	0,2
Luke in Raummitte, 15 cm tief	529	528	0,0	0,1
Luke in Raummitte, 30 cm tief	461	450	0,5	2,4

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeitsmessung verwendet

Tabelle 74: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 3. Entnahme aus Freiland, Bodenplatte, Material B.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,0	5,1	9,9	10,0	0,165

- Entnahme: 06.05.2013, aus der Frostschräge ca. 10 cm tief
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 367,9 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 209,5 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 15,8 Vol.-%; 75,7 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 75: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 3. Entnahme aus Freiland, Bodenplatte, Material C.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,8	4,5	11,3	10,1	0,152

- Entnahme: 06.05.2013, aus der Frostschräge ca. 25 cm tief
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 287,4 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 205,4 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 8,2 Vol.-%; 39,9 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 76: Feuchtegehalt nach 4. Entnahme, 12.05.2014, Material B, Dämmung unter Bodenplatte.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 12.05.2014			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Frostschürze, oben,	844	619	7,1	36,3
Frostschürze, 20 cm tief,	1191	753	11,3	58,1
Frostschürze, 30 cm tief,	1439	865	12,9	66,3
Luke in Raummitte, oben	694	681	0,4	1,8
Luke in Raummitte, 20 cm tief	783	763	0,5	2,7
Luke in Raummitte, 30 cm tief	672	633	1,2	6,1
Luke in Raummitte, ganze Dicke der Dämmung	14640	-(1)	2,7	14,0
Luke am Rand, oben	766	746	0,5	2,6
Luke am Rand, 20 cm tief	832	800	0,8	4,0
Luke am Rand, Ecke der Bodenplatte 30 cm tief	551	530	0,8	3,9
Luke am Rand, 30 cm tief	1005	796	5,1	26,2
Luke am Rand, ganze Dicke der Dämmung	9605	-(1)	-	-

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeitsmessung verwendet

Tabelle 77: Feuchtegehalt nach 4. Entnahme, 12.05.2014 Material C, Dämmung unter Bodenplatte.

Vertikale und horizontale Lage der entnommenen Probe	Entnahme im Freiland am 12.05.2014			
	Entnommene Masse		Feuchtegehalt	
	Feucht	Trocken		
	g	g	Vol.-%	M.-%
Frostschürze, oben,	1039	635	12,5	63,7
Frostschürze, 20 cm tief,	984	594	12,9	65,7
Frostschürze, 30 cm tief,	1176	729	12,0	61,3
Luke in Raummitte, oben	829	828	0,0	0,0
Luke in Raummitte, 20 cm tief	621	618	0,1	0,5
Luke in Raummitte, 30 cm tief	656	619	1,2	6,0
Luke in Raummitte, ganze Dicke der Dämmung	9530	-(1)	-	-
Luke am Rand, oben	621	620	0,0	0,1
Luke am Rand, 20 cm tief	646	643	0,1	0,4
Luke am Rand, Ecke der Bodenplatte 30 cm tief	822	816	0,1	0,7
Luke am Rand, ganze Dicke der Dämmung	13110	-(1)	0,3	1,3
Luke am Rand, 30 cm tief	720	686	1,0	5,0

*(1) Probe für Wärmeleitfähigkeitsmessung verwendet

Tabelle 78: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 4. Entnahme aus Freiland, Bodenplatte, Material B.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	14,8	5,5	9,3	10,1	0,109

- Entnahme: 12.05.2014, Revisionsluke in Raummitte
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 228,4 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 200,4 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 2,7 Vol.-%; 14,0 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 79: Wärmeleitfähigkeit feucht nach 4. Entnahme aus Freiland, Bodenplatte, Material C.

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperatur- differenz	Mitteltemperatur der Proben	Gemessene Wärmeleit- fähigkeit
	Heizplattenseite	Kühlplattenseite			
	°C	°C			
1	15,4	5,2	10,2	10,3	0,101

- Entnahme: 12.05.2014, Revisionsluke am Rande des Raumes
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Messgerät: Einplattengerät mit 500 mm x 500 mm Messfläche, horizontal
- Maße Prüfraumen: 570 mm x 570 mm x 145 mm (L x B x H)
- Einbaudichte feucht: 206,2 kg/m³
- Einbaudichte trocken: 203,6 kg/m³ (Rücktrocknung nach der Messung bei 105°C)
- Feuchtegehalt: 0,3 Vol.-%; 1,3 M.-%
- Prüfnorm: DIN EN 12667: 2001-05.

Tabelle 80: Druckspannung trocken und feucht nach 4. Entnahme aus Freiland Bodenplatte Material B.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht aus Freiland	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	809	525
2	775	459
3	859	561
4	702	455
5	741	555
Mittelwert	777	511

- Entnahme: 12.05.2014, aus den Revisionsluken im Raum
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Trocknungstemperatur: 105°C
- Einbaudichte: feucht: 203,3 kg/m³; trocken: 194,2 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

Tabelle 81: Druckspannung trocken und feucht nach 4. Entnahme aus Freiland Bodenplatte Material C.

Behälter-Nr.	Druckspannung bei 10 % Stauchung	
	Feucht aus Freiland	Rückgetrocknet
	KPa	KPa
1	694	547
2	686	541
3	658	547
4	678	578
5	656	656
Mittelwert	674	574

- Entnahme: 12.05.2014, aus den Revisionsluken im Raum
- Vorbehandlung: keine, Messung feucht wie ausgebaut
- Maße Prüfraumen: 200 mm x 200 mm x 160 mm (L x B x H)
- Trocknungstemperatur: 105°C
- Einbaudichte: feucht: 197,0 kg/m³; trocken: 195,8 kg/m³
- Prüfnorm: DIN EN 826:1996-05.

8 Anlage

8.1 Anlage 1, Zwischenabrechnung

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FOERDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG
E.V.

Zuwendungsgeber:
Deutsches Institut für
Bautechnik
Förderkennzeichen: ZP52-5-5.100-1348/10

Zwischen / Schluß - Nachweis
Kostenbasis

Projekt-Nummer: 003 - 424293
Rechnung-Nummer: 003-A-183
Institut/Kst.: 003 - IBP
Haushaltjahr: 2010

AZK- Nr.	Kostenarten	Genehmigte Vorkalkulation (insgesamt) EUR	K O S T E N	
			i.o. genannten Kalenderjahr EUR	insgesamt EUR
	1	2	3	4
	Personalkosten	74.700,00	40.330,89	40.330,89
	Sachkosten	53.100,00	37.932,35	37.932,35
	Investitionen	48.820,00	2.172,84	2.172,84
0881	Gesamtkosten	176.620,00	80.436,08	80.436,08
	J. Kostenüberschreitung	0,00	14.276,08	14.276,08
	abrechenbare Kosten	176.620,00	66.160,00	66.160,00
	J. Eigenmittel	0,00	0,00	0,00
	J. Mittel Dritter	102.480,00	34.160,00	34.160,00
	J. Sonst. Einnahmen	0,00	0,00	0,00
	zzgl. 7,00% Umsatzsteuer	74.140,00	32.000,00	32.000,00
	Zuwendung insgesamt	5.189,80	2.240,00	2.240,00
		79.329,80	34.240,00	34.240,00

EINNAHMEN (Summe der bisher vereinnahmten Teilbeträge) 17.120,00 €
KOSTEN (Summe der Spalte 4) 34.240,00 €
Forderung -17.120,00 €

Die Richtigkeit der Eintragungen und des Abschlusses wird hiermit bestätigt.

München, 1.8. Mai 2011
Ort und Datum der Ausstellung

Fraunhofer-Gesellschaft
zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
Postfach 02 07 00, 10000 Berlin
Rechtsverbindliche Unterschrift

USt-IdNr. DE129515966
Steuernummer 143/215/20392