

F 2894

Wolfgang Breit, Joachim Schulze,
Christian Heese, Bianca Bund

Hochwärmedämmende, mono- lithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton

F 2894

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. 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.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9252-9

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

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 60
67663 Kaiserslautern
Telefon: +49 631 205 22 97
Telefax: +49 631 205 31 01
E-Mail: wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de
www.bauing.uni-kl.de/fw

Forschungsbericht

SF-10.08.18.7-10.24

Hochwärmedämmende, monolithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-10.24 / II3 – F20-10-1-032)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Dieser Bericht umfasst 69 Seiten (inkl. Deckblatt).

Wiedergabe, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen der TU-Kaiserslautern gestattet. Jede Haftung des Fachgebiets und seiner Mitarbeiter aus mündlichen oder schriftlichen Auskünften, Beratungen oder Gutachten ist, soweit gesetzlich zulässig, ausgeschlossen. Von Ansprüchen Dritter sind wir freizustellen.

Inhalt

Übersicht.....	iii
1 Ausgangssituation.....	4
1.1 Allgemeines.....	4
1.2 Ziel des Forschungsvorhabens.....	4
1.3 Ausgangsbasis.....	5
1.4 Projektbegleitung / Beratergruppe.....	5
2 Ergebnisse zur Betonoptimierung.....	6
2.1 Optimierung der Betonzusammensetzung.....	6
2.1.1 Allgemeines.....	6
2.1.2 Zement.....	6
2.1.3 Gesteinskörnung.....	7
2.1.4 Zusatzmittel.....	7
2.1.5 Ergebnis der Betonoptimierung.....	8
2.2 Frischbetoneigenschaften.....	9
3 Ergebnisse der Versuche.....	10
3.1 Mechanische Kennwerte des Architekturleichtbetons.....	10
3.1.1 Druckfestigkeit.....	10
3.1.2 Biege- und Spaltzugfestigkeit.....	11
3.1.3 Elastizitätsmodul.....	12
3.2 Widerstand gegen eindringendes Wasser und Gase.....	12
3.2.1 Kapillare Wasseraufnahme.....	12
3.2.2 Wassereindringtiefe unter Druck.....	15
3.2.3 Gaspermeabilität.....	17
3.3 Schwinden.....	19
3.4 Wärmeleitfähigkeit.....	20
4 Bau eines Experimentalgebäudes aus Architekturleichtbeton.....	22
4.1 Allgemeines.....	22
4.2 Realisierung des Bauvorhabens mit Architekturleichtbeton.....	23
4.3 Anmerkungen zu Architekturleichtbeton unter Praxisbedingungen.....	27
5 Bauwerksmonitoring mit Multiringensorelektroden (MRSE).....	28
5.1 Allgemeines zum Bauwerksmonitoring.....	28
5.2 Bestimmung der Feuchteverläufe.....	31
5.3 Bestimmung der Temperaturverläufe.....	35
6 Zusammenfassung.....	40
7 Weiteres Vorgehen und Ausblick.....	41
8 Literatur.....	42
Anhang I Nicht zielführende Versuche und Ausgangsmaterialien.....	43
Anhang II Statische Berechnung.....	44

Übersicht

BBR-Bericht:	SF-10.08.18.7-10.24
Titel :	Hochwärmedämmende, monolithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton
Fördermittelgeber:	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Zukunft BAU Deichmanns Aue 31-37 D-53179 Bonn
Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit
Sachbearbeiter:	Dr. rer. nat. Joachim Schulze Dipl.-Ing. Christian Heese Dipl.-Ing. Bianca Bund
Interne Forschungsnummer:	F11-225
Ausgestellt am:	21.01.2014
Berichtsumfang:	69 Seiten

1 Ausgangssituation

1.1 Allgemeines

Die Kombination der physikalischen Eigenschaften eines hochwärmedämmenden Leichtbetons mit den optischen Eigenschaften eines sogenannten Architekturbetons ermöglicht die Gestaltung von Bauteilen, bei denen der bewusst betonte Ausdruck des Baustoffs Beton mit den aktuellen und zukünftig absehbaren energetischen Anforderungen an die Eigenschaften von Außenbauteilen vereint werden kann. Gegenüber der üblichen mehrschaligen Außenwand bietet eine Ausführung als homogene, massive Architekturbetonwand aus Leichtbeton Vorteile im Hinblick auf Gestaltungsmöglichkeiten, Vermeidung von Fugen, Bauzeit, Wärmespeichervermögen und Wiederverwertbarkeit der Baustoffe. Durch Optimierung der Materialeigenschaften des Architekturleichtbetons soll eine monolithische Wand (Wandstärke ca. 50 cm) entsprechend den Kriterien der ENEC 2009 realisiert werden können, die darüber hinaus hohe Ansprüche an optische sowie bauphysikalische Anforderungen erfüllt.

Vor dem Hintergrund des "nachhaltigen Bauens" als einem Forschungsschwerpunkt an der TU Kaiserslautern, sollten recycelbare Baustoffe (Blähglas, etc.) verwendet werden.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Monolithische Außenbauteile aus wärmedämmendem Leichtbeton sind aufgrund ihrer geringen Dichte und porigen Struktur empfindlich gegen Wasser/Feuchtigkeit und sonstige eindringende korrosionsfördernde Medien. Des Weiteren müssen die gestellten Forderungen hinsichtlich Frischbetoneigenschaften und mechanischen Anforderungen sowie Luftdichtigkeit und Schallschutz zielsicher erreicht werden. Das Erzielen von ausreichenden Materialeigenschaften ist somit von einer möglichst geschlossenen und homogenen Oberfläche abhängig, die gleichzeitig eine hohe Sichtbetonqualität ermöglicht. Das monolithische Bauteil sollte ohne zusätzliche Dämmung die Anforderungen der ENEC 2009 (U-Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$) erfüllen und mit Kerndämmung einen U-Wert von $0,2 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ unterschreiten. Hierzu sollten geeignete Kerndämmmaterialien eingesetzt werden, die insbesondere die Aspekte des nachhaltigen Bauens berücksichtigen und die Recycelfähigkeit der Gesamtkonstruktion möglich machen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte die Entwicklung eines Architekturleichtbetons mit folgendem Anforderungsprofil realisiert werden:

- hohe Sichtbetonqualität mit möglichst gefügedichter Oberfläche
- Wandkonstruktion erfüllt die Anforderungen der ENEC 2009
- Ausgangsstoffe erfüllen Nachhaltigkeitsanforderungen
- Frischbeton: leichte Verdichtbarkeit, Mischungsstabilität
- Festbeton: Druckfestigkeit LC 8/9, Rohdichte $< 750 \text{ kg}/\text{m}^3$
- ausreichender Widerstand gegen eindringende Gase (Luftpermeabilität, Wind) und Wasser
- Optimierung der Schwindeigenschaften

Das rechnerische Bemessungsverfahren für die monolithische Konstruktion aus dem neu entwickelten Architekturleichtbeton erfolgte im Fachgebiet „Massivbau und Baukonstruktion“ (Prof. J. Schnell). Aufgrund des neuartigen Werkstoffs wurden im Zuge der statischen Berechnung zahlreiche Annahmen „auf der sicheren Seite“ liegend getroffen (siehe Anhang).

1.3 Ausgangsbasis

Basierend auf den bisherigen Untersuchungsergebnissen sollten durch betontechnologische Optimierung des Architekturleichtbetons der ersten Generation die optischen Sichtbeton- und die bauphysikalischen Materialeigenschaften des Werkstoffs so verbessert werden, dass die hohen architektonischen Ansprüche hinsichtlich der Gestaltungsmöglichkeit mit dem Baustoff Beton kombiniert werden können mit dem Anspruch, die Anforderungen der ENEC 2009 sicher zu erfüllen. Die Optimierung des Dämmbetons erfolgte entsprechend den in Abschnitt 1.2 sowie im Zuwendungsantrag (Abschnitt 3.2, Teil A) formulierten Zielsetzungen.

1.4 Projektbegleitung / Beratergruppe

Das Projekt wurde seitens des BBR begleitet von:

Dipl.-Ing. Asmus Schriewer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Forschungsinitiative Zukunft BAU
Deichmanns Aue 31-37
D-53179 Bonn

Beratend waren an dem Projekt beteiligt:

Dipl.-Ing. Dieter Heller

Geschäftsführer Bundesverband Leichtbeton e.V.
Sandkauler Weg 1
56564 Neuwied
Telefon 02631/35555-0
Email heller@leichtbeton.de

Dipl.-Ing. Julia Oeder

Leiterin Labor und Qualitätsmanagement
Dennert Poraver GmbH
Gewerbegebiet Ost
92353 Postbauer Heng
Telefon 09188/940224
Email oeder@poraver.de

2 Ergebnisse zur Betonoptimierung

2.1 Optimierung der Betonzusammensetzung

2.1.1 Allgemeines

Aufgrund der besonderen angestrebten Eigenschaften, z. B. gute Wärmedämmeigenschaften des Architekturleichtbetons bei hoher Dichtigkeit gegen eindringende Feuchtigkeit und Gase trotz geringer Rohdichte und geschäumter Zementmatrix, sind spezielle Anforderungen an die ausgewählten Ausgangsstoffe zu stellen. Die im Rahmen des Forschungsprojekts angestrebten Betoneigenschaften führten zu einer Vielzahl von Betonzusammensetzungen, die nicht den gewünschten Anforderungen entsprachen und anhand von einzelnen Ausschlusskriterien nicht weiter untersucht wurden. Die im Folgenden aufgeführten Frisch- und Festbetonkennwerte beziehen sich auf die letztendlich zum Bau des Experimentalgebäudes (Bezeichnung: Small House I) verwendete, im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts bestmöglich optimierte Zusammensetzung des Architekturleichtbetons.

2.1.2 Zement

Wegen der erforderlichen sehr geringen Wärmeleitfähigkeit wurde im Frischbeton die entstehende Hydratationswärme sehr langsam abgeführt. Die zu Beginn der Betonentwicklung verwendeten Zemente (CEM II/A-S 42,5 N, Weißzement CEM I 42,5 R) führten bei größeren Versuchskörpern (ca. 400 dm³, Probekörper: 50 cm · 50 cm · 160 cm) zu Frischbetontemperaturen von über 100 °C. Der Einsatz eines speziellen CEM III/B 32,5 N, der laut Hersteller eine extrem langsame Hydratationswärmeentwicklung aufweist, führte zu einer deutlichen Absenkung der erreichten Maximaltemperatur, die allerdings immer noch zu einer Erwärmung des Probekörpers auf ca. 70 °C nach 40 Stunden führte (Abbildung 1).

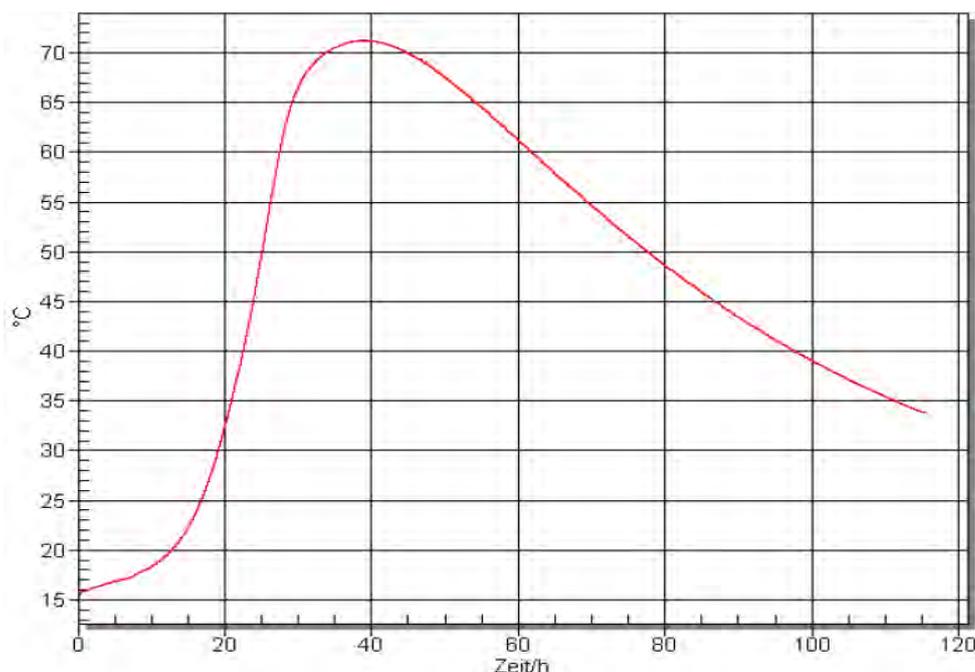


Abbildung 1: Hydratationswärmeentwicklung des Architekturleichtbetons mit einem Hochofenzement CEM III/B 32,5 N

2.1.3 Gesteinskörnung

Basierend auf den Ergebnissen der umfangreichen Vorversuche konnten verschiedene leichte Gesteinskörnungen, wie z. B. Blähschiefer, Blähton und Bims, als geeignete Gesteinskörnung für Architekturleichtbeton ausgeschlossen werden. Die angestrebten Eigenschaften hinsichtlich Wasseraufnahme und Wärmeleitfähigkeit konnten nur mit einer leichten Gesteinskörnung aus industriell gefertigtem Recyclingblähglas realisiert werden. Um eine stetige Sieblinie zu erhalten, kamen die in Abbildung 2 gezeigten Kornfraktionen zum Einsatz.



Abbildung 2: Leichte Gesteinskörnungen für Architekturleichtbeton

Die verwendete leichte Gesteinskörnung zeichnete sich durch eine geringe Kornrohddichte sowie geringe Wasseraufnahme bei ausreichender Druckfestigkeit aus.

2.1.4 Zusatzmittel

Die gewünschten Produkteigenschaften des Architekturleichtbetons waren nur durch einen ausgefeilten „Zusatzmittelcocktail“ erreichbar. Aufgrund der geringen Rohddichte der Gesteinskörnung neigte der Frischbeton prinzipiell zu Entmischungserscheinungen, die durch zusätzliche Verdichtungsmaßnahmen noch verstärkt werden können. Um diesem Entmischen entgegen zu wirken wurde ein Stabilisator (ST) zugesetzt. Zum Erreichen der zwingend erforderlichen selbstverdichtenden Fließigenschaften war ein hochwirksames PCE-Fließmittel (FM) erforderlich. Die angestrebte geringe Trockenrohddichte ließ sich nicht allein durch den Einsatz von porigen Gesteinskörnungen realisieren, sondern erforderte die Anwendung eines Schaumbildners (SB) zum Aufschäumen der Zementmatrix. Dieser hohe Porenanteil barg prinzipiell die Gefahr einer verstärkten Wasseraufnahme, welche durch den Einsatz eines hydrophobierenden Zusatzmittels (HY) entscheidend reduziert werden konnte. Die Gefahr einer verstärkten Rissbildung infolge Trocknungsschwinden wurde durch den

Einsatz eines sogenannten Schwindreduzierers (SR) verringert. Zur erfolgreichen Optimierung der Betoneigenschaften war somit die Zugabe von insgesamt fünf Zusatzmitteln erforderlich.

2.1.5 Ergebnis der Betonoptimierung

Die durchgeführte Betonoptimierung musste im Prinzip widersprüchliche Anforderungen, wie z. B. ausreichende Druckfestigkeit bei möglichst geringer Rohdichte sowie geringe Wasseraufnahme trotz poröser, aufgeschäumter Zementmatrix erfüllen. Die durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich der Betonoptimierung führten zu der in Tabelle 1 dargestellten Zusammensetzung des Architekturleichtbetons.

Tabelle 1: Zusammensetzung Architekturleichtbeton

Material	Produktbezeichnung	kg/m ³
Leichtzuschlag 0,25/0,5	Poraver 0,25/0,5	74,1
Leichtzuschlag 1/2	Poraver 1/2	74,1
Leichtzuschlag 4/8	Poraver 4/8	61,6
Zement	Cem III/B 32,5 N	370,3
Fließmittel	Adva Flow 435	5,8
Stabilisator	ST MB 4	0,5
Hydrophobierung	EXP 2022	1,3
Schwindreduzierer	Eclipse Floor	9,2
Schaumbildner	285 SB	7,4
Wasser		135,8

Die in Tabelle 1 aufgeführte Betonzusammensetzung wies eine Frischbetonrohichte von etwa 720 kg/m³ bis 740 kg/m³ auf. Die im Antragstext formulierte Zielgröße der Rohdichte von höchstens 750 kg/m³ wurde somit vom Frischbeton unterschritten; die ermittelten Trockenrohichten (ca. 650 – 700 kg/m³) unterschritten den geforderten Wert deutlich.

Die erzielten Biegezug- und Druckfestigkeiten sowie weitere bauphysikalisch relevante Eigenschaften des optimierten Architekturleichtbetons, der auch bei dem Bau des Experimentalgebäudes verwendet wurde, sind in Kapitel 3 aufgeführt.

2.2 Frischbetoneigenschaften

Aufgrund der extrem leichten Gesteinsfraktionen aus Blähglas war eine leichte Verdichtbarkeit bzw. selbstverdichtende Frischbetoneigenschaften erforderlich, da eine intensive Zufuhr von Verdichtungsenergie zu Entmischungserscheinungen führt und die leichten Körnungen aufschwimmen lässt. Die Optimierung der Betonzusammensetzung führte zu einem Architekturleichtbeton, der ein Setzfließmaß von 680 mm bis 700 mm aufwies (Abbildung 3). Wie Abbildung 4 zeigt, neigte der entwickelte Leichtbeton nicht zum Absondern von Wasser.



Abbildung 3: Setzfließmaß der optimierten Architekturleichtbetonrezeptur



Abbildung 4: Randbereich des Architekturleichtbetons beim Ermitteln des Setzfließmaßes

Die im Projektantrag formulierten Zielvorstellungen hinsichtlich leichter Verarbeitbarkeit und Mischungsstabilität wurden von den optimierten Architekturleichtbetonmischungen unter Laborbedingungen erfüllt.

3 Ergebnisse der Versuche

3.1 Mechanische Kennwerte des Architekturleichtbetons

3.1.1 Druckfestigkeit

Als niedrigste genormte Festigkeitsklasse der DIN EN 206-1 [1] wird der Leichtbeton LC 8/9 aufgeführt. Diese genormten Leichtbetone weisen jedoch eine Rohdichte (ofentrocken) von mindestens 800 kg/m^3 auf. Aufgrund der zwingend erforderlichen geringeren Rohdichte der in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Architekturleichtbetone wird die Druckfestigkeit erwartungsgemäß unter der Druckfestigkeitsklasse LC 8/9 liegen.

Der Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit wurde im Rahmen der Betonentwicklung deutlich erkennbar. Die zu Beginn der Betonoptimierung gemessenen, relativ hohen Rohdichten (ca. 800 kg/m^3 - 850 kg/m^3) ermöglichten 28-d-Druckfestigkeiten, am Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm, die über 10 N/mm^2 lagen.

Die Wärmeleitfähigkeiten dieser Leichtbetone erreichten die gestellten Anforderungen jedoch bei weitem nicht. Eine deutliche Reduktion der Rohdichte durch optimierten Einsatz von leichten Gesteinskörnungen sowie Schaumbildnern zur Porositätserhöhung der Zementmatrix führten in logischer Konsequenz zur Erniedrigung der erzielten Druckfestigkeiten, die zum Abschluss des Forschungsvorhabens nach 28 Tagen bei etwa $6,0 \text{ N/mm}^2$ bis $6,5 \text{ N/mm}^2$ lagen. Diese unter Laborbedingungen optimierten Betonzusammensetzungen erzielten ein optimales Verhältnis zwischen Festigkeits-eigenschaften und Rohdichte, wodurch die angestrebten Wärmeleitfähigkeiten realisiert werden konnten. Die optimierten Betonzusammensetzungen stellten sich jedoch als extrem empfindlich gegenüber Dosierungsschwankungen heraus, wobei hiervon insbesondere die Frischbetoneigenschaften betroffen waren. Die Probekörper, die aus dem unter Praxisbedingungen produzierten Architekturleichtbeton hergestellt wurden (beim Bau des Experimentalgebäudes aus verschiedenen Mischfahrzeugen entnommen) wiesen folgende Druckfestigkeiten auf:

- nach 28 Tagen $6,0 \text{ N/mm}^2$ bis $7,5 \text{ N/mm}^2$,
- nach 56 Tagen $8,0 \text{ N/mm}^2$ bis $9,0 \text{ N/mm}^2$
- nach 90 Tagen $8,8 \text{ N/mm}^2$ bis $10,1 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 2: Mittelwerte der Druckfestigkeitsentwicklung an Betonwürfeln (150 mm) aus repräsentativen Proben von unterschiedlichen Betonierabschnitten

Probenalter [d]	3	7	14	28	56	90	180
Druckfestigkeit [N/mm^2]	2,6	3,7	5,4	6,3	8,7	9,2	9,2

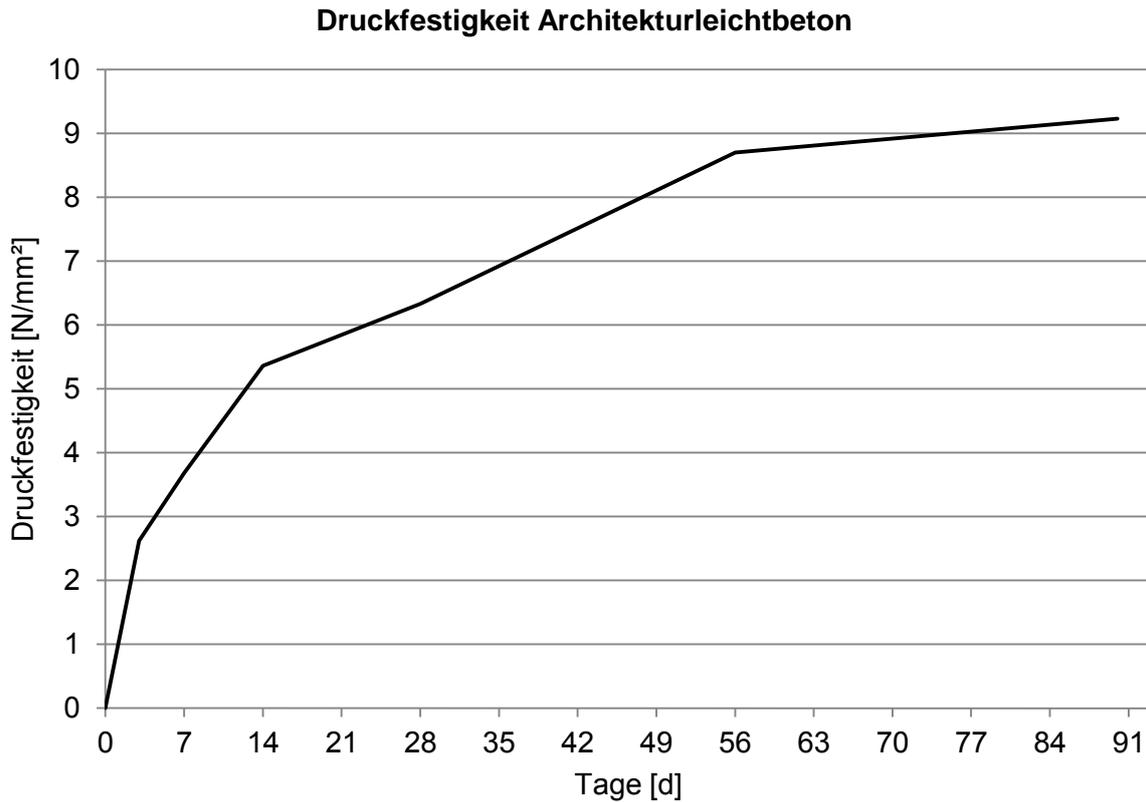


Abbildung 5: Druckfestigkeitsentwicklung des Architekturleichtbetons

3.1.2 Biege- und Spaltzugfestigkeit

Entsprechend den geringen Druckfestigkeiten des optimierten Architekturleichtbetons lagen die Biegezugfestigkeiten, ermittelt nach 28 Tagen an Prismen mit der Kantenlänge 40 mm · 40 mm · 160 mm, lediglich bei ca. 1,3 N/mm². Zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung der Zugfestigkeit wurde die Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 [2] zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt.

Tabelle 3: Mittelwerte der Spaltzugfestigkeitsentwicklung an Leichtbetonzylindern (Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm) aus repräsentativen Proben von unterschiedlichen Betonierabschnitten

Probenalter [d]	28	56	90	180
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	1,3 ¹			1,4 ²
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	0,90	1,05	1,15	

¹ Prisma 40 mm x 40 mm x 160 mm 3-Punkt-Biegezugfestigkeit;

² Balken 150 mm x 150 mm x 700 mm 4-Punkt-Biegezugfestigkeit

3.1.3 Elastizitätsmodul

Die Elastizitätsmoduln von Leichtbetonen korrelieren prinzipiell mit der Rohdichte und den Elastizitätsmoduln der leichten Gesteinskörnung. Der Elastizitätsmodul des letztendlich zur Herstellung des Experimentalgebäudes verwendeten Architekturleichtbetons, bestimmt an Zylindern mit einer Höhe von 300 mm und einem Durchmesser von 150 mm nach 28 Tagen, wies im Mittel etwa 3,5 kN/mm² auf und erreichte nach 180 Tagen einen Mittelwert von ca. 4,0 kN/mm². Die Elastizitätsmoduln für Porenbetone mit einer vergleichbaren Rohdichte liegen in einem Bereich zwischen 1,8 und 2,5 kN/mm². Legt man das Berechnungsmodell der DIN 1045-1 [3] zur Bestimmung der Festigkeits- und Formänderungskennwerte von Leichtbetonen zugrunde, so erhält man mit

$$E_{lcm} = \eta_E \times E_{cm} = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \times E_{cm}$$

einen rechnerischen Elastizitätsmodul des Architekturleichtbetons von ca. 2,2 kN/mm² (Annahme: $\rho = 740 \text{ kg/m}^3$; $E_{cm} = 19,5 \text{ kN/mm}^2$).

Trotz des im Vergleich zu Normalbetonen relativ geringen Elastizitätsmoduls war der erreichte Wert des Architekturleichtbetons mit 3,5 kN/mm² im Vergleich zu Baustoffen mit ähnlicher Rohdichte (Bsp.: Porenbeton) als relativ hoch zu bezeichnen.

3.2 Widerstand gegen eindringendes Wasser und Gase

3.2.1 Kapillare Wasseraufnahme

DIN EN ISO 15148 [4] legt ein Verfahren zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten für kurze Zeitspannen durch teilweises Eintauchen ohne Temperaturgradienten fest. Dieses Messverfahren diente zur Beurteilung der Intensität der Wasseraufnahme aufgrund von Kapillarkräften bei anhaltender Beregnung oder Schlagregen.

Die zylindrischen Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm (Abbildung 5) wurden normgerecht konditioniert und die Wasseraufnahme wurde durch Messen der Massenänderung der jeweiligen Probekörper über einen Zeitraum von 24 Stunden bestimmt. Die Versuchsdurchführung ist in Abbildung 6 dargestellt; die hierbei erhaltenen Daten der kapillaren Wasseraufnahme an ausgewählten, repräsentativen Beispielen zeigen Tabelle 4 und Abbildung 7.



Abbildung 6: Testreihe zur kapillaren Wasseraufnahme des Architekturleichtbetons

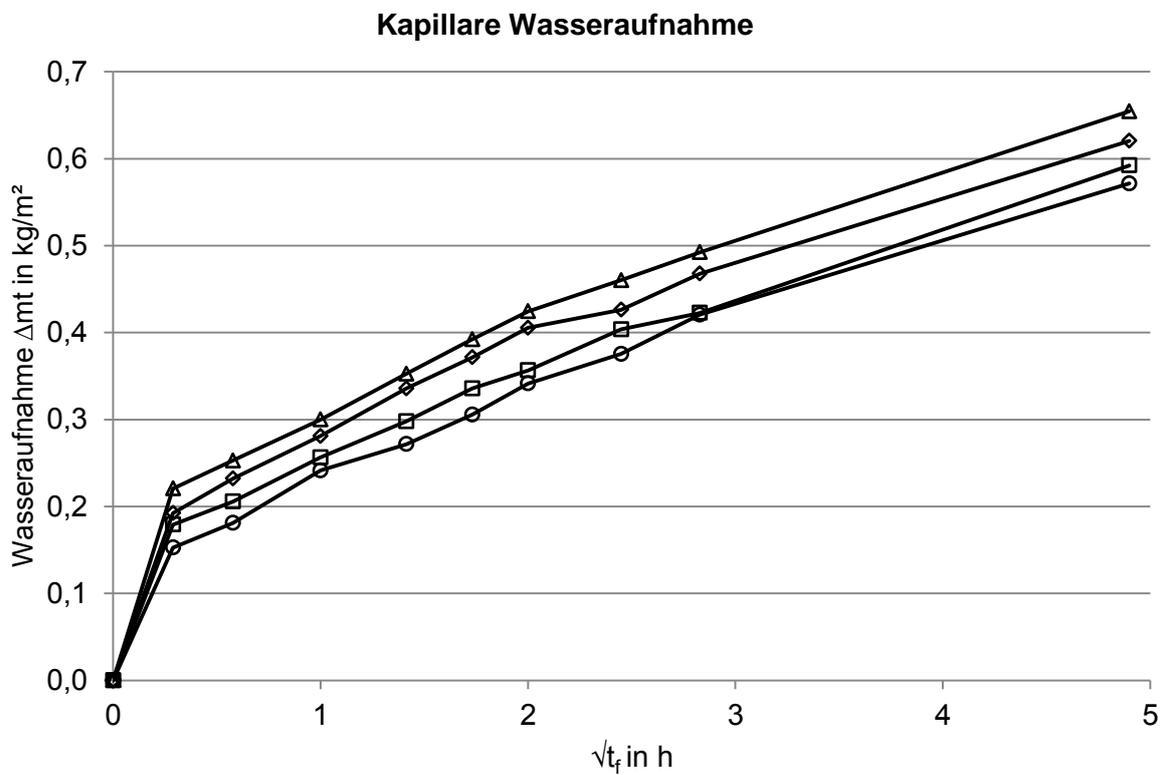


Abbildung 7: Kapillare Wasseraufnahme des Architekturleichtbetons nach DIN EN ISO15148

Die ermittelten Wasseraufnahmen in Abhängigkeit von der Zeit entsprachen dem Kurventyp A der DIN EN ISO 15148, d. h. das aufgenommene Wasser erscheint nicht an der Oberseite des Probekörpers. Der Wasseraufnahmekoeffizient wurde berechnet als:

$$W_W = \frac{\Delta m_{t_f} - \Delta m_0}{\sqrt{t_f}}$$

wobei Δm_{t_f} dem Wert von Δm zu Zeit t_f entspricht und t_f der Prüfdauer in Stunden (hier 24h). Daraus ergaben sich die in Tabelle 4 aufgeführten Werte für den Wasseraufnahmekoeffizienten.

Tabelle 4: Wasseraufnahmekoeffizienten des Architekturleichtbetons (Mittelwerte)

Probekörper	Δm_0 [kg/m ²]	Δm_{t_f} [kg/m ²]	t_f [h]	$W_W = \frac{\Delta m_{t_f} - \Delta m_0}{\sqrt{t_f}}$ [kg/m ² h ^{0,5}]
1	0,233	0,655	24	0,086
2	0,227	0,621	24	0,080
3	0,176	0,592	24	0,085
4	0,158	0,572	24	0,084

Der an mehreren repräsentativen Proben ermittelte Wasseraufnahmekoeffizient zeigte mit Werten unter 0,1 kg/m²h^{0,5} die sehr geringe kapillare Wasseraufnahmefähigkeit des neu entwickelten Architekturleichtbetons. Dieser Wert unterschritt die Wasseraufnahme eines Normalbetons (C25/30), der in der Regel einen Wasseraufnahmekoeffizient von ca. 0,7 kg/m²h^{0,5} aufweist, deutlich. Anhand der in Tabelle 5 aufgeführten, bauphysikalischen Einteilung konnte die Einstufung des Architekturleichtbetons erfolgen.

Tabelle 5: Einstufung der Baustoffe anhand des Wasseraufnahmekoeffizienten

Einstufung	Wasseraufnahmekoeffizient	Klasse
wasserundurchlässig	w < 0,001	I
wasserabweisend	w < 0,5	II
wasserhemmend	w < 2	III
wasserdurchlässig/saugend	w > 2	IV

Für die angestrebten Wärmedämmeigenschaften der monolithischen Außenbauteile aus Architekturleichtbeton war die Einstufung als wasserabweisender Beton von entscheidender Bedeutung, da durchfeuchtete Bauteile mit hohen Wassergehalten deutlich schlechtere Eigenschaften hinsichtlich des Wärmedurchgangs aufweisen. Die geringe Wasseraufnahme war auf den Einsatz eines hydrophobierenden Zusatzmittels zurückzuführen. Bei Vergleichsmessungen mit Betonen aus den gleichen Ausgangsmaterialien und gleicher

Zusammensetzung, allerdings ohne Zugabe des hydrophobierenden Zusatzmittels, stieg die Wasseraufnahme des Leichtbetons auf mehr als das Doppelte.

3.2.2 Wassereindringtiefe unter Druck

Die Prüfung der Wassereindringtiefe unter Druck erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-8 [5], die einen Wasserdruck von 500 kPa (5 bar) für einen Zeitraum von 72 h vorschreibt. Eine normgerechte Prüfung war bei dem zu untersuchenden Leichtbeton nicht möglich, da bei diesen hohen Drücken das Wasser seitlich aus den porösen Probekörpern herausgedrückt wurde und somit eine korrekte Beurteilung der Wassereindringtiefe nicht möglich war. Unter einem reduzierten Wasserdruck von 100 kPa (1 bar, entsprechen 10 m Wassersäule) bei gleichem Versuchsaufbau, erhielt man nach 72 h die in Abbildung 8 und 9 beispielhaft gezeigten Wassereindringtiefen.



Abbildung 8: Wassereindringtiefe an repräsentativen Probekörpern aus Architekturleichtbeton bei einem Wasserdruck von 100 kPa



Abbildung 9: Wassereindringtiefe an repräsentativen Probekörpern aus Architekturleichtbeton bei einem Wasserdruck von 100 kPa

Die nach dem Spalten der Probekörper aus Architekturleichtbeton gemessenen, maximalen Wassereindringtiefen bei einem Wasserdruck von 100 kPa lagen in einem Bereich von ca. 10 mm bis 15 mm.

Weitere Prüfungen der Wassereindringtiefe mit 200 kPa wurden ebenfalls durchgeführt und ergaben maximale Wassereindringtiefen von bis zu 35 mm (Abbildung 10).

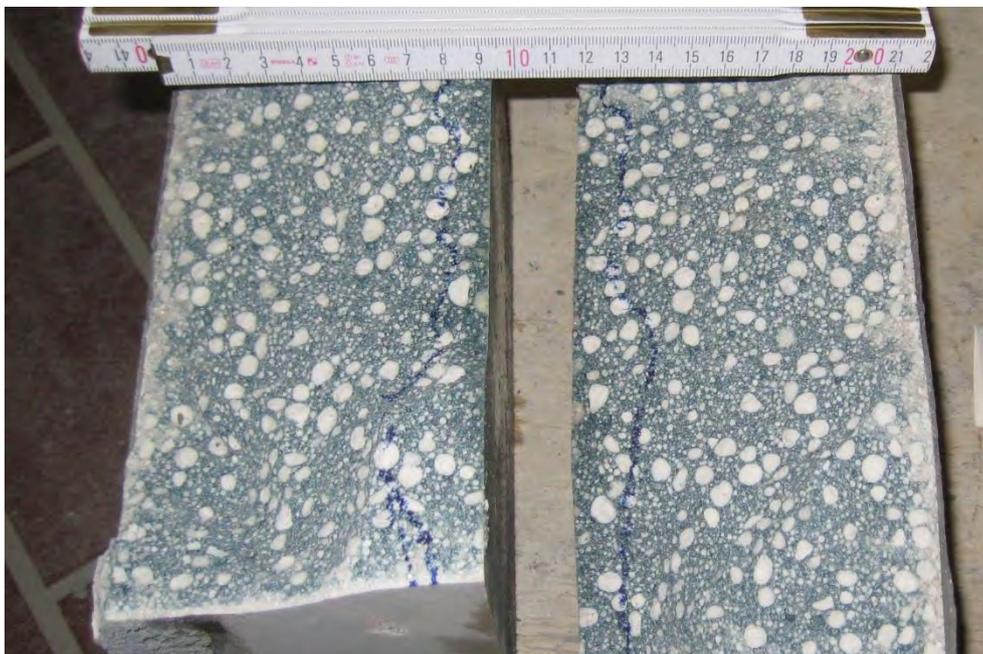


Abbildung 10: Wassereindringtiefe bei einem Wasserdruck von 200 kPa (2 bar)

3.2.3 Gaspermeabilität

Die Dauerhaftigkeit von Beton hängt maßgeblich von dem Porenvolumen und der Porengrößenverteilung des Betons ab. Mittels der Gaspermeabilitätsmessung wurde die Gefügedichte des Betons bestimmt, die entscheidend ist für den Transport von Flüssigkeiten und Gasen. Je geringer diese Durchlässigkeit ist, desto besser ist der Beton vor zerstörender Karbonatisierung und Korrosion geschützt. Die Messung der Gaspermeabilität, die in direktem Zusammenhang mit der Porosität des Betons steht, erfolgte an Zylinderscheiben mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Dicke von 50 mm. Der Prüfwert wird als spezifischer Permeabilitätskoeffizient K [m^2] bezeichnet. Übliche Betone weisen Permeabilitätskoeffizienten von 10^{-14} m^2 bis 10^{-19} m^2 auf. Bei wenig durchlässigen Probekörpern ist mit einem Permeabilitätskoeffizienten $K < 1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ zu rechnen.

Der Permeabilitätskoeffizient K wurde an repräsentativen Proben des Architekturleichtbetons für mehrere Druckstufen einzeln ermittelt. Bei der Bestimmung des K -Werts hat es sich bewährt, den Mittelwert von mindestens 3 K -Werten anzugeben, die bei verschiedenen Druckstufen bestimmt wurden. Die Untersuchung der Gaspermeabilität an Zylinderscheiben des Architekturleichtbetons gemäß DAfStb-Heft 422 [6] ergab die in Tabelle 6 aufgeführten Werte. Die Abweichungen in der vorliegenden Größenordnung konnten auf geringfügige Unterschiede bei der Zusammensetzung, der aus verschiedenen Chargen entnommenen Proben sowie auf Schwankungen bei den Lagerungsbedingungen zurückgeführt werden.

Tabelle 6: Permeabilitätskoeffizient des Architekturleichtbetons

Probe	Druck [bar]	Permeabilitätskoeffizient K [m^2]	Mittelwert K [m^2]
1	0,5	$1,68 \cdot 10^{-16}$	$1,65 \cdot 10^{-16}$
	1,0	$1,47 \cdot 10^{-16}$	
	1,5	$1,80 \cdot 10^{-16}$	
2	0,5	$2,54 \cdot 10^{-16}$	$3,12 \cdot 10^{-16}$
	1,0	$3,71 \cdot 10^{-16}$	
	1,5	$3,11 \cdot 10^{-16}$	
3	0,5	$2,58 \cdot 10^{-16}$	$1,92 \cdot 10^{-16}$
	1,0	$1,59 \cdot 10^{-16}$	
	1,5	$1,59 \cdot 10^{-16}$	
4	0,5	$0,76 \cdot 10^{-16}$	$0,67 \cdot 10^{-16}$
	1,0	$0,37 \cdot 10^{-16}$	
	1,5	$0,87 \cdot 10^{-16}$	

Die ermittelten Mittelwerte der Permeabilitätskoeffizienten lagen zwischen ca. $0,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $3,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Diese Abweichungen waren jedoch gering im Verhältnis zu den Unterschieden, die z. B. bei Betonen mit unterschiedlicher Zusammensetzung oder Nachbehandlung beobachtet werden können.

Die Tabellen 7 und 8 ermöglichen eine Beurteilung des Permeabilitätskoeffizienten [7] des Architekturleichtbetons im Vergleich zu Normalbetonen.

Tabelle 7: Klasseneinteilung der Gaspermeabilität von Normalbeton

Klasse	Permeabilitätskoeffizient [m ²]	Erreichbar durch gut nachbehandelten Beton mit w/z
Sehr schlecht	$> 10 \cdot 10^{-16}$	$> 0,80$
Schlecht	$< 10 \cdot 10^{-16}$	0,80
Genügend	$< 1 \cdot 10^{-16}$	0,60
Gut	$< 0,5 \cdot 10^{-16}$	0,50
Sehr gut	$< 0,1 \cdot 10^{-16}$	0,40

Tabelle 8: Abhängigkeit der Gaspermeabilität vom Wasserzementwert

w/z	Permeabilitätskoeffizient [m ²]			
	0,4	0,5	0,6	0,7
Zementstein	$9,1 \cdot 10^{-16}$	$2,2 \cdot 10^{-15}$	$2,6 \cdot 10^{-15}$	$3,4 \cdot 10^{-15}$
Mörtel	$2,2 \cdot 10^{-17}$	$3,3 \cdot 10^{-17}$	$3,1 \cdot 10^{-16}$	$3,3 \cdot 10^{-16}$
Normalbeton	$1,9 \cdot 10^{-17}$	$2,1 \cdot 10^{-17}$	$6,4 \cdot 10^{-17}$	$1,5 \cdot 10^{-16}$

Die Einordnung der Permeabilitätskoeffizienten des untersuchten Architekturleichtbetons ($0,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $3,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$) mit den aufgeführten Tabellenwerten zeigte, dass eine Gaspermeabilität erreicht wurde, die vergleichbar mit Normalbetonen mit hohem w/z-Wert (ca. 0,7) ist.

Vergleicht man die ermittelte Gaspermeabilität mit der Permeabilität und dem Porengefüge von porösen, zementgebundenen Werkstoffen (Abbildung 11) [7], so erkennt man die, in Relation zur Rohdichte und Porosität, als außergewöhnlich gering zu bezeichnende Gasdurchlässigkeit des neu entwickelten Architekturleichtbetons.

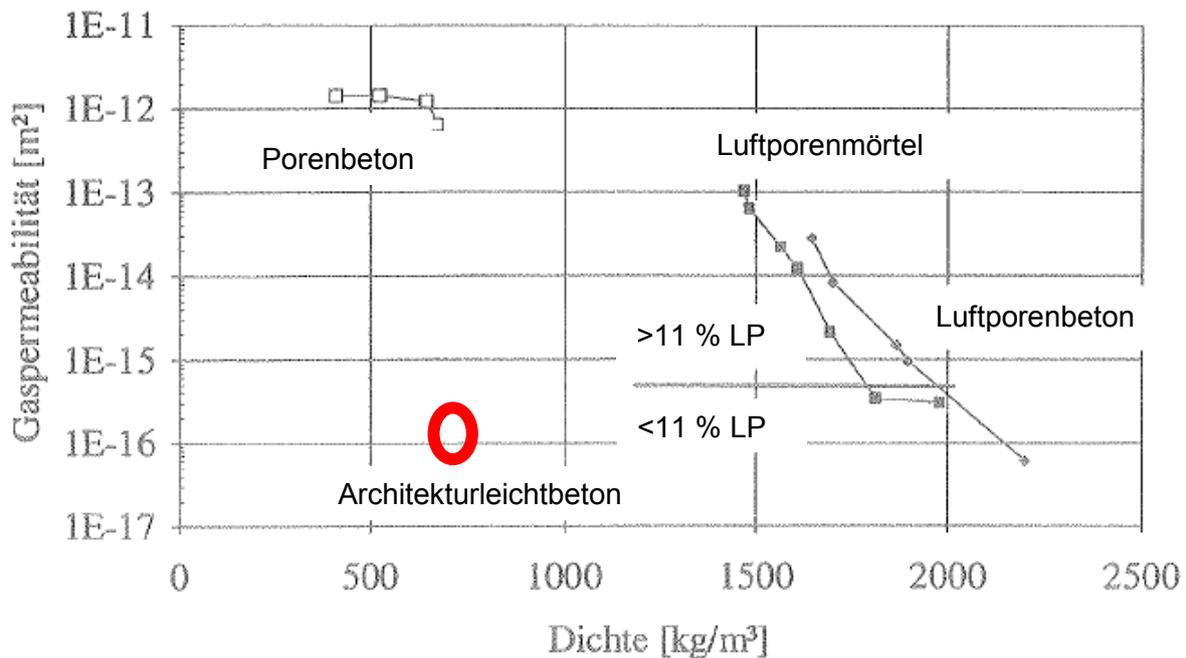


Abbildung 11: Permeabilitätskoeffizient poröser Werkstoffe (Jacobs) [7] im Vergleich zu Architekturleichtbeton (Kreis)

Somit war der Architekturleichtbeton erwartungsgemäß gasdurchlässiger als ein gut verdichteter Normalbeton. Im Vergleich zu marktüblichen porösen, zementgebundenen Werkstoffen konnte allerdings eine deutlich geringere Gaspermeabilität festgestellt werden. Die guten Eigenschaften bezüglich der Gaspermeabilität des Leichtbetons, hinsichtlich seiner geringen Rohdichte, lassen auf eine ausreichende Dauerhaftigkeit schließen, da Karbonatisierung und Korrosion nur langsam voranschreiten sollten.

3.3 Schwinden

Für die Schwindmessungen wurden jeweils an drei Balken des Architekturleichtbetons mit den Maßen $150\text{ mm} \cdot 150\text{ mm} \cdot 700\text{ mm}$ zwei Wegmesser mit einer Länge von 400 mm auf gegenüberliegenden Seiten angebracht und mit Messuhren mit einem Genauigkeitsbereich von $1/1000\text{ mm}$ versehen. Diese wurden über einen Zeitraum von insgesamt ca. sechs Monaten abgelesen. Am Ende der Aufzeichnungen wurde an den untersuchten Probekörpern aus Architekturleichtbeton mit Schwindreduzierer ein Schwindmaß von ca. $0,7\text{ mm/m}$ nach einem halben Jahr als Mittelwert gemessen, wobei mit einer geringfügigen weiteren Zunahme des Schwindens gerechnet werden sollte (Abbildung 12). Vergleichsmessungen ohne schwindreduzierende Zusatzmittel, bei ansonsten gleicher Zusammensetzung des Architekturleichtbetons, führten im gleichen Zeitraum zu Schwindmaßen von ca. $1,4\text{ mm/m}$ bis $1,6\text{ mm/m}$.

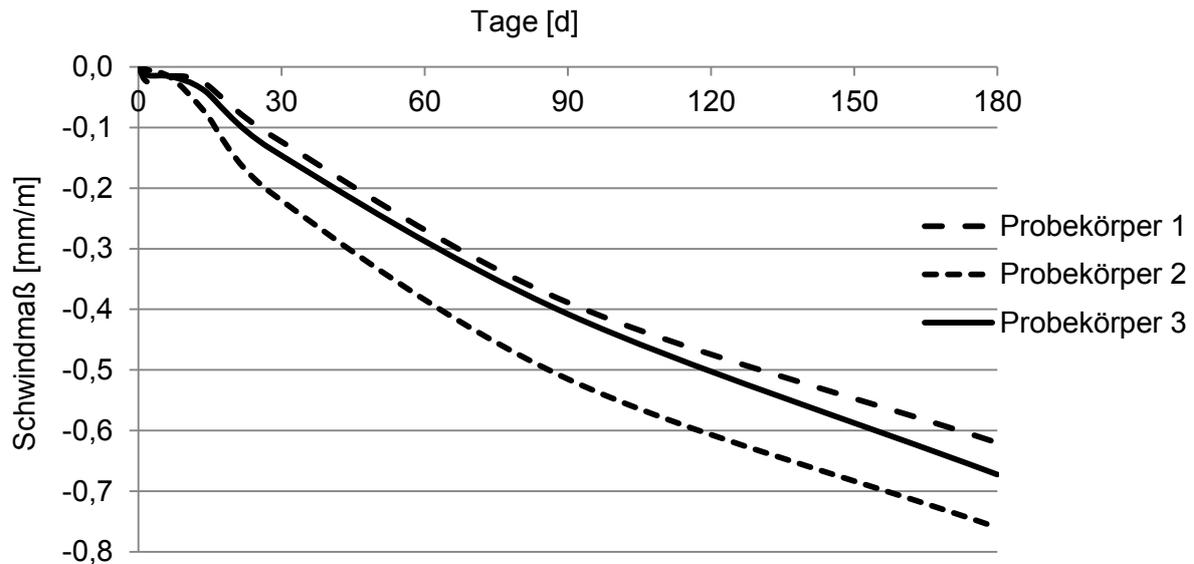


Abbildung 12: Schwindverhalten des Architekturleichtbetons

Durch den Einsatz eines schwindreduzierenden Zusatzmittels konnte das, aufgrund des hohen Anteils an geschäumter Zementmatrix und des porösen Blähglaszuschlags mit einem sehr geringen Elastizitätsmodul, erwartungsgemäß hohe Schwindmaß des Architekturleichtbetons auf etwa die Hälfte reduziert werden. Das erreichte Schwindmaß lag somit in einem Bereich, der erwartungsgemäß das Schwinden eines Normalbetons überstieg.

3.4 Wärmeleitfähigkeit

Der Wärmeleitfähigkeitswert (λ -Wert) eines Materials dient zur späteren Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) des Bauteils und damit zur Beurteilung seiner Dämmeigenschaften. Da beim Architekturleichtbeton hochwärmedämmende Eigenschaften als Anforderung gestellt wurden, musste der Leichtbeton ohne zusätzliche Maßnahmen für eine ausreichende Wärmedämmung sorgen. Der Wärmeleitfähigkeitswert (λ -Wert) eines Normalbetons liegt bei ungefähr $2,1 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$, Leichtbetone mit einer Rohdichte von ca. $800 \text{ kg}/\text{m}^3$ weisen in der Regel einen λ -Wert von ca. $0,39 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$.

Die Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen wurden von der Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied an jeweils zwei Platten aus Architekturleichtbeton mit den Maßen $50 \text{ cm} \cdot 50 \text{ cm} \cdot 3 \text{ cm}$ geprüft. Hierbei wurden bei der optimierten Betonzusammensetzung (Tabelle 1), die letztendlich zur Realisierung des Experimentalgebäudes aus Architekturleichtbeton verwendet wurde, Wärmeleitfähigkeitswerte (λ -Wert) von ca. $0,15 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ gemessen. Hieraus ergab sich ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,28 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$ bei Wandstärken von 50 cm . Der ermittelte U-Wert erfüllte somit die Anforderungen der ENEC 2009 hinsichtlich des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Außenbauteils.

Tabelle 9: Wärmeleitfähigkeit des Architekturleichtbetons

Entnahmestelle	Messung	Temperatur [°C]	Wärmeleitfähigkeit [W/(K·m)]
Laborprobe	1	30,73	0,153
	2	20,85	0,151
	3	11,00	0,149
	λ bei 10°C	10,00	0,149
Bauwerksprobe	1	30,1	0,168
	2	20,5	0,166
	3	10,8	0,164
	λ bei 10°C	10,0	0,164

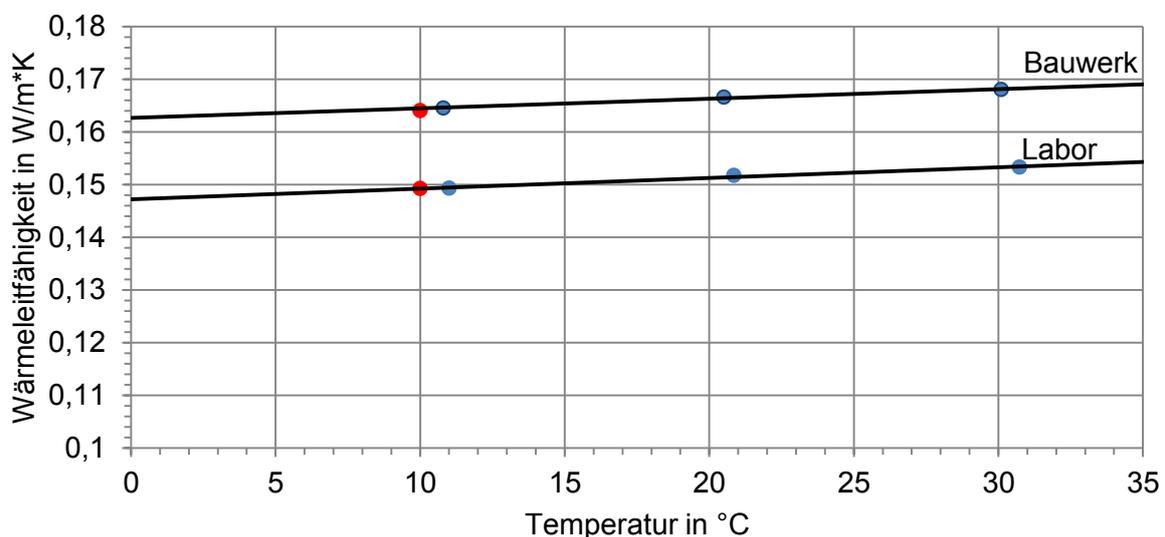


Abbildung 13: Wärmeleitfähigkeit des Architekturleichtbetons

Mit der bei 10°C gemessenen Wärmeleitfähigkeit des im Labor hergestellten Architekturleichtbetons von ungefähr 0,15 W/(K·m) ergab sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von

$$U = \frac{1}{(R_{Se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + R_{Si})} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,5}{0,15} + 0,13} = 0,28 \frac{W}{K \cdot m^2}$$

bei einer Wandstärke von 50 cm. Dies entsprach der ursprünglich in dem Forschungsvorhaben formulierten Zielsetzung, die Vorgaben der ENEC 2009 mit einem monolithischen Wandaufbau aus Architekturleichtbeton zu erfüllen.

Mit dem Einbau von 8 cm dicken Mineralschaumdämmplatten (λ -Wert: ca. 0,042 W/(K·m)), die in eine Wand des Experimentalgebäudes mittig eingebaut wurden, konnte mit einem Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von 0,2 W/(K·m²) der angestrebte

Passivhausstandard von $U = 0,2 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ erreicht werden. Durch den Einbau von Mineralschaumdämmplatten mit einer Dicke von 10 cm, die ebenfalls problemlos in die Wand eingebaut werden könnten, erreicht man den Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von unter $0,20 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ bei einer Gesamtwandstärken von 50 cm.

$$U = \frac{1}{(R_{Se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{Si})} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,21}{0,15} + \frac{0,08}{0,042} + \frac{0,21}{0,15} + 0,13} = 0,2 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}^2}$$

Vergleicht man diesen Wert mit den Kriterien der aktuellen ENEC, erfüllt ein derartiger Wandaufbau aus Architekturleichtbeton mit entsprechender mineralischer Kerndämmung die Anforderungen an den Passivhausstandard, der bei einem U-Wert von $0,20 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ liegt.

4 Bau eines Experimentalgebäudes aus Architekturleichtbeton

4.1 Allgemeines

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse sollten durch den Bau eines Experimentalgebäudes auf dem Campus der Technischen Universität Kaiserslautern aus Architekturleichtbeton auf ihre Reproduzierbarkeit und auf die Übertragungsmöglichkeiten auf Bauwerksverhältnisse überprüft werden. Der Entwurf des Forschungsgebäudes aus Architekturleichtbeton (Abbildung 14) wurde durch das Fachgebiet „Baukonstruktion II und Entwerfen“ (Fachbereich Architektur) erstellt, die Fachgebiete des Fachbereichs Bauingenieurwesen übernahmen durch das Fachgebiet „Werkstoffe im Bauwesen“ die Optimierung des Betons und Leitung der Bauausführung sowie durch das Fachgebiet „Massivbau und Baukonstruktion“ die statische Bemessung.

Das eingeschossige Forschungsgebäude aus Architekturleichtbeton, für das vom Fachgebiet „Massivbau und Baukonstruktion“ eine umfassende statische Bemessung durchgeführt wurde (siehe Anhang), konnte mit einer Grundfläche von sieben auf fünf Metern und einer Wandhöhe von nahezu vier Metern errichtet werden. Die Seiten des Dachaufbaus wurden lichtdurchlässig ausgebildet, weswegen auf seitliche Fenster in den Wänden verzichtet werden konnte.



Abbildung 14: Computeranimierte Darstellung des Gebäudes aus Architekturleichtbeton

4.2 Realisierung des Bauvorhabens mit Architekturleichtbeton

Der Baubeginn des Architekturleichtbetongebäudes erfolgte (aufgrund von erheblichen Verzögerungen bei der Erteilung der Baugenehmigung) im November 2012. Abbildung 15 zeigt die anfängliche Bauphase (Schalung, Bewehrung) des Experimentalgebäudes. Zur Optimierung der Oberflächeneigenschaften des Betons (Verbesserung der Oberflächenfestigkeit und Steigerung des Widerstandes gegen eindringendes Wasser und Gase) wurden ZemDrain-Schalungsbahnen der Fa. Frank auf die Schaltafeln aufgebracht (Abbildung 16, Nr. 1).



Abbildung 15: Bewehrungs- und Schalungsarbeiten am Experimentalgebäude

Die verwendete Bewehrung wurde vor dem Einbau verzinkt (Abbildung 15 und 16, Nr. 2). Hierdurch sollte, für den Fall, dass wider Erwarten Feuchtigkeit in den Beton eindringen sollte, ein dauerhafter Korrosionsschutz der Bewehrung sichergestellt werden. Um die Feuchtigkeits- und Temperaturverläufe im Architekturleichtbeton am Bauwerk unter natürlicher Bewitterung zu verfolgen, wurden vor dem Betonieren insgesamt zehn Messfühler (Abbildung 16, Multiringelektrode Nr. 3) an der Schalung bzw. Bewehrung befestigt, die ein dauerhaftes Monitoring der Außenbauteile in der Betonrandzone und der Mitte der Wände und Decken ermöglichen sollten.

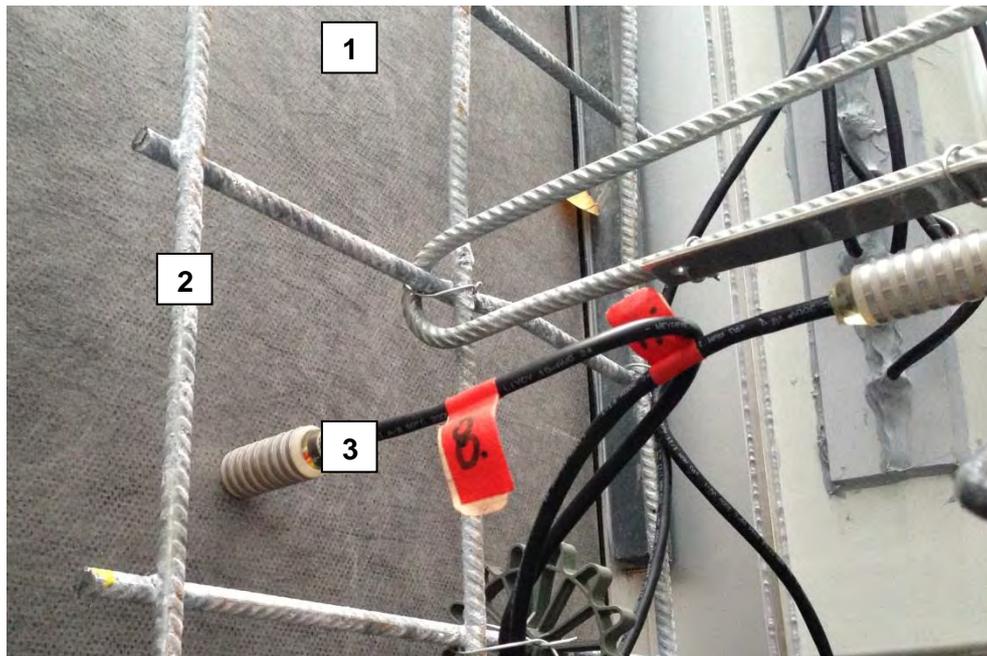


Abbildung 16: Detailaufnahme von Schalung mit Zem-Drain (1), verzinkte Bewehrung (2) und Messfühler Multiringsensorelektrode (3)

Die Herstellung des Architekturleichtbetons für das Experimentalgebäude erfolgte im Transportbetonwerk. Die verschiedenen Blähglasfraktionen (Poraver 0,25/0,5 mm, Poraver 1/2 mm, Poraver 4/8 mm) wurden mittels „Bigbags“ direkt in die Mischfahrzeuge dosiert (Abbildung 17), mit einer vorgegebenen Menge Wasser angefeuchtet und gemischt.

Die Herstellung der entsprechenden Menge des Zementleims für die Befüllung eines Transportbetonmischfahrzeugs erfolgte im Mischer des Transportbetonwerks, wobei Zement und Wasser über die Dosieranlage abgewogen bzw. abgemessen und eingebracht wurden. Die Zusatzmittel wurden anschließend während des Mischvorgangs separat zu dem Zementleim im Tellermischer zugegeben und intensiv durchmischt.



Abbildung 17: „Bigbag“-Befüllung eines Transportbetonfahrzeugs mit Blähglas

Der Zementleim wurde anschließend über den Ablass des Tellermischers in das mit den unterschiedlichen Blähglasfraktionen gefüllte Transportbetonmischfahrzeug eingefüllt (Abbildung 18). Diese Befüllprozedur hat sich als beschränkt praxistauglich erwiesen, da durch die relativ groben Einstellungsmöglichkeiten der Auslassöffnungen des Mixers Dosierverluste des dünnflüssigen Zementleims (siehe Pfeile Abbildung 18) unvermeidlich waren. Diese nicht quantifizierbaren Verluste an Zementleim müssten für eine zukünftige, praxistaugliche Verwendung des Architekturleichtbetons vermieden werden. Eine Zugabe der Blähglasfraktionen zur gesamten Betonherstellung im Tellermischer war unter dem gegebenen apparativen Mischeraufbau nicht realisierbar, da die Mischwerkzeuge des Tellermischers zu einem erheblichen „Glasbruch“ der größeren Blähglaskörnungen führen würden. Dies führte zu einer deutlichen Erhöhung der Betonrohddichte und damit zu einer Verschlechterung der angestrebten Wärmedämmeigenschaften.

Der eigentliche Mischvorgang des Architekturleichtbetons erfolgte somit im Mischfahrzeug.



Abbildung 18: Transportbetonfahrzeug (mit Blähglas) bei der Befüllung mit Zementleim

Das Betonieren des Experimentalgebäudes erfolgte durch Befüllen der Schalung mittels Betonkübel. Der fließfähige Architekturleichtbeton (Setzfließmaß > 680 mm) wurde in eigens angefertigte Aufsatzkästen (Abbildung 19, gelb) eingefüllt, an deren Unterseiten mittels Schiebern und Rohren ein gleichmäßiger Betonausfluss über die gesamte Schalungshöhe realisiert werden konnte.



Abbildung 19: Betoniervorgang mit Kübel und Aufsatzkästen (gelb)

4.3 Anmerkungen zu Architekturleichtbeton unter Praxisbedingungen

Die Herstellung des Architekturleichtbetons unter Praxisbedingungen erwies sich, im Vergleich zu Normalbeton, als zeitaufwändig und fehleranfällig. Der gerätebedingte, nicht quantifizierbare Verlust von Zementleim und darin enthaltenen Zusatzmitteln beim Befüllen der Transportbetonmischfahrzeuge führte zu einer negativen Veränderung der Frischbetoneigenschaften hinsichtlich Schaumbildung und Verarbeitbarkeit, was auch durch die nachträglich Zugabe von Fließmittel auf der Baustelle nicht vollständig ausgeglichen werden konnte. Daraus resultierte eine geringfügige Verschlechterung der selbstverdichtenden Eigenschaften, die abschnittsweise zu der in Abbildung 20 dargestellten Oberfläche führte.

Das Ziel einer ansprechenden, gleichmäßigen Sichtbetonoberfläche konnte aufgrund der vorgenannten Problematik bei dem Experimentalgebäude aus dem neu entwickelten Architekturleichtbeton nicht in allen Teilbereichen vollständig realisiert werden, da aufgrund der reduzierten Fließeigenschaften des Betons in Teilbereichen keine geschlossene Betonoberfläche hergestellt werden konnte. Grundsätzlich konnte jedoch gezeigt werden, dass hochwertige Sichtbetonoberflächen durchaus zielsicher erreichbar sind. So wurden im Rahmen des zweiten Betoniertermins zur Herstellung der oberen Wandelemente optimale Sichtbetonoberflächen erzielt, wie sie im Rahmen der Laborherstellungen realisiert wurden.



Abbildung 20: Wandfläche aus Architekturleichtbeton

Die geforderten Eigenschaften hinsichtlich Festigkeiten und Rohdichte sowie die damit zusammenhängenden Wärmedämmeigenschaften konnten erreicht werden. Zur Erzielung einer ansprechenden und gleichmäßigen Betonoberfläche wurde die gesamte Oberfläche des Experimentalgebäudes abgeschliffen. In Abbildung 21 ist das Experimentalgebäude aus Architekturleichtbeton nach Abschluss der Betonierarbeiten dargestellt.



Abbildung 21: Experimentalgebäude aus Architekturleichtbeton nach Abschluss der Betonierarbeiten

5 Bauwerksmonitoring mit Multiringensensorelektroden (MRSE)

5.1 Allgemeines zum Bauwerksmonitoring

Um die witterungsbedingte Korrosionsgefahr an einem Betonbauteil oder -bauwerk abzuschätzen und somit die Dauerhaftigkeit vorausszusagen werden Multiringelektroden zur Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone bei wasserbeaufschlagten Bauteilen eingesetzt. Die MRSE bestehen i. d. R. aus acht Edelstahlringen (Abbildung 22), die mit einem Abstand von 5 mm hintereinander angeordnet sind. Zwischen zwei Edelstahlringen ist jeweils ein Isolierring eingebaut. Durch Messung des Wechselstrom-Widerstands zwischen zwei benachbarten Ringen kann ein Widerstandsprofil über die Einbautiefe des Sensors aufgezeichnet werden, das unter Verwendung von Kalibrierkurven in ein Feuchteprofil umgerechnet werden kann. Je höher der gemessene Widerstand, desto geringer ist die Betonfeuchte. Die Feuchteaufnahme und somit auch der elektrische Widerstand des Betons hängen entscheidend von der Mikrostruktur des Zementsteins und der Porosität der Gesteinskörnung ab.



Abbildung 22: Multiringelektrode zur Feuchtebestimmung, befestigt an der Schalung

Zur Bestimmung der Temperaturverläufe wurden Temperatursensoren an einer Wand innen, außen und mittig positioniert, um das Temperaturgefälle in der Architekturleichtbetonwand aufzuzeichnen (Abbildung 23)



Abbildung 23: Temperatursensor befestigt an der verzinkten Bewehrung

In dem aus Architekturleichtbeton hergestellten Experimentalgebäude wurden insgesamt drei Temperatursensoren und sieben Multiringensensorelektroden zur Feuchtebestimmung eingebaut (Tabelle 10 und Abbildung 24).

Tabelle 10: Positionen der Temperatur- und Feuchtesensoren

Messsensor	Sensornummer	Position
Temperatursensor	1	Seitenwand, Gebäudeaußenseite
Temperatursensor	2	Seitenwand, Mitte
Temperatursensor	3	Seitenwand, Gebäudeinnenseite
Feuchtesensor (MRSE)	4	Vorderwand, Gebäudeaußenseite, unten
Feuchtesensor (MRSE)	5	Vorderwand, Gebäudeaußenseite, oben
Feuchtesensor (MRSE)	6	Seitenwand, Gebäudeaußenseite
Feuchtesensor (MRSE)	7	Seitenwand, Mitte
Feuchtesensor (MRSE)	8	Seitenwand, Gebäudeinnenseite
Feuchtesensor (MRSE)	9	Decke, Gebäudeaußenseite
Feuchtesensor (MRSE)	10	Decke, Gebäudeinnenseite

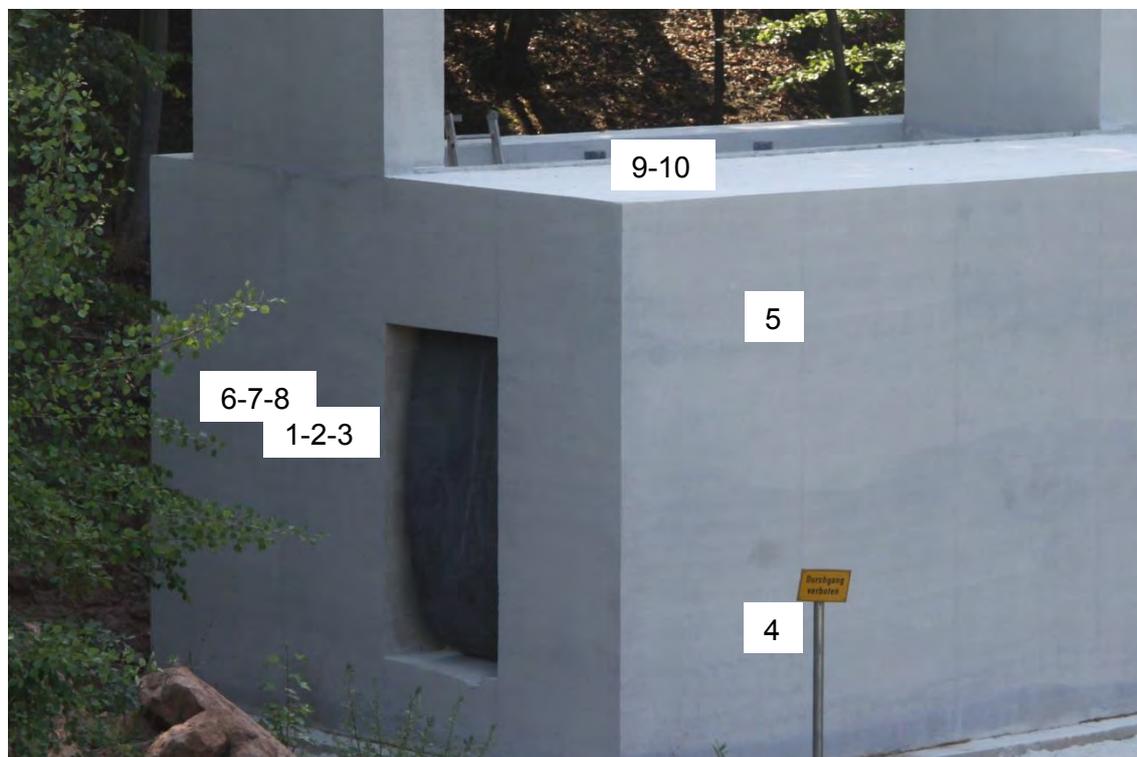


Abbildung 24: Positionen der Temperatur- (1-3) und Feuchtesensoren (4-10) im Experimentalgebäude aus Architekturleichtbeton

Die zehn Messsensoren wurden vor der Betonage an der Schalung bzw. Bewehrung befestigt. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte stündlich.

5.2 Bestimmung der Feuchteverläufe

Die Auswertung der Messdaten konnte anhand von Regressionsparametern, die am Institut für Bauforschung Aachen (ibac) bei Kalibriermessungen an gesondert hergestellten Probekörpern aus Architekturleichtbeton ermittelt wurden, durchgeführt werden. Für die Bestimmung des Feuchtegehalts wurde folgende Formel verwendet:

$$u = \frac{A}{\ln(B * \rho + C) - D} + E$$

mit: u : Wassergehalt in M.-%
 ρ : spezifischer Elektrolytwiderstand in Ωm ($\rho = 0,07 \cdot R$)
 R : gemessener Widerstand in Ω
 A - E : Regressionsparameter

Folgende, vom ibac ermittelte Regressionsparameter wurden verwendet:

A: 453,67032
 B: 11,05498
 C: -1376,93019
 D: 0,10547
 E: -23,19767

Anhand der Daten der einzelnen MRSE können prinzipiell unterschiedliche Auswertansätze gewählt werden. Für die Untersuchung der Feuchteaufnahme in der Betonrandzone wurden jeweils die einzelnen Ringe der MRSE ausgewertet und miteinander verglichen. Zur Beurteilung der Feuchteverläufe durch den gesamten Wandaufbau wurden die gesamten, gemittelten Messwerte der jeweiligen Sensoren für einen Vergleich herangezogen.

In Abbildung 25 sind die Feuchtegehalte in der Architekturleichtbetonwand in Abhängigkeit von der Position der jeweiligen Multiringensensorelektrode dargestellt. Die über sämtliche Einzelringe der MRSE gemittelten Messwerte belegen, dass der Feuchtegehalt in der Wandmitte bei einem Abstand von der Betonoberfläche von ca. 25 cm (Wanddicke 50 cm), etwa 14 Tage nach der Betonage einen nahezu konstanten Wert annahm, weitgehend unabhängig von Wetterereignissen wie Regen oder Schneefall.

Derartige Wetterereignisse wirkten in erheblichem Maße auf die Sensoren in der Betonrandzone ein und führten zu erheblichen wetterbedingten Schwankungen hinsichtlich den gemessenen Feuchtegehalten.

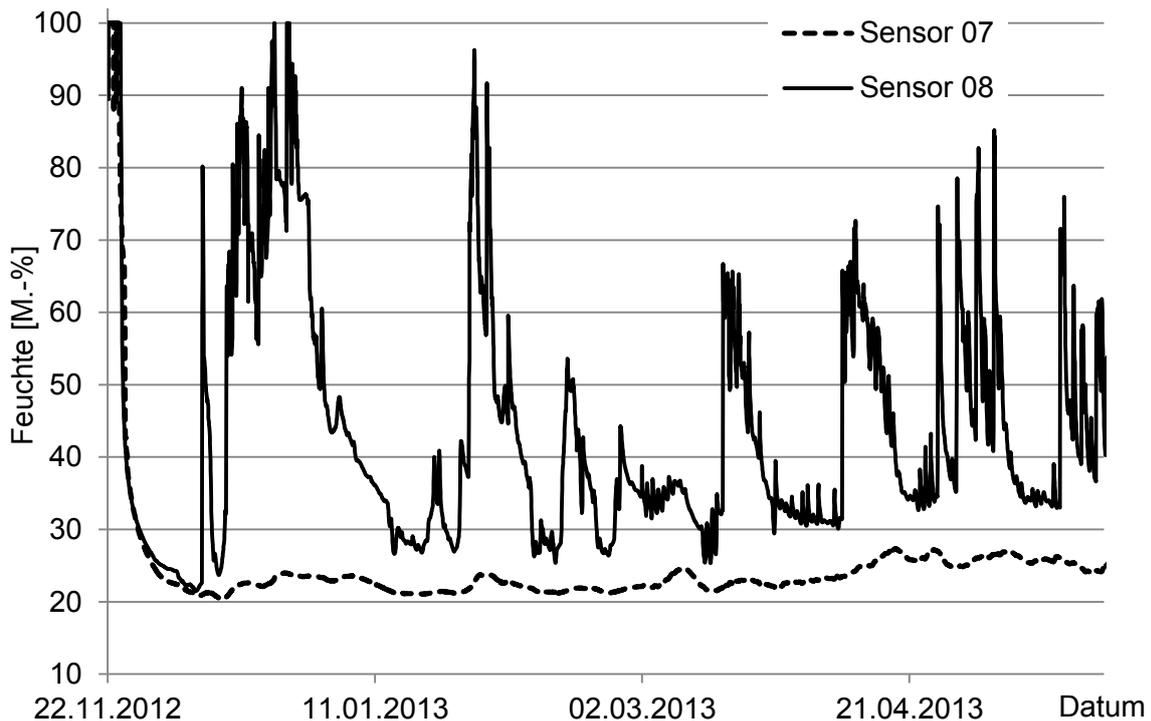


Abbildung 25: Feuchtegehalte im Architekturleichtbeton in Wandmitte (Sensor 07) und Betonrandzone (Sensor 08)

Durch Messung des Wechselstromwiderstands zwischen zwei benachbarten Ringen konnten Widerstandsprofile über die Einbautiefe der Sensoren aufgezeichnet werden, die unter Verwendung der Kalibrierdaten in detaillierte Feuchteprofile der Randzone des Architekturleichtbetons überführt werden konnten. Als repräsentatives Beispiel ist in Abbildung 27 das ermittelte Feuchteprofil des Sensors 5 aufgeführt, dessen Messbereiche in einem Abstand von ca. 5 mm für die einzelnen Ringe gleichmäßig über die Sensorlänge verteilt sind. Der Abstand des Widerstandsmessbereichs beträgt bei „Ring 1“ ca. 7 mm zur Betonoberfläche. Der innenliegende Messbereich bei „Ring 7“ liegt bei einer Betonüberdeckung von ca. 37 mm (Abbildung 26).

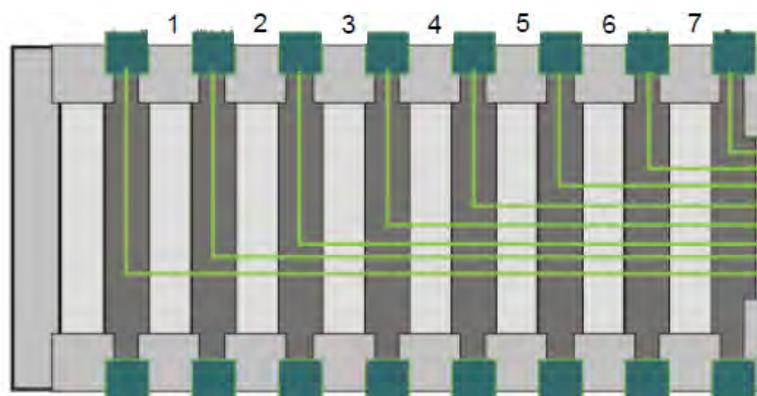


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Multiringelektrode mit Nummerierung der Messbereiche (Ring 1 bis Ring 7)

Wie in Abbildung 27 dargestellt lag der mit MRSE ermittelte Feuchtegehalt des Architekturleichtbetons erwartungsgemäß in den ersten Tagen nach der Betonage an sämtlichen Messstellen des Sensors 5 konstant bei 100 %. Die ermittelten Kurvenverläufe zeigten die unterschiedlichen Feuchtegehalte in Abhängigkeit von der Betonüberdeckung bzw. des Abstandes der Ringelektroden von der Betonoberfläche. „Ring 1“ der MRSE mit einem Messabstand von ca. 7 mm von der Betonoberfläche reagierte erwartungsgemäß am direktesten auf Feuchteeinwirkung von außen. Der innenliegende Messbereich „Ring 7“ mit einem Abstand zur Betonoberfläche von ca. 37 mm wurde nach der anfänglichen, stetigen Trocknungsperiode nur noch geringfügig von Umweltweinflüssen beeinflusst. Der Feuchtegehalt im Bereich einer Betonüberdeckung von ca. 40 mm schwankte kaum. Ab dem Messbereich „Ring 4“ (Abstand zu Betonoberfläche ca. 22 mm) konnte ein deutlicher Rückgang der wetterbedingten Feuchteschwankungen im Architekturleichtbeton festgestellt werden. Dies korrelierte mit den Werten, die man bei der Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme feststellen konnte.

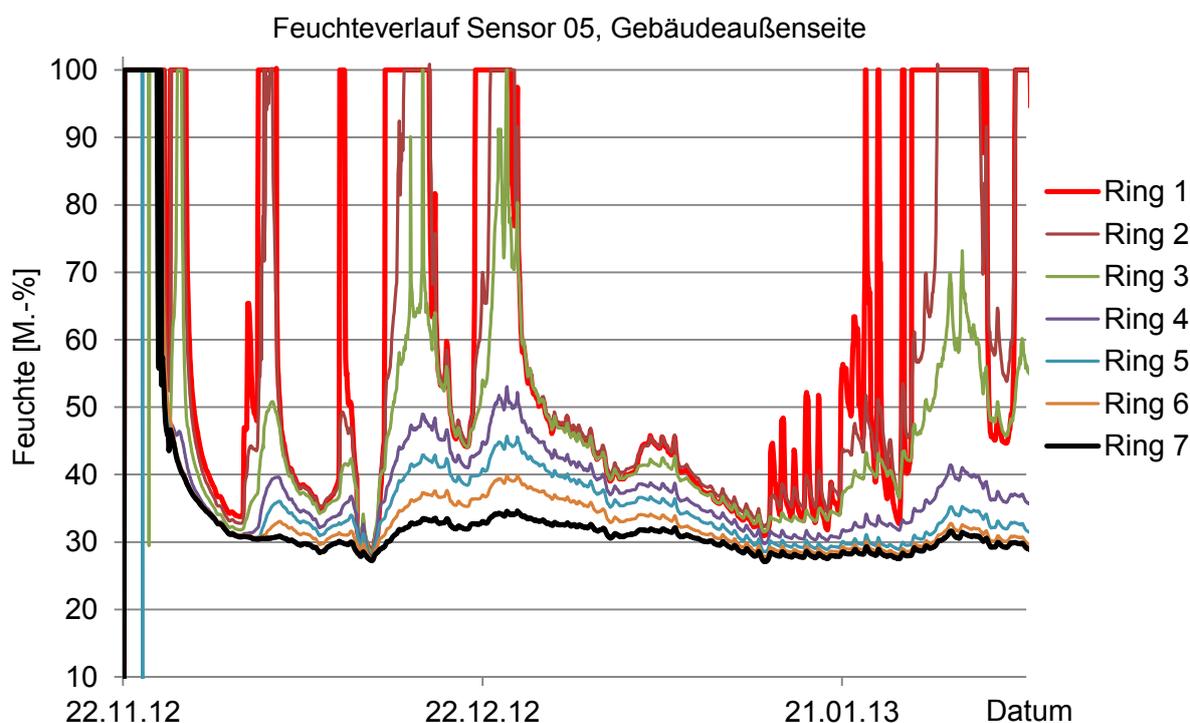


Abbildung 27: Feuchteprofil Sensor 5, Gebäudeaußenseite; Ring 1 Messbereich ca. 7 mm Abstand zur Oberfläche; Ring 7 Messbereich ca. 37 mm Abstand zur Oberfläche

Die Korrelation von Wetterereignissen mit den Feuchtegehalten des Architekturleichtbetons konnte anhand der in Abbildung 28 dargestellten Kurven aufgezeigt werden. Da sich bei den Sensoren in der Wandmitte die einzelnen Messwerte kaum unterscheiden, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit der Mittelwert des „Mittelsensors“ den einzelnen Messbereichen (A-Ring 1 bis 7) eines „Außenrandsensors“ gegenüber gestellt. Der ausgeprägte Zusammenhang zwischen Niederschlag und den Feuchtegehalten an den

äußeren Messbereichen „Ring 1“ und „Ring 2“ konnte eindeutig nachgewiesen werden. Im Gegensatz hierzu unterlagen die weiter innen liegenden Messbereiche von „Ring 4“ bis „Ring 7“ (Abstand zur Betonoberfläche von 22 mm bis 37 mm) nur vergleichsweise geringen Feuchteschwankungen. Die Feuchtwerte des in der Wandmitte liegenden Sensors zeigten nahezu keinen Einfluss bezüglich einer spontanen Änderung der Umgebungsbedingungen.

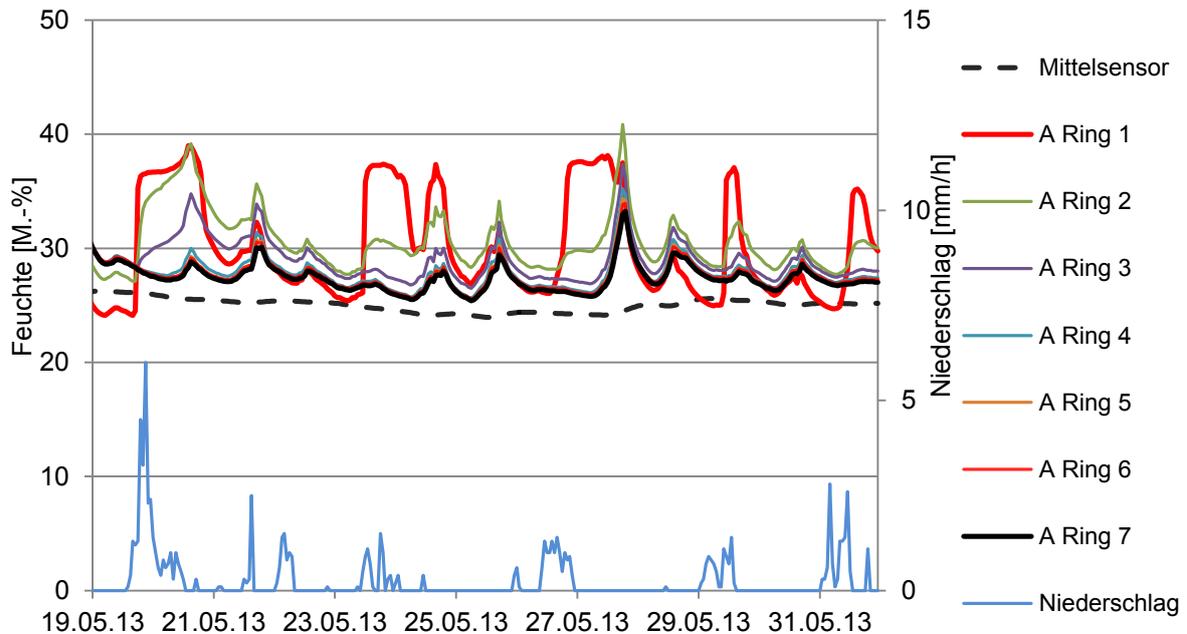


Abbildung 28: Feuchteprofil Sensor 5 (Gebäudeaußenseite) und Sensor 7 (Wandmitte) in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge

Durch die in das Experimentalgebäude aus Architekturleichtbeton eingebauten Multiringensorelektroden konnten die Zusammenhänge zwischen Wetterereignissen und Feuchtaufnahme der Außenbauteile dauerhaft aufgezeichnet und ausgewertet werden. Diesbezügliche Erkenntnisse sind entscheidend für die Beurteilung der wärmedämmenden Eigenschaften sowie der Dauerhaftigkeitsbetrachtungen, da durchfeuchtete Bauteile in beiderlei Hinsicht deutlich schlechtere Eigenschaften aufweisen. Die Untersuchungen der Feuchteverläufe haben gezeigt, dass trotz der porösen Zementmatrix und der leichten Blähglasfraktionen bei dem Baustoff Architekturleichtbeton, die ausgeprägte Feuchtigkeitszunahme nur bis zu einem Bereich von ca. 20 mm Abstand von der Betonoberfläche auftrat. Die restlichen Bereiche der insgesamt 50 cm dicken Außenwand blieben von spontanen Niederschlagsereignissen nahezu unbeeinflusst und somit hinsichtlich der wärmedämmenden Eigenschaften voll funktionstüchtig.

Der Architekturleichtbeton wurde ebenfalls für die, ohne Gefälle hergestellte Betondecke des Experimentalgebäudes verwendet. Zur Beurteilung des Wassereindringverhaltens in die Decke wurde auf eine zusätzliche horizontale Abdichtungsmaßnahme verzichtet.

In Abbildung 29 wurden die aufgezeichneten Messwerte der beiden Feuchtesensoren, die in der Decke eingebaut wurden, einander gegenübergestellt (Sensor 9: Gebäudeaußenseite; Sensor 10 Gebäudeinnenseite).

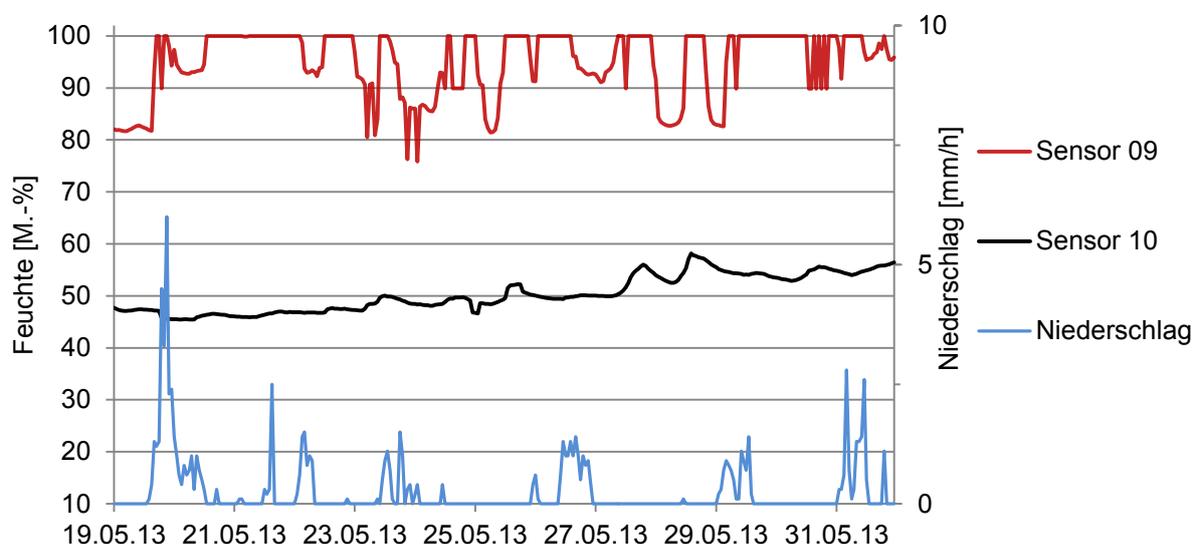


Abbildung 29: Gemittelte Feuchtwerte der Deckensensoren (Sensor 9: Deckenoberseite; Sensor 10: Deckenunterseite) in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge

Aufgrund der gefällelosen, horizontalen Ausführung der Decke bewirkten Regenereignisse eine relativ lang anhaltende Durchfeuchtung der Randzone (Sensor 9). Die wetterabgewandte Deckenunterseite wurde durch wechselhafte Bedingungen nur geringfügig beeinflusst (Sensor 10). Aufgrund der Zusammenhänge zwischen aufgenommener Feuchte und bautechnisch sinnvollen Wärmedämmeigenschaften sollte für eine in Architekturleichtbeton ausgeführte Deckenkonstruktion eine Abdichtung vorgesehen werden.

5.3 Bestimmung der Temperaturverläufe

Die Widerstandsdaten der drei, auf gleicher Wandhöhe eingebauten Temperatursensoren (Position der Sensoren siehe Abbildung 24) wurden jeweils in der Betonrandzone der Gebäudeaußenseite sowie der Gebäudeinnenseite und in der Wandmitte ermittelt.

Die Umrechnung der Widerstandsdaten in Temperaturen erfolgte nach der folgenden, vom Institut für Bauforschung Aachen (ibac) vorgegebenen Formel:

Für Temperaturen $\geq 0^\circ\text{C}$ oder 1000Ω :

$$\vartheta = \frac{3,90802 \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 5,802 \cdot 10^{-5}} - \sqrt{\frac{(3,90802 \cdot 10^{-1})^2}{4 \cdot (5,802 \cdot 10^{-5})^2} - \frac{R - 1000}{5,802 \cdot 10^{-4}}}$$

Für Temperaturen $\leq 0^\circ\text{C}$ oder 1000Ω :

$$\vartheta = 1597 * 10^{-18} * R^5 - 2951 * 10^{-15} * R^4 - 4784 * 10^{-12} * R^3 + 2613 * 10^{-8} * R^2 + 2219 * 10^{-4} * R - 241,9$$

Die gemessenen Temperaturverläufe der drei Messsonden, aufgezeichnet ab dem Herstellungstag (22.11.2012) über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten, sind in Abbildung 30 dargestellt. Das Temperaturmonitoring ermöglichte hierbei detaillierte Aussagen über die Entwicklung und den Abfluss der Hydratationswärme des Architekturleichtbetons in den ersten Wochen nach der Betonage sowie die Einflüsse der Umgebungstemperatur über den bisherigen Messzeitraum. In Abbildung 30 sind die aufgezeichneten Temperaturdaten über den bisher ausgewerteten Zeitraum mit den entsprechenden Umgebungstemperaturen dargestellt (Sensor 1: Betonrandzone Gebäudeaußenseite, Sensor 2: Wandmitte, Sensor 3: Betonrandzone Gebäudeinnenseite).

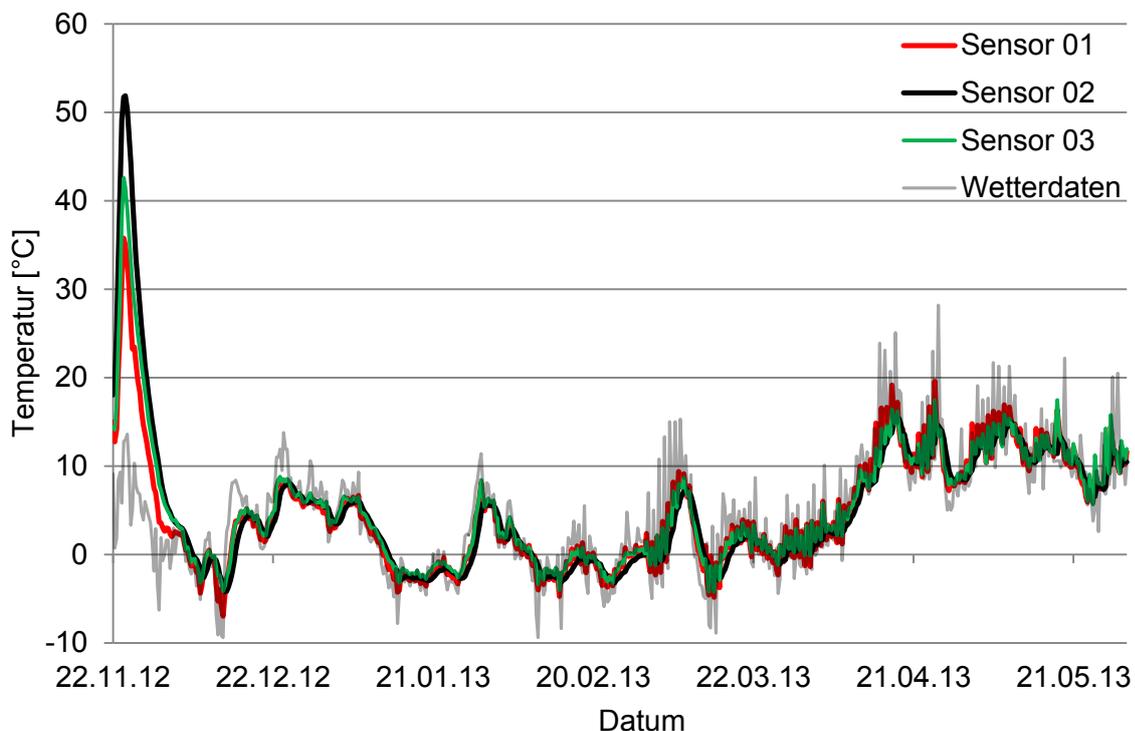


Abbildung 30: Temperaturdaten Wand und Umgebung, (Sensor 1: Betonrandzone Gebäudeaußenseite, Sensor 2: Wandmitte, Sensor 3: Betonrandzone Gebäudeinnenseite)

Innerhalb der ersten beiden Tage stieg die Temperatur, infolge der Entwicklung der Hydratationswärme, stark an. Die Temperaturen stiegen hierbei auf ca. 50°C an, was im Vergleich zu den gemessenen Höchstwerten aus den Vorversuchen mit Hochofenzementen von bis zu 70°C als sehr zufriedenstellende Höchsttemperatur zu bewerten war. Im nachfolgenden sank die Temperatur aufgrund der niedrigen Außentemperaturen und der nachlassenden Hydratationswärme innerhalb von ca. 9 Tagen um etwa 50°C ab.

Etwa zwei Wochen nach der Herstellung der Betonwände und nach dem Abklingen der Hydratationswärme folgten die in der Wand aus Architekturleichtbeton ermittelten Messwerte nahezu den Umgebungstemperaturen. Die jeweiligen „Umgebungstemperaturspitzen“, die durch die Schwankungen der Tag-/Nachttemperaturen auftraten, waren je nach Lage der Messstelle in der Wand (Randbereich oder Mitte) aus Architekturleichtbeton bei der Aufzeichnung der Temperaturdaten deutlich vermindert bzw. nur wenig ausgeprägt.

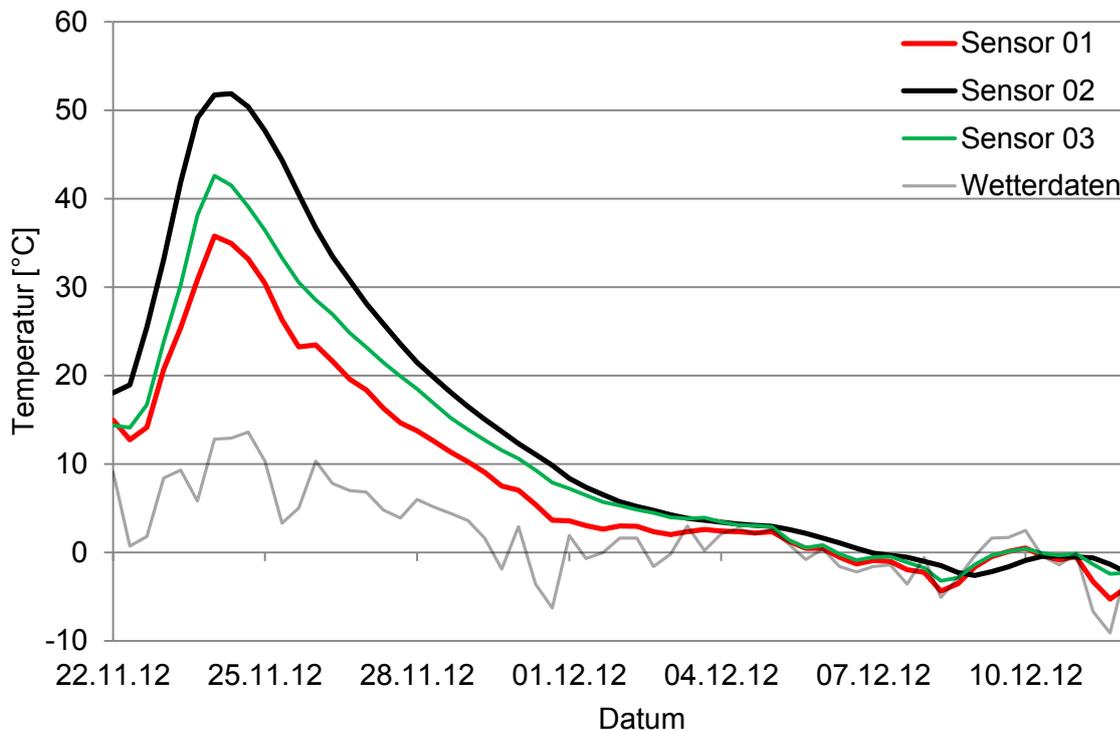


Abbildung 31: Temperaturdaten Wand und Umgebung, (Sensor 1: Betonrandzone Gebäudeaußenseite, Sensor 2: Wandmitte, Sensor 3: Betonrandzone Gebäudeinnenseite); Zeitraum: 3 Wochen nach Betonage

Zur Beurteilung der Temperaturverläufe in der Architekturleichtbetonwand im Vergleich zu den Umgebungstemperaturen wurden die folgenden, ausgewählten Zeiträume bei Winter- und Frühjahrstemperaturen untersucht. Bei dem in der Betonrandzone eingebauten Sensor 1 war deutlich erkennbar, dass trotz des geringen Abstandes zur Betonoberfläche die wetterbedingten Temperaturschwankungen in erheblichem Maße verringert wurden (Abbildung 32). Die in der Betonrandzone liegende Messstelle 1 des Sensors 1 zeigte noch relativ ausgeprägte Temperaturschwankungen in Analogie zu den Umgebungsbedingungen. Mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche waren deutlich geringere Einflüsse von der Außentemperatur feststellbar, wie zum Beispiel am Kurvenverlauf der Messstelle 7 (Abstand zur Oberfläche ca. 40 mm) in Abbildung 32 gezeigt werden konnte.

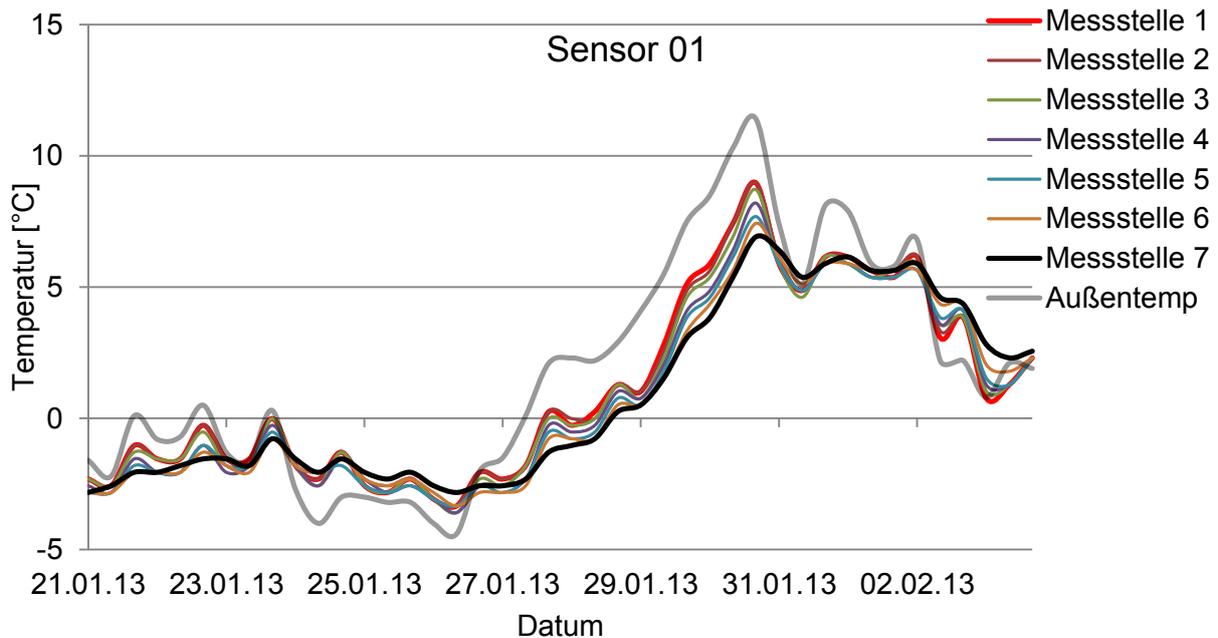


Abbildung 32: Umgebungstemperaturen und Temperaturen der Betonrandzone

Der in Abbildung 33 dargestellte Temperaturverlauf wurde mit dem in der Wandmitte positionierten Sensor 2 aufgezeichnet. Deutlich erkennbar waren die geringen Einflüsse von zeitlich kurzen Temperaturschwankungen, wie z. B. Tag/Nacht-Temperaturunterschiede. Erst länger anhaltende Temperatursteigerungen führten zu zeitlich verzögerten Anstiegen der gemessenen Temperaturen in der Wandmitte.

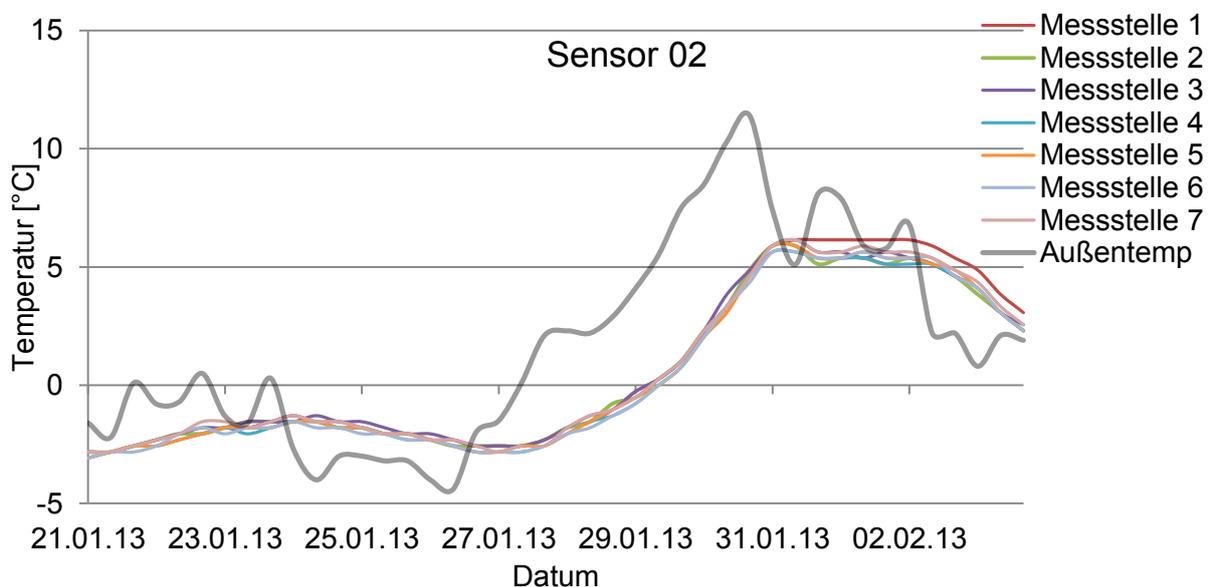


Abbildung 33: Umgebungstemperaturen und Temperaturen in der Wandmitte

Im zweiten ausgewählten Beobachtungszeitraum waren deutlich höhere Schwankungen zwischen Tages- und Nachttemperaturen vorhanden. Die aufgezeichneten Temperaturdaten des in der Betonrandzone eingebauten Sensors 1 zeigten auch hier wieder eine deutliche Abhängigkeit von der Betonüberdeckung. Während die Messwerte der oberflächennahen Messstelle 1 dem Verlauf der Umgebungstemperatur nur „leicht gedämpft“ folgten, war bei

der ca. 40 mm von der Betonoberfläche entfernten Messstelle 7 ein ausgeprägte Abschwächung des Temperatureinflusses aufgezeichnet worden (Abbildung 34).

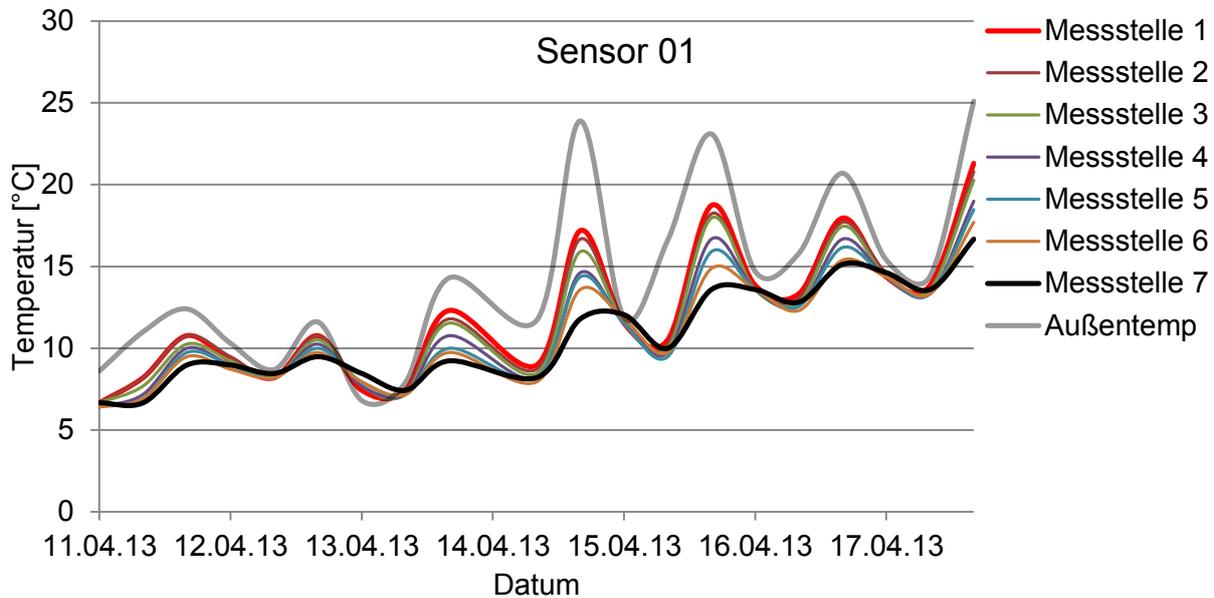


Abbildung 34: Umgebungstemperaturen und Temperaturen der Betonrandzone

Der in der Wandmitte liegende Temperatursensor 2 zeigte keinen nennenswerten Einfluss der Tag-/Nachttemperaturschwankungen auf die ermittelten Werte. Lediglich der stetige Anstieg der mittleren Tagestemperaturen bewirkte einen zeitlich verzögerten Anstieg der Betontemperatur in der Wandmitte (Abbildung 35).

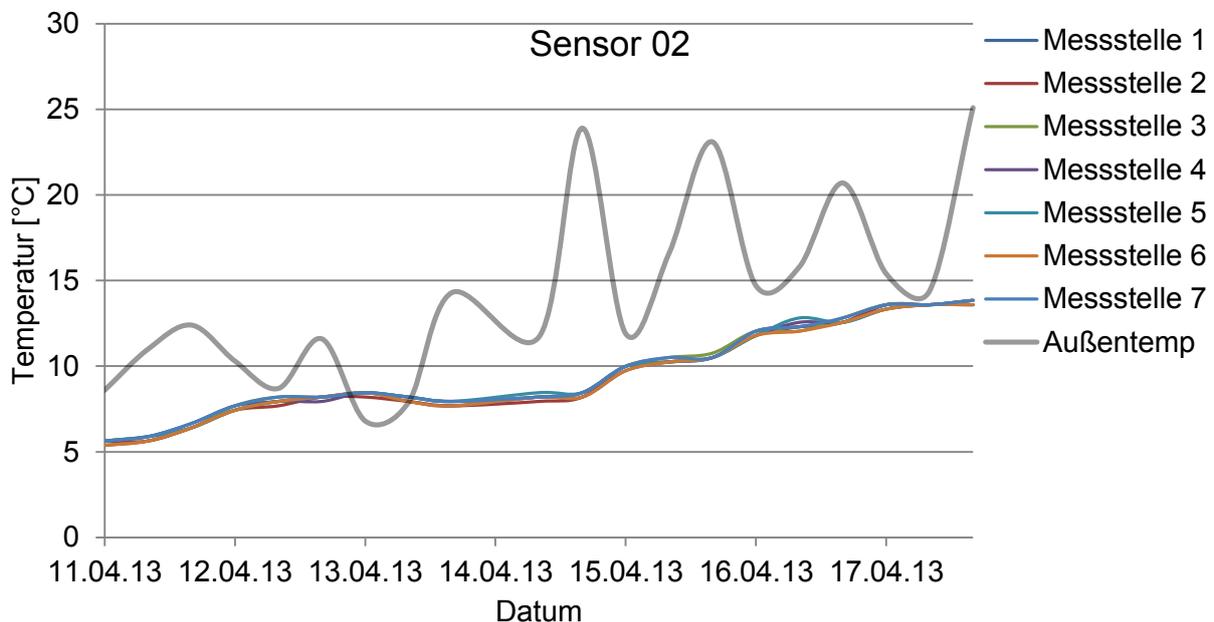


Abbildung 35: Umgebungstemperaturen und Temperaturen in der Wandmitte

Eine endgültige Beurteilung der Feuchte- und Temperaturverläufe sowie eine detaillierte Aussage bezüglich der damit zusammenhängenden Wärmedämmeigenschaften kann erst nach der Schließung der Gebäudehülle des Experimentalgebäudes durch eine Fortführung des Bauwerksmonitorings erfolgen.

6 Zusammenfassung

Die Kombination der physikalischen Eigenschaften eines hochwärmedämmenden Leichtbetons mit den optischen Eigenschaften eines modernen Architekturbetons ermöglicht Bauwerke, bei denen der Ausdruck des Baustoffs Beton mit den energetischen Anforderungen an Außenbauteile vereint werden kann. An der Technischen Universität Kaiserslautern wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens ein Architekturleichtbeton entwickelt, der den bautechnischen Zielformulierungen des Projektanforderungsprofils hinsichtlich Frisch- und Festbetoneigenschaften genügte. Mit diesem neu entwickelten Architekturleichtbeton wurde ein Experimentalgebäude (Small House I) auf dem Gelände der Technischen Universität Kaiserslautern verwirklicht, bei dem die bisher im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse auf die Übertragungsmöglichkeiten auf Bauwerksverhältnisse überprüft wurden. Des Weiteren wurde durch Aufzeichnung und Auswertung von Umwelteinwirkungen (Temperatur, Feuchtigkeit) auf den Werkstoff eine Aussage über Feuchtegehalte und Temperaturgradienten der Wände bei natürlicher Bewitterung möglich. Durch eine Fortführung des Bauwerksmonitorings sollen zukünftig die tatsächlichen Wärmedämmeigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Architekturleichtbetons bei natürlicher Bewitterung beurteilt werden.

Die zu entwickelnde Zusammensetzung des Architekturleichtbetons musste widersprüchliche Anforderungen, wie z. B. ausreichende Druckfestigkeit bei geringer Rohdichte sowie geringe Wasseraufnahme trotz aufgeschäumter Zementmatrix erfüllen. Als Bindemittel kam ein Hochofenzement CEM III/B 32,5 N mit langsamer Hydratationswärmeentwicklung zum Einsatz, da aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Architekturleichtbetons, die entstehende Hydratationswärme nur sehr langsam abgeführt wurde. Die angestrebten Eigenschaften hinsichtlich Wasseraufnahme und Wärmeleitfähigkeit konnten mit einem Leichtzuschlag aus industriell aufgeblähtem Recyclingglas mit nahezu geschlossener Kornoberfläche realisiert werden. Um eine stetige Sieblinie zu erhalten, wurden drei unterschiedliche Blähglas-Fractionen mit den Korngrößen 0,25/0,5 mm, 1/2 mm und 4/8 mm verwendet. Die gewünschten Betoneigenschaften zum Erreichen von selbstverdichtenden Fließ Eigenschaften ohne Entmischung wurden durch den Einsatz eines PCE-Fließmittels in Kombination mit einem Stabilisator erreicht. Die angestrebte Trockenrohichte ($< 700 \text{ kg/m}^3$) erforderte die Anwendung eines Schaumbildners zum Aufschäumen der Zementmatrix. Zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit wurden des Weiteren schwindreduzierende und hydrophobierende Zusatzmittel zugegeben, wodurch das Schwinden und die Wasseraufnahme im Vergleich zu Betonzusammensetzungen ohne die entsprechenden Zusatzmittel jeweils um etwa die Hälfte reduziert werden konnte.

Der im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens entwickelte und letztendlich bei dem Experimentalgebäude verwendete, selbstverdichtende Architekturleichtbeton wies ein Setzfließmaß von ca. 680 mm bis 700 mm und eine Frischbetonrohichte von ca. 720 kg/m^3 bis 740 kg/m^3 auf. Bei Trockenrohichten deutlich unter 700 kg/m^3 wurde eine 28-Tage-Druckfestigkeit von 6,3 MPa (56 d: 8,7 MPa; 90 d: 9,2 MPa) und ein Elastizitätsmodul von ca. 3,5 GPa nach 28 Tagen (180 d: 4,0 GPa) ermittelt. Die als vergleichsweise gut zu bezeichnende Gaspermeabilität lag trotz der geschäumten Zementmatrix in der

Größenordnung eines Normalbetons mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,7$, wohingegen die kapillare Wasseraufnahme aufgrund des hydrophobierenden Zusatzmittels noch unterhalb eines durchschnittlichen Normalbetons lag.

Die wichtigste Anforderung an den zu entwickelnden Leichtbeton waren seine Eigenschaften hinsichtlich Wärmedämmung, wobei letztendlich ein Wärmeleitfähigkeitswert des Architekturleichtbetons von etwa $\lambda = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erreicht werden konnte. Hieraus ergab sich ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $0,28 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ bei den hier verwendeten Wandstärken von 50 cm. Der ermittelte U-Wert erfüllt somit die Anforderungen der ENEC 2009 hinsichtlich des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Außenbauteils.

Mit Mineralschaumplatten zur Kerndämmung, die in einer Wand des Experimentalgebäudes eingebaut wurden, konnte ein U-Wert von $0,2 \text{ W/(K}\cdot\text{m}^2)$ erreicht werden.

Zum Abschluss des Projekts erfolgte der Bau eines Experimentalgebäudes auf dem Gelände der Technischen Universität mit den Maßen 7 m x 5 m x 4 m, bei dem sowohl Wände als auch Gebäudedecke aus Architekturleichtbeton bestehen. Die Betonherstellung fand im Transportbetonwerk statt, wobei die verschiedenen Blähglasfraktionen mittels „Bigbags“ direkt in die Mischfahrzeuge dosiert wurden. Nach Zugabe des Zementleims wurde intensiv im Mischfahrzeug gemischt und der selbstverdichtende Architekturleichtbeton mit Kübeln ohne weitere Verdichtung eingebaut. Anschließend wurden zur Beurteilung der Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe in den Wänden und der Decke des Bauwerks aus Architekturleichtbeton die entsprechenden Daten durch Multiringensorelektroden (MRSE) aufgezeichnet und ausgewertet.

7 Weiteres Vorgehen und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse der Laboruntersuchungen wurden durch den Bau eines Experimentalgebäudes aus Architekturleichtbeton auf ihre Reproduzierbarkeit und Übertragungsmöglichkeiten auf Bauwerksverhältnisse überprüft.

Die Festigkeitseigenschaften bzw. -entwicklung des unter Praxisbedingungen hergestellten und verarbeiteten Betons wurden bislang zu einem Probenalter von 180 Tagen geprüft. Ein fortzuführendes, intensives Bauwerksmonitoring soll nach dem Schließen der Gebäudehülle eine abschließende Aussage über die tatsächlichen Wärmedämmeigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Architekturleichtbetons bei natürlicher Bewitterung ermöglichen.

8 Literatur

- [1] DIN EN 206-1:2001-07 Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [2] DIN EN 12390-6:2010-09 Prüfung von Festbeton; Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern
- [3] DIN 1045-1:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [4] DIN EN ISO 15148:2003-03 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- [5] DIN EN 12390-8:2009-07 Prüfung von Festbeton; Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck
- [6] DAfStb-Heft 422:1991 Prüfung von Beton, Empfehlung und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048
- [7] Jacobs, F. P.: Permeabilität und Porengefüge zementgebundener Werkstoffe, Dissertation ETH Zürich Nr.10818, 1994

Anhang I

Tabelle A1: Nicht zielführende Versuche und Ausgangsmaterialien bei der Entwicklung des hochwärmedämmenden Architekturleichtbetons

Getestete Variationen der Ausgangsmaterialien für Architekturleichtbeton	Bemerkung
Zement: CEM II A-LL 32,5 R CEM II A-S 42,5 N Weißzement CEM I 42,5 R	Die aufgeführten Zemente führten, im Gegensatz zu dem letztendlich verwendeten CEM III/B 32,5 N, zu einer erhöhten Hydratationswärmeentwicklung, bis zu Extremwerten von über 100 °C Kerntemperatur (Weißzement) bei einer Bauteildicke von 50 cm.
Leichte Gesteinskörnungen: Bims: verschiedene Körnungen als Ergänzung bzw. teilweisen Ersatz des Blähglasanteils Blähton: verschiedene Körnungen zum anteiligen bzw. vollständigen Ersatz des Blähglasanteils	Die erreichten Verarbeitungseigenschaften sowie die erzielten Rohdichten entsprachen nicht den formulierten Anforderungen.
Zusatzstoffe: Zugabe von Silicasuspension mit und ohne Reduktion des Zementgehalts Zugabe von Flugasche mit und ohne Reduktion des Zementgehalts	Insgesamt eher negative Einflüsse auf die Rohdichte und keine nennenswerte Verbesserung der Festigkeitseigenschaften.
Zusatzmittel: Schaumbildner	Bei den durchgeführten Untersuchungsreihen konnten nur die Betonzusammensetzungen mit Schaumbildner die Anforderungen hinsichtlich der Rohdichte erfüllen
Zusatzmittel: Schwindreduzierer	Betone, die ausschließlich mit leichter Gesteinskörnung und aufgeschäumter Zementmatrix hergestellt werden, neigen zu ausgeprägten Schwindeigenschaften. Vergleichsmischungen ohne Schwindreduzierer erreichten inakzeptable Schwindwerte bis zu 1,5 mm/m nach 90 Tagen.
Zusatzmittel: Fließmittel Stabilisierer	Zur Erreichung der geforderten selbstverdichtenden Eigenschaften ohne Entmischung sind die ermittelten Zugabemengen der Zusatzmittel exakt einzuhalten.

Anhang II

Statische Berechnung des Experimentalgebäudes (Small House I) aus Architekturleichtbeton auf dem Gelände der Technischen Universität Kaiserslautern, angefertigt durch das Fachgebiet „Massivbau und Baukonstruktion“ (Prof. Schnell) der Technischen Universität Kaiserslautern

Statische Berechnung



Bauherr:

Technische Universität Kaiserslautern

Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 47

67663 Kaiserslautern

Vertreten durch: Kanzler der TU Kaiserslautern, Herr Stefan Lorenz

Bauvorhaben:

Neubau eines Großdemonstrators „Infraleichtbeton im Hochbau“ an der Technischen Universität Kaiserslautern

Verfasser:

Dipl.-Ing. Torsten Weiler

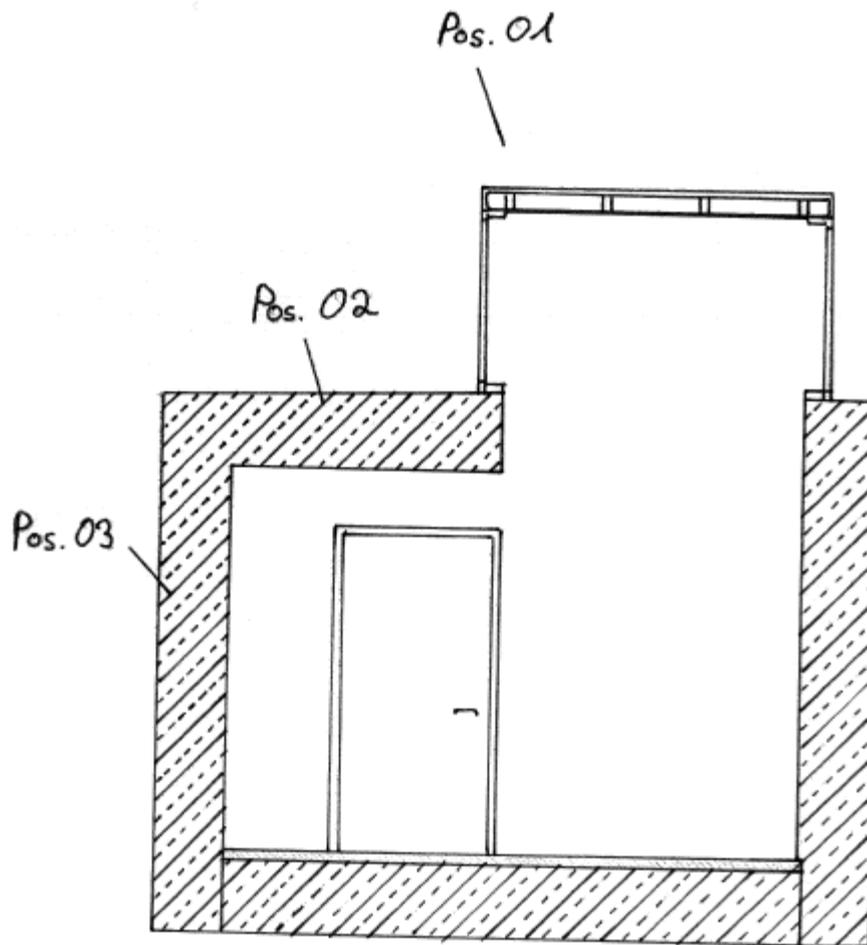
Technische Universität Kaiserslautern

Paul-Ehrlich-Str., Gebäude 14

67663 Kaiserslautern

Datum:

03.12.2012

Positionenplan

Pos. 01: Holzdachaufbau

Pos. 02: Leichtbeton - Flachdach bzw -decke

Pos 03: Leichtbeton - Außenwand

Inhalt

Titelblatt, Inhalt und Vorbemerkungen

Pos. 01 Statische Berechnung Dachkonstruktion

Pos. 02 Statische Berechnung Leichtbeton – Flachdach bzw. –decke

Pos. 03 Leichtbeton – Außenwand

Anlagen

Vorbemerkungen

Das Projekt „Small House I“ der TU Kaiserslautern beschäftigt sich mit den praktischen Einsatzmöglichkeiten des Werkstoffes Leichtbeton im Bauwesen. Der Baustoff stellt eine einzigartige Verbindung zwischen hervorragender Wärmedämmung und rationell einsetzbarem Konstruktionsmaterial dar. Ziel des Vorhabens ist es, eine neuartige Betonmischung zu finden und zum praktischen Einsatz zu bringen, die hochwärmedämmenden Beton als Sichtbeton im bewitterten Außenbereich realisierbar macht. Die Einsatzmöglichkeiten des konventionellen Leichtbetons wurden bereits von verschiedenen Architekten und Bauingenieuren in exemplarischen Einzelgebäuden untersucht und bewiesen. Eine rationelle Fertigung hochwärmedämmender Wände aus Leichtbeton ist in einem größeren Umfang bisher jedoch nicht erfolgt. Als problematisch erwiesen sich in der Vergangenheit das starke Schwinden und die hohen Temperaturen während des Abbindeprozesses.

Das Forschungsgebäude „SMALL HOUSE I“ soll die Leistungsfähigkeit des Baustoffes Leichtbeton als Gebäudehülle in Massivbauweise veranschaulichen. Die spezielle und neuartige Betonrezeptur aus natürlichem Bims und Blähglas aus Recyclingmaterial vereint ökologische Gesichtspunkte bzgl. der Ausgangsmaterialien mit den hervorragenden thermischen Eigenschaften der Leichtbetonmassivwände.

Unter Ausnutzung der heute zur Verfügung stehenden betontechnologischen Möglichkeiten (z. B. moderne Betonzusatzmittel) wird auch eine Reduzierung der unvermeidlichen Schwindproblematik angestrebt.

Das geplante Modellvorhaben untersucht die Einsatzmöglichkeiten der oben genannten Bauweise anhand eines kleinen Forschungsgebäudes.

Aufgrund des neuartigen und noch zu erforschenden Werkstoffs werden im Zuge der statischen Berechnung zahlreiche Annahmen auf der sicheren Seite liegend getroffen.

Pos. 01: Holzdachaufbau

Ausführung:

- Konstruktiv mit zimmermannsmäßigen Verbindungen

Pos. 02: Leichtbeton – Flachdach bzw. –decke

Lastermittlung für Pos. 02 infolge Pos. 01

Lasteinzugsfläche siehe Anlage I

- Schneelast nach DIN EN 1991-1-3 auf Pos.

Bauwerksstandort Kaiserslautern (269 ü. NN) → Schneelastzone 2

Charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Boden

$$s_k = 0,25 + 1,91 * \left[\frac{269+140}{760} \right]^2 = 0,80 \text{ kN/m muss } \geq \underline{0,85 \text{ kN/m}^2} \text{ (maßgebend)}$$

Schneelast auf dem Flachdach

$$\alpha = 0 \leadsto \mu_1 = 0,8$$

$$\rightarrow s = \mu_1 * s_k = 0,8 * 0,85 = \underline{0,68 \text{ kN/m}^2}$$

Einzellast aus Schneelast mittels Einzugsfläche (Anlage I)

$$F_{s,k} = 0,68 \text{ kN/m}^2 * 1,6 \text{ m} * 1,2 \text{ m} = \underline{1,31 \text{ kN}}$$

- Einzellast der Kerto-Q-Verbundplatten

Dicke $d = 3 \text{ cm}$

Wichte $\gamma_k = 5 \text{ kN/m}^3$

$$F_{KVP,k} = 5,0 \text{ kN/m}^3 * 0,03 \text{ m} * 1,6 \text{ m} * 1,2 \text{ m} * 2 = \underline{0,58 \text{ kN}}$$

- Einzellast durch Dämmplatten

$d = 10 \text{ cm}$

$\gamma_D = 1,15 \text{ kN/m}^3$

$$F_{DP,k} = 1,15 * 1,6 \text{ m} * 1,2 \text{ m} * 0,1 \text{ m} = \underline{0,22 \text{ kN}}$$

- Einzellast durch Längsträger (Kiefer)

$$b/h = 8 / 10 \text{ cm}$$

$$\gamma_K = 5 \text{ kN/m}^3$$

$$F_{L,k} = 3 * (5 \text{ kN/m}^2 * 6,4 \text{ m} * 0,08 \text{ m} * 0,1 \text{ m}) * \underbrace{\frac{1,6 \text{ m} * 1,2 \text{ m}}{6,4 \text{ m} * 2,4 \text{ m}}}_{12,5 \%} = \underline{0,10 \text{ kN}}$$

- Einzellast durch Querschotte

$$d = 3 \text{ cm}$$

$$\gamma_K = 5 \text{ kN/m}^3$$

$$F_{QS,k} = 2 * (2,4 \text{ m} * 1,5 \text{ m} * 0,03 \text{ m} * 5 \text{ kN/m}^3) * 0,5 = \underline{0,54 \text{ kN}}$$

- Einzellast durch Fensterverglasung

$$\gamma_{GL} = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$d = 1,8 \text{ cm}$$

$$F_{FG,k} = 2 * (6,4 \text{ m} * 1,25 \text{ m} * 0,018 \text{ m} * 25 \text{ kN/m}^3) * 0,125 = \underline{0,90 \text{ kN}}$$

- Einzellast durch Stahleinbauteil

Gewicht ca. 20 kg

$$F_{St,k} = \underline{0,20 \text{ kN}}$$

- Einzellast durch Bitumenabdichtungsbahn

$d = 0,3 \text{ cm}$

$$\gamma_{Bi} = 12 \text{ kN/m}^3$$

$$F_{Bi,k} = 6,4 \text{ m} * 2,4 \text{ m} * 0,003 \text{ m} * 12 \text{ kN/m}^3 * 0,125 = \underline{0,07 \text{ kN}}$$

- Ständige Einwirkungen gesamt:

$$\begin{aligned} F_{g,k} &= F_{KVP,k} + F_{DP,k} + F_{Lt,k} + F_{QS,k} + F_{FG,k} + F_{St,k} + F_{Bi,k} \\ &= 0,58 \text{ kN} + 0,22 \text{ kN} + 0,10 \text{ kN} + 0,54 \text{ kN} + 0,90 \text{ kN} + 0,20 \text{ kN} + 0,07 \text{ kN} = \underline{2,61 \text{ kN}} \end{aligned}$$

- Veränderliche Einwirkungen gesamt:

$$F_{q,k} = F_{s,k} = \underline{1,31 \text{ kN}}$$

- Gesamteinzellast aus Position (siehe auch stat. System S.10)

$$\begin{aligned} F_{d,ges} &= \gamma_g * F_{g,k} + \gamma_q * F_{s,k} \\ &= 1,35 * 2,61 \text{ kN} + 1,5 * 1,31 \text{ kN} = \underline{5,50 \text{ kN}} \end{aligned}$$

Lastermittlung für Pos. 02

- Eigenlast Leichtbetondecke

$d = 0,50 \text{ m}$; $\gamma_{L,c} = 11,5 \text{ kN/m}^3$ (Tab. 11.1 DIN EN 1992-1-1: 2011-01; bewehrter Leichtbeton)

$$g_{L,c,k} = 0,5 * 11,5 = \underline{5,25 \text{ kN/m}^2}$$

- Schneelast nach DIN EN 1991-1-3: 2010-12

Charakteristische Schneelast

$$s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$$

Formbeiwert der Schneelast

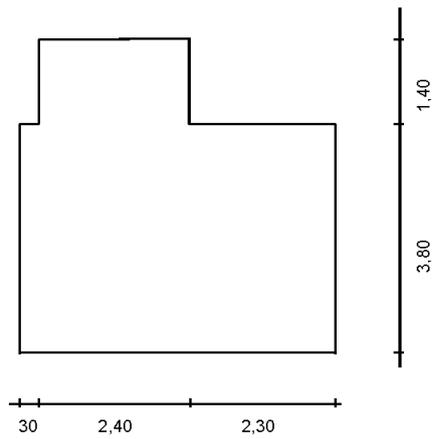
$$\mu = 0,80$$

- * Schneelast auf dem Dach

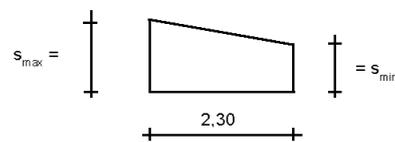
$$s_i = \underline{0,68 \text{ kN/m}^2}$$

- * Verwehungen an Wänden und Aufbauten

Höhe des Aufbaus	$h = 1,40 \text{ m}$
Länge des Verwehungsteils	$l_s = 5,00 \text{ m}$
Wichte des Schnees	$\gamma = 2,00 \text{ kN/m}^3$
Formbeiwerte	$\left. \begin{array}{l} \mu_1 = 0,80 \\ \mu_2 = 2,00 \end{array} \right\} \Delta \mu_w = 1,20$ \rightarrow (Formbeiwert nur „Verwehung“)
maximale Schneelast	<u>$s_i = 1,70 \text{ kN/m}^2$</u> (maßgebend)
* Höhengsprünge an Dächern	
Höhensprung	$h = 1,40 \text{ m}$
Breite tiefer liegendes Dach	$b_2 = 2,30 \text{ m}$
Breite höher liegendes Dach	$b_1 = 2,40 \text{ m}$
Neigung tiefer liegendes Dach	$\alpha_2 = 0^\circ$
Länge des Schneekeils	$l_s = 5,00 \text{ m}$
Formbeiwert tiefer liegendes Dach	$\mu_1 = 0,80$
Formbeiwert aus Abrutschen	$\mu_s = 0,00$
Formbeiwert aus Verwehung	$\mu_w = \frac{b_1 + b_2}{2 \cdot h} = \frac{2,3 \text{ m} + 2,4 \text{ m}}{2 \cdot 1,4 \text{ m}} = 1,68$
Max. Formbeiwert	$\mu_2 = 1,68 \rightarrow \Delta \mu_H = 0,88$ (Formbeiwert nur Höhengsprung)
Max. Schneelast	$s_i = 1,43 \text{ kN/m}^2$



$$s_{\max} = \begin{cases} \mu_W * S_k \\ \mu_1 * S_k \end{cases}$$



→ Max. Schneelast

$$s_{\max} = \underline{1.70 \text{ kN/m}^2}$$

$$s_{\min} = \underline{1.23 \text{ kN/m}^2}$$

- Lotrechte Nutzlast für die Decke nach DIN EN 1991-1-1 / NA, Tab. 61 DE

Annahme (auf der sicheren Seite liegend):

Kategorie A1 – Spitzböden

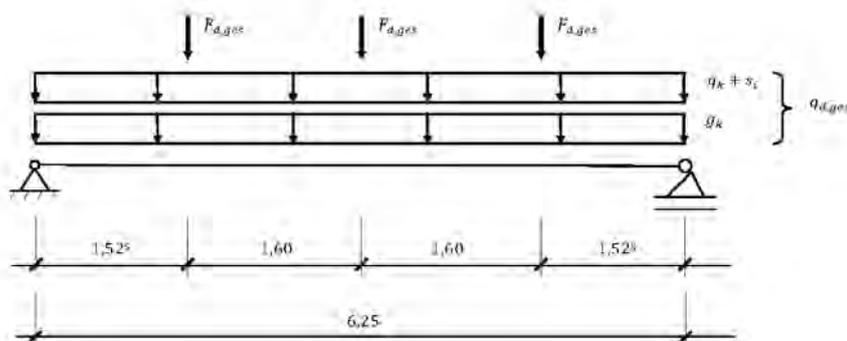
$$q_k = \underline{1.0 \text{ kN/m}^2}$$

• Statisches System

Annahmen:

- * Breite des maßgebenden Deckenstreifens $b = 0,50 \text{ m}$
- * Dreiecksförmige Schneelast mit max. Wert $s_i = 2,45 \text{ kN/m}$ konstant über die Breite $b = 0,50 \text{ m}$

- Addition von Nutzlast q_k und Schneelast s_i auf der sicheren Seite liegend ohne Kombinationsbeiwert ψ_0
- Windsog wird nicht betrachtet (wirkt günstig!)



$$q_{d,ges} = [1,35 * 5,25 \text{ kN/m}^2 + 1,5 * (1,0 + 1,70) \text{ kN/m}^2] * 0,5 \text{ m} = \underline{5,57 \text{ kN/m}}$$

$$F_{d,ges} = \underline{5,50 \text{ kN}}$$

- Baustoffe

- Architekturleichtbeton (Stellungnahme zur Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeitseigenschaften siehe Anlage II)

$$f_{l,ed} = \alpha_{lcc} * f_{l,ck} / \gamma_c$$

mit $\alpha_{lcc} = 0,75$ (DIN EN 1992-1-1 / NA. 2011-01)

$$f_{l,ck} = 5,0 \text{ kN/mm}^2 \text{ (s.o.)}$$

$$f_{l,ed} = 0,75 * 5,0 \text{ kN/mm}^2 / 1,5 = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

- Baustahl S235 (Anstrich mit Sikalor Zinc)

$$f_{y,d} = f_{yk} / \gamma_{M_0} = 235 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 235 \text{ N/mm}^2$$

- Betonstahl B500 (verzinkte Bewehrung)

$$f_{y,d} = f_{yk} / \gamma_s = 500 / 1,15 = 435 \text{ N/mm}^2$$

- Bemessungsschnittgrößen

- Max. Querkraft \triangleq Auflagerkraft

$$\text{Max } V_{Ed} = \frac{q_{d,ges} \cdot l}{2} + \frac{3 \cdot F_{d,ges}}{2} = \frac{5,57 \cdot 6,25}{2} + \frac{3 \cdot 5,50}{2} = \underline{25,66 \text{ kN}} \triangleq A_v$$

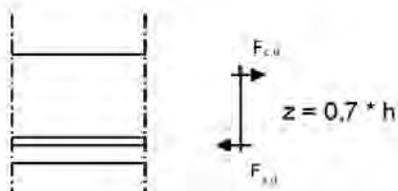
- Max. Moment

$$\begin{aligned} \text{Max. } M_{Ed} &= -q_{res} \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{l}{4} + A_v \cdot \frac{l}{2} - F_{d,ges} \cdot 1,60 \\ &= 5,56 \cdot \frac{6,25^2}{8} + 25,66 \cdot \frac{6,25}{2} - 5,50 \cdot 1,60 = \underline{44,19 \text{ kNm}} \end{aligned}$$

- Bemessung

- Bogen-Zugband-Modell

- Nachweis zulässige Stahlzugkraft



$$M_{Ed} = 44,19 \text{ kNm}$$

$$b = 0,50 \text{ m}$$

Querschnitt siehe Anlage IV

$$\rightarrow F_{s,d} = \frac{M_{Ed}}{z} = \frac{44,19 \text{ kNm}}{0,7 \cdot 50 \text{ cm}} = 126,26 \text{ kN} \approx 130,0 \text{ kN}$$

$$A_{s,vorh} = 2 \cdot (1,0 \text{ cm} \cdot 5,0 \text{ cm}) = 10 \text{ cm}^2$$

$$F_{R,d} = f_{yd} \cdot A_{s,vorh} = 23,5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 10 \text{ cm}^2 = 235 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$F_{s,d} / F_{R,d} = 130 / 235 = 0,55 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

- Nachweis zulässige Betonpressung am Auflager (siehe Anlage IV)

$$\sigma_{Ed} = \frac{130 \text{ kN}}{50 \text{ cm} * 15 \text{ cm}} = 0,173 \text{ kN/cm}^2$$

Nachweis:

$$\sigma_{Ed} / f_{cd} = 0,173 / 0,25 = 0,69 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

- Bemessung

- Biegebemessung nach Tafel 15 Schneider 20. Aufl.

$$M_{Eds} = M_{Ed} = 46,92 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \mu_{Eds} &= \frac{M_{Eds}}{b * d^2 * f_{cd}} & \text{mit: } d &= h_{De} - c_{nom} - h_{Ma} - \frac{h_{FS}}{2} = 50 - 5,0 - 1,8 - \frac{5}{2} \\ &= \frac{4692 \text{ kNm}}{50 \text{ cm} * (40,7 \text{ cm})^2 * 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} & &= 40,7 \text{ cm} \\ &= 0,227 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \xi = \frac{x}{d} = 0,39 \quad \leftrightarrow \quad x = 0,39 * 50 = 19,5 \text{ cm}$$

$$\rightarrow \underline{\omega = 0,2701}$$

$$\begin{aligned} A_{s,erf} &= \frac{1}{f_{yd}} * (\omega * b * d * f_{icd}) \\ &= \frac{1}{23,5} * (0,2701 * 50 * 40,7 * 0,25) \\ &= \underline{5,85 \text{ cm}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s,vorh} &= 2 * (5 \text{ cm} * 1 \text{ cm}) \\ &= \underline{10,0 \text{ cm}^2} \quad (\text{Stahlzugband}) \end{aligned}$$

- Querkraftbemessung analog DIN EN 1992-1-1, 11

$$V_{Rd,c} = \left[C_{IRd,c} * \eta_1 * k(100 * \rho_l * f_{lck})^{1/3} + \kappa_1 * \sigma_{cp} \right] * b_w * d$$

mit:

$$C_{IRd,c} = \frac{0,15}{1,5} = 0,1$$

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 * \frac{p}{2200} = 0,40 + 0,60 * \frac{1000}{2200}$$

($p = 1000 \text{ kg/m}^3$ nach Tab. 11.1)

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{407}}$$

$$= 1,7 \leq 2,0 \quad \checkmark$$

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{b_w * d} = \frac{10,00}{100 * 40,7} \quad \text{(ohne Mattenbewehrung)}$$

$$\rho_l = 0,0025 < 0,02 \quad \checkmark$$

$$b_w = 100 \text{ cm}$$

$$V_{IRd,c} = \left[0,1 * 0,62 * 1,7(100 * 0,0025 * 5,0)^{1/3} \right] * 1,00 * 0,407$$

$$= \underline{\underline{0,0502 \text{ MN}}}$$

V_{Ed} für $b_w = 1,0 \text{ m}$

$$q_{d,ges} = (1,35 * 5,25 + 1,5 * (1,0 + 1,6)) * 1,0 \text{ m}$$

$$= 10,99 \text{ kN/m}$$

$$V_{Ed} = \frac{10,99 * 6,25 + 3 * 5,50}{2}$$

$$= 42,60 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,red} = 42,60 - 10,99 * 0,407$$

$$= \underline{\underline{38,13 \text{ kN}}}$$

$$V_{Ed,red} = 38,13 \text{ kN} \leq 50,2 \text{ kN} = V_{IRd,c} \quad \checkmark$$

- Zusätzlich werden im Auflagerbereich schräge Schöck-ComBar-Stäbe mit Endverankerung eingebaut.

Pos. 03: Leichtbeton- Außenwand

- Lastermittlung
 - Windlast nach DIN EN 1991-1-4
Bauwerksstandort Kaiserslautern (269 üNN) → Windzone 1
Vereinfachter Böengeschwindigkeitsdruck für Bauwerke bis 25m Höhe:

$$h_{vorh} = 5,20 \text{ m}$$

$$\rightarrow q_p = 0,50 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Wz 1; } h \leq 10\text{m})$$

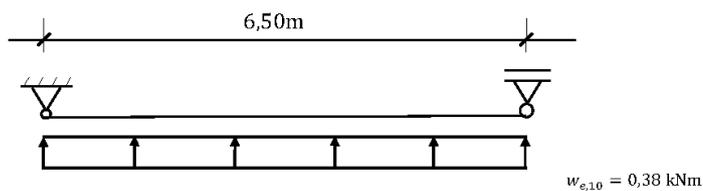
$$\text{Lasteinflussfläche} \quad A \geq 10\text{m}^2$$

→ Ermittlung der Außendruckbeiwerte und Winddrücke siehe Anlage III

→ Bereich D maßgebend!

$$w_{e,10} = \underline{0,38\text{kN/m}^2}$$

- System



$$\begin{aligned} \max M_{Ed} &= \frac{0,38 \text{ kN/m}^2 * 1,0 \text{ m} * (6,50 \text{ m})^2}{8} \\ &= \underline{2,01 \text{ kNm}} \end{aligned}$$

- Bemessung

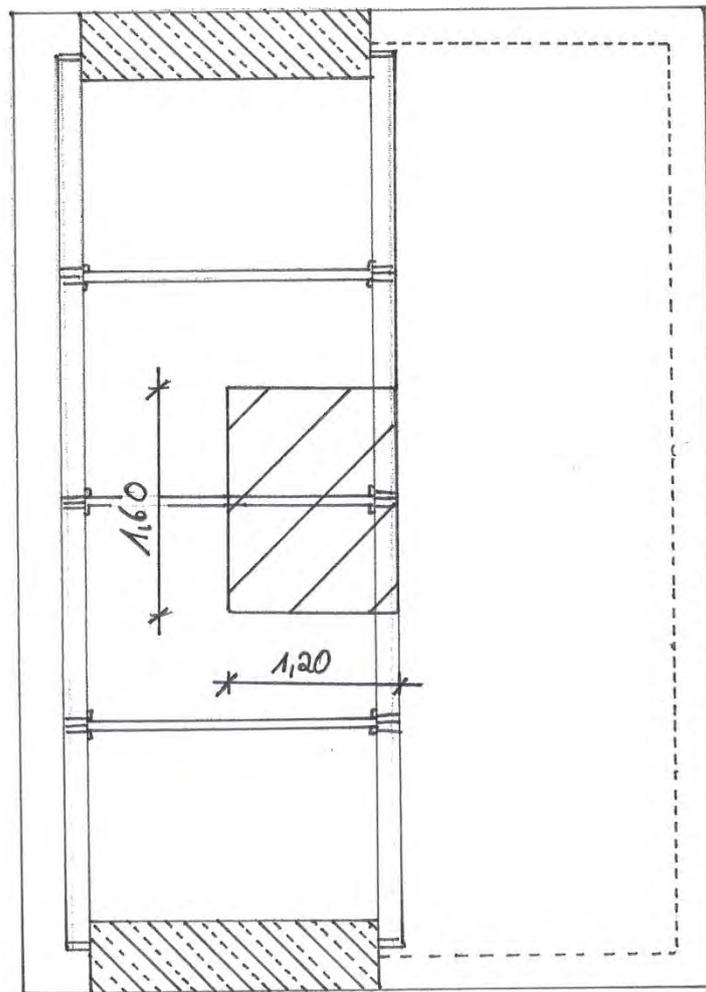
→ gew.: konstruktiv

- innen	→ Q 335 A	}	vgl. Anlage V
- außen	→ Q 524 A		

Weitere Außenwände → wie Pos. 03!

Anlage I

Lasteinzugsfläche





Technische Universität Kaiserslautern-Postfach 3049 67653 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

im Hause

Anlage II
PROF. DR.-ING. WOLFGANG BREIT

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen

Fachbereich Bauingenieurwesen

Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 60
67663 Kaiserslautern

Telefon: +49 631 205 22 97

Telefax: +49 631 205 31 01

E-Mail: wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de

www.bauing.uni-kl.de/fwb

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Unsere Nachricht vom

Unsere Zeichen

FWB/Bre

Kaiserslautern,

25. September 2012

**Small House I, Architekturleichtbeton,
Stellungnahme zur Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeitseigenschaften**

Sehr geehrter Herr Prof. Schnell,

bezüglich Ihrer Anfrage zur Beurteilung der Druckfestigkeit und der Dauerhaftigkeitseigenschaften des beim o.g. Projekt verwendeten Leichtbetons, können wir Ihnen folgende Ergebnisse zur Verfügung stellen:

Die statistische Auswertung von zentrischen Druckversuchen (nach DIN ISO 16269) an 15 Normwürfeln im Alter von 28 Tagen ergab eine charakteristische Druckfestigkeit von 5 N/mm². Für die Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung wurde von einer Normalverteilung ausgegangen. Der untere Erwartungswert (charakteristische Druckfestigkeit) entspricht einem 5%-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung bei einem Vertrauensniveau von 75 %. Der statische Elastizitätsmodul erreicht 3.700 N/mm² bis 4.000 N/mm².

Der Korrosionsschutz der Bewehrung infolge Karbonatisierung (Expositionsklasse XC4) wird durch eine ausreichend große Betonüberdeckung (50 mm) sowie einen hohen Zementgehalt (mindestens 375 kg/m³) und der damit zusammenhängenden, hohen Alkalität bzw. dem hohen Alkalitätsdepot gewährleistet. Darüber hinaus ist die Bewehrung durch eine Zinkschicht vor Korrosion geschützt. Eine Einwirkung von Korrosion auslösenden Chloridionen ist bei dem geplanten Bauwerk nicht zu erwarten.

Mit freundlichen Grüßen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit



Proj.Beiz

Datum 03.12.2012

mb BauStatik S031.de 2012.063

Seite

Position

Projekt

Anlage III.1

Außenwand

Small House I

Pos. Außenwand	Flachdach und Außenwand aus Leichtbeton mit Wind für vereinfachte Annahmen		
<u>System</u>	Gebäudedaten		
<u>Abmessungen</u>	Gebäudebreite	B = 5.00	m
	Gebäudelänge	L = 7.00	m
	Gebäudehöhe	H = 3.80	m
<u>Geograf. Angaben</u>	Geländehöhe über NN	A = 269.00	m
	Windzone	WZ = 1	
	Standort	Binnenland	
<u>Geometrie</u>	Flachdach		
	Traubereich	scharfkantig	
<u>Öffnungen</u>	geschlossene Wände		
<u>Einwirkungen</u>			
<u>Qk.W</u>	Windlasten		LG 98
	Qk.W (min/max Werte)		
<u>Qk.S</u>	Schnee- und Eislasten für Orte bis NN + 1000 m		LG 99
	Qk.S (min/max Werte)		
<u>Windlasten</u>	Windlastermittlung nach DIN EN 1991-1-4:2010-12		
	Ermittlung mit vereinf. Annahmen nach NA.B.3.2		
	Geschwindigkeitsdruck	$q_p = 0.50$	KN/m^2
	Lasteinflussfläche	$A \geq 10.00$	m^2



Proj.Bez

Datum 03.12.2012

mb BauStatik S031.de 2012.063

Seite

Position

Projekt

Anlage III.2

Außenwand

Small House I

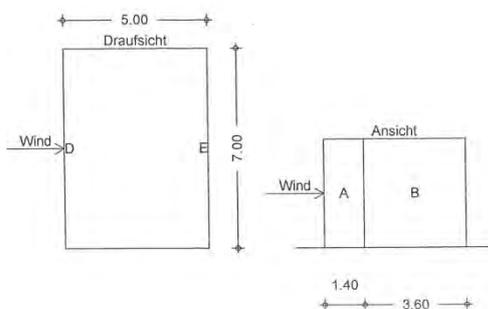
Qk.W.000

Richtung $\Theta=0^\circ$

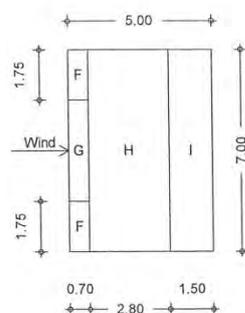
Bereichsgröße

$e_D = 7.00$ m
 $e_W = 7.00$ m

Bereichseinteilung
M 1:200



M 1:200



Bereich	Länge [m]	Breite [m]	$C_{pe,1}$ [-]	$C_{pe,10}$ [-]	$W_{e,10}$ [kN/m ²]
A	1.40	3.80	-1.40	-1.20	-0.60
B	3.60	3.80	-1.10	-0.80	-0.40
D	7.00	3.80	1.00	0.77	0.38
E	7.00	3.80	-0.50	-0.44	-0.22
F	0.70	1.75	-2.50	-1.80	-0.90
G	0.70	3.50	-2.00	-1.20	-0.60
H	2.80	7.00	-1.20	-0.70	-0.35
I _{Sog}	1.50	7.00	-0.60	-0.60	-0.30
I _{Druck}	1.50	7.00	0.20	0.20	0.10



Proj. Bez

Datum 03.12.2012

mb BauStatik S031.de 2012.063

Seite

Position

Projekt

Anlage III.3

Außenwand

Small House I

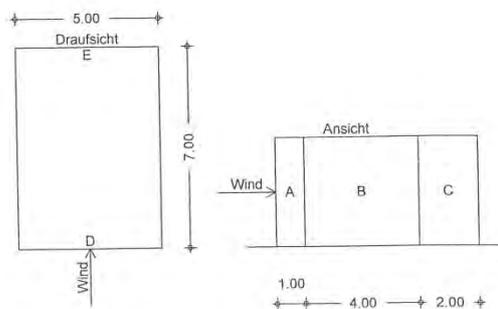
Qk.w.090

Richtung $\theta=90^\circ$

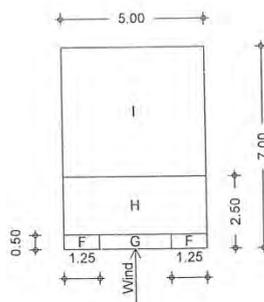
Bereichsgröße

$e_D = 5.00$ m
 $e_W = 5.00$ m

Bereichseinteilung
M 1:200



M 1:200



Bereich	Länge [m]	Breite [m]	$C_{pe,1}$ [-]	$C_{pe,10}$ [-]	$W_{e,10}$ [kN/m ²]
A	1.00	3.80	-1.40	-1.20	-0.60
B	4.00	3.80	-1.10	-0.80	-0.40
C	2.00	3.80	-0.50	-0.50	-0.25
D	5.00	3.80	1.00	0.74	0.37
E	5.00	3.80	-0.50	-0.38	-0.19
F	0.50	1.25	-2.50	-1.80	-0.90
G	0.50	2.50	-2.00	-1.20	-0.60
H	2.00	5.00	-1.20	-0.70	-0.35
I _{Sog}	4.50	5.00	-0.60	-0.60	-0.30
I _{Druck}	4.50	5.00	0.20	0.20	0.10

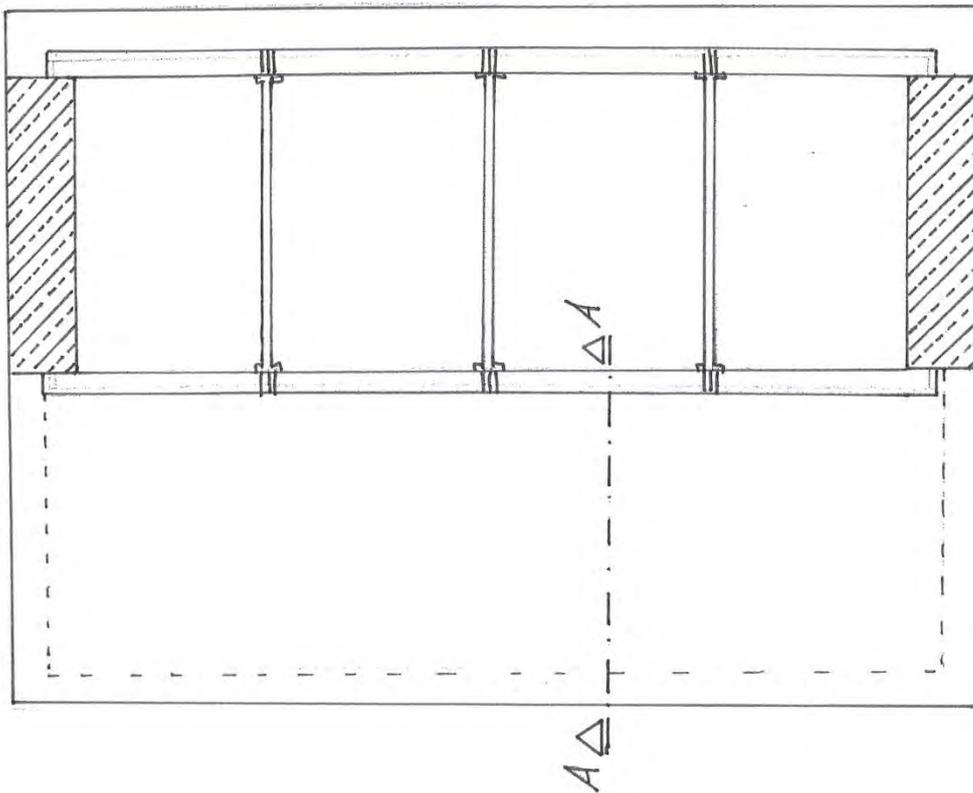
© 2012 mb BauStatik S031.de - alle Rechte vorbehalten

Studienversion

Flachstahl - Anordnung Small House I

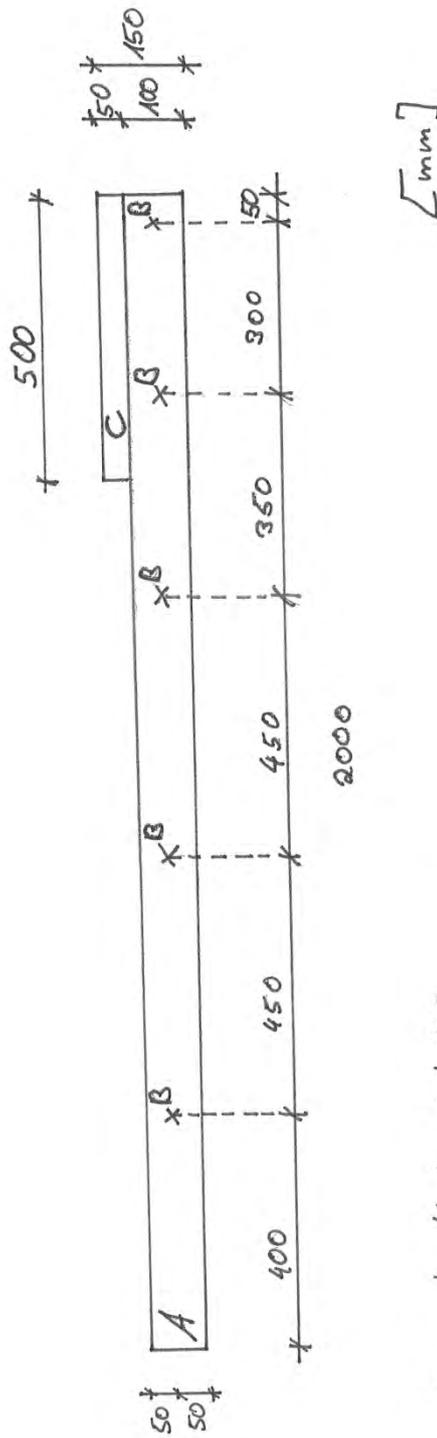
Anlage IV.1

→ siehe Schnitt A-A



Flachstahl - Anordnung Small House I

Schnitt A-A



- Querschnitt A 10 / 100
 - Querschnitt B 10 / 50
 - Querschnitt C 10 / 50
- Länge $l = 6360 \text{ mm}$

Anlage IV. 2

