

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen
Universität Stuttgart

**Entwicklung eines Leichtbetons mit tragenden und
hochdämmenden Eigenschaften als matrixoptimierter
und gefügedichter Werkstoff aus zementgebundenem
hydrophobierten Aerogelgranulat**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 28646 – 23
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers (ITKE)
Dipl.-Ing. Thiemo Fildhuth (ITKE)
Dr.-Ing. Alexander Hub (ITKE)
Dipl.-Ing. Frank Degner (Gtecz)
Dr.-Ing. Gregor Zimmermann (Gtecz)
Dr.-Ing. Thomas Teichmann (Gtecz)

April 2012

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



AZ	28646	Referat	23	Fördersumme	124.987 €
Antragstitel		Entwicklung eines Leichtbetons mit tragenden und hoch dämmenden Eigenschaften als matrixoptimierter und gefügedichter Werkstoff aus zementgebundenem, hydrophobiertem Aerogelgranulat			
Stichworte		Produkt, Energie, Betonbau, Dämmung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
12 Monate	25.01.2011	31.01.2012	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger		Universität Stuttgart Keplerstr. 7 70174 Stuttgart		Tel	0711/68583214
				Fax	0711/68582756
				Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. Alexander Hub	
Kooperationspartner		G.tecz German technologies and engineering conceptz Dr.-Ing. Gregor Zimmermann, Angersbachstr. 12 b, 34127 Kassel			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Um den energieeffizienten Betrieb eines Gebäudes nach heutigem Standard zu ermöglichen, ist der Einsatz von Wärmedämmung obligatorisch. Zu diesem Zweck werden die Außenwände lückenlos mit Dämmstoffen verkleidet. Als wichtigste Materialien kommen mit zusammen 80% Marktanteil Mineralwolle und expandierter Polystyrol Hartschaum (EPS) in Form von Dämmplatten zum Einsatz. Nahezu alle Gebäude sind nach diesem Prinzip des mehrschaligen Wandaufbaus mit einer klaren Funktionstrennung der einzelnen Schichten konzipiert. Mit einem monolithisch einsetzbaren Leichtbetonwerkstoff ist der gesetzlich vorgeschriebene Wärmeschutz eines Gebäudes nicht mehr wirtschaftlich zu erreichen. Die Hersteller reagieren mit einer zusätzlichen Kerndämmung. Diese Vorgehensweise führt jedoch die Vorteile in Konstruktion und Fertigung ad absurdum. Das Forschungsprojekt befasst sich mit der Entwicklung einer Leichtbetonrezeptur auf der Basis von Aerogele durch die Anwendung von Methoden aus der ultrahochfesten Betonentwicklung (UHPC). Dadurch wird unter Beibehaltung einer ausreichenden Festigkeit eine außerordentlich reduzierte Wärmeleitfähigkeit erzielt. Anschließende Untersuchungen evaluieren die baupraktisch relevanten Materialparameter. Das ITKE konzipiert die baukonstruktive Anwendung des Werkstoffs für typische Detaillösungen. Die Verwendung von Betonfertigteilmwandelementen beinhaltet eine Vereinfachung des Herstellungsprozesses und führt zu deutlichen Umweltentlastungseffekten.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
Die maßgebliche Zeitachse des Projekts ergibt sich durch die Arbeitsfelder B und C. Die Evaluation der Materialparameter wird erst mit Beendigung der Materialentwicklung aufgenommen.					
Feld A Ökobilanz Aerogelbeton – ITKE (11M projektbegleitend)					
Es wird eine aussagekräftige ökologische Bewertung des neuen Werkstoffs geplant, indem als Funktionseinheit 1m ² Außenwand mit definierter Dämmleistung in verschiedener Ausführung miteinander verglichen wird. Dazu werden die verwendeten Materialien und Rohstoffe in der Software GaBi bilanziert.					
Feld B Entwicklung aerogelhaltiger Leichtbetonwerkstoff – G.tecz (ca. 9M)					
Die Werkstoffentwicklung erfolgt auf Basis der Quantz®-Technologie der Firma G.tecz. Mit Hilfe von Versuchen und rechnerischen Algorithmen wird die Rezeptur entwickelt					
Feld C Ermittlung Materialparameter – ITKE, G.tecz, IBP, MPA (ca. 2,5M)					
Es wird untersucht: Druck- und Biegezugfestigkeit; E-Modul; Wärmeleitfähigkeit λ ; Abwitterung durch Frost-Tauwechsel; Schwinden und Kriechen, Bewehrungsverbundverhalten und Feuerwiderstand.					
Feld D Konstruktionskatalog – ITKE (1M projektbegleitend erstellbar)					
Der Konstruktionskatalog zeigt eine Reihe von Konstruktionsvorschlägen, um die vereinfachte bauliche Ausführung zu demonstrieren.					
Feld E Projektdokumentation – ITKE, G.tecz, IBP, MPA (1M)					
Die Ergebnisse der Arbeitsfelder A-D werden in einem gemeinsamen Abschlussbericht auf Basis der Teildokumentationen zusammengestellt.					

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen dieses Projekts wurde die Entwicklung einer neuen Materialzusammensetzung, welche sich von bestehenden Patentlösungen unterscheidet, betrieben, die durch die Optimierung der Materialeigenschaften Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Verarbeitbarkeit einen praxistauglichen Leichtbeton unter Verwendung eines Aerogelzuschlags zum Ziel hat. Das lufthärtende Material weist bei einer Trockenrohddichte von 520kg/m³ eine Druckfestigkeit von 2,5 N/mm² und eine Wärmeleitfähigkeit von 0,09 W/mK auf. Der Aerogelgehalt beträgt dabei 65 Vol%. Die Materialeigenschaften des gefügedichten Werkstoffs sind das Ergebnis einer Packungsdichteoptimierung. Das Material lässt sich innerhalb einer Mischzeit von 4 Minuten in herkömmlichen Mischwerkzeugen herstellen. Der mineralische Dämmzuschlag Aerogelgranulat ist nicht brennbar, offenporig und hydrophobiert. Die wasserabweisenden Eigenschaften führen beim Einmischen zu einer durchgehenden Hydrophobierung des Betons. Durch die Frost-Tauwechselversuche konnte keine messbare Abwitterung festgestellt werden, was auf die wasserabweisende Eigenschaft des Materials zurückgeführt werden kann. Es ergab sich auch keine messbare innere Gefügestörung. Brandversuche haben gezeigt, dass das Material hohe Temperaturen ohne explosionsartiges Versagen verkraftet und ab einer Temperatur von 2000°C zu schmelzen beginnt. Der statisch bestimmte E-Modul des Materials beträgt 1100 MPa. Der Mittelwert der maximalen Verbundspannung konnte mit 0,9 N/mm² bei 0,02mm Schlupf festgestellt werden.

Recyclingversuche ergaben ein geeignetes Materialrückgewinnungsverfahren der Aerogele durch grobes Vorbrechen und dem Brechen mit einem Backenbrecher auf einen möglichst kleinen Durchmesser. Ab 2mm Korndurchmesser ergab sich eine Trennung von Zementmatrix und Aerogele.

Ein Vergleich bisher durchgeführter Studien ergab keinen Hinweis auf ein erhöhtes Krebsrisiko durch amorphe Silikaverbindungen aus denen Aerogele bestehen. Aerogele enthalten keine umweltschädlichen und Krankheitserregenden Zusatzstoffe. Bei der Verarbeitung müssen Schutzmassnahmen bezüglich einer erhöhten Staubschutzentwicklung getroffen werden. Der Mischungsentwurf wurde auf eine minimierte Staubschutzentwicklung optimiert. Unterkritisch hergestellte Aerogele werden aus Nebenprodukten der chemischen Industrie in einem niederthermischen, nasschemischen Prozess gefertigt, was ihre Ökobilanz positiv beeinflusst. Vom Hersteller gab es keinerlei Unterstützung eine ökobilanzielle Betrachtung des Materials aufzustellen. Veröffentlichte Ökobilanzen für überkritisch hergestelltes Aerogel zeigen keinen Vorteil in der gewählten funktionalen Einheit. Eine Vergleichbarkeit zwischen den beiden Produktionswegen ist jedoch aufgrund der großen Unterschiede kaum gegeben. Fachgespräche mit verschiedenen Institutionen ergaben, dass die ökobilanzielle Betrachtung sowie Untersuchungen bezüglich des Gesundheitsgefährdungspotentials des Materials derzeit keinen Forschungsgegenstand darstellen. Die Langzeituntersuchung zeigte, dass das Material ein sehr großes durch die äußeren Umgebungsbedingungen stark beeinflusstes Schwindverhalten aufwies. Die Kriechversuche wurden aufgrund dieser Einflüsse nach 140 Tagen ergebnislos abgebrochen.

Eine Darstellung verschiedener Standarddetails zeigt das Vereinfachungspotential der Konstruktion bei der Verwendung eines durchgehend gedämmten Wandaufbaus.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Forschungsergebnisse werden in Form eines Fachthemas in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau veröffentlicht. (geplant 2012)

Fazit

Leichtbeton mit Aerogelzuschlag weist eine hervorragende Wärmeleitfähigkeit bei ausreichender Festigkeit auf, um als monolithischer Wandbaustoff für tragende Außenbauteile eingesetzt werden zu können. Die hydrophoben Materialeigenschaften verleihen dem Material eine wasserabweisende und verschmutzungsresistente Oberfläche, die sehr gut als Sichtbeton ohne weiteren Fassadenaufbau ausgeführt werden kann. Das Material erweist sich jedoch aufgrund der reaktiven Anteile und dem fehlenden stabilisierenden Korngerüst als sehr anfällig gegenüber äußeren Einflüssen wie etwa Dehnungskrisen. Die Schwindneigung kann durch den Austausch eines Zementanteils durch nichtreaktive Komponenten deutlich reduziert werden. Die Mikrorissbildung reduziert sich, womit ebenfalls eine Steigerung der Festigkeitswerte einhergeht. Aerogele können als „Feststoffporen“ in der Betonmatrix interpretiert werden. Die Lastabtragende Funktion obliegt vollständig der Matrix. Der nichtreaktive Anteil trägt zu einem Aufbau eines inkompressiblen Korngerüsts bei. Die ersten Versuche zeigten bei einem Volumengleichen Austausch eines Zementanteils durch nichtreaktive Stoffe und der Änderung der Zementart eine Steigerung der Festigkeitsentwicklung auf 5N/mm². Auf diesem Weg sollte ein verbessertes Langzeitverhalten in Form einer reduzierten Schwind- und Kriechverformung erzielt werden können.

Vorwort

In diesem Forschungsvorhaben wurde die Entwicklung eines leistungsfähigen Leichtbetonwerkstoffs mit Aerogelzuschlägen vorangetrieben. Dazu wurden die sich widersprechenden Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit so aufeinander abgestimmt, dass sowohl im Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit als auch auf die Tragfähigkeit für konstruktive Einsatzbereiche ein zukunftsfähiger Werkstoff entwickelt wurde. Dies geschah insbesondere unter dem Aspekt der praktikablen Verarbeitbarkeit, da der neue Werkstoff in den bestehenden industriellen Prozess der Bauindustrie integriert werden muss.

Aerogele sind ein mineralisches, hochporöses Material mit der niedrigsten Wärmeleitfähigkeit aller Festkörper. Die Wärmeleitfähigkeit ist nur halb so groß wie die einer stehenden Luftschicht, so dass durch die Verwendung dieses Materials als Betonkomponente eine signifikante Verbesserung der Dämmfähigkeit eines Leichtbetons gegenüber luftgefüllten Poren erreicht wird. Im Rahmen dieses Projekts wurde auch das ökologische Potential des Werkstoffs bewertet.

Das Projekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Dank gebührt auch allen Kooperationspartnern aus Praxis und Wissenschaft sowie den Fremdauftragnehmern, die zum erfolgreichen Gelingen des Projekts beigetragen haben. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für die Anwendung des dämmenden Betonwerkstoffs in der industriellen Verwertung und bieten Raum für die konstruktive und entwurfstechnische Weiterentwicklung von Bausystemen und Bauteilen.

Jede technische Entwicklung, die sich auf neue Zielsetzungen stützt, bedarf einer gewissen Zeit bis zu ihrer Durchsetzung. Von Seiten der Planer und Architekten gibt es ein großes Interesse an diesem Material. Diesem Interesse wirken jedoch noch wirtschaftliche Hemmnisse entgegen, die in den derzeit noch hohen Kosten des Produkts Aerogel begründet liegen.

Umfassende Veröffentlichungen in der Fachpresse, Präsentationen der Ergebnisse auf Fachmessen und Tagungen sowie im Internet werden folgen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Aufgabenstellung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Aufgaben und Ziele des Projekts	2
1.3 Ablauf des Vorhabens - Arbeitsprogramm	3
1.4 Förderliche und hemmende Umstände	3
2 Ökologische Bilanzierung	5
2.1 Datengrundlagen.....	5
2.1.1 Definition der funktionellen Einheit.....	5
2.1.2 Systemvergleich.....	5
2.1.3 Bilanzierungsergebnisse	6
2.1.4 Ökologische Bewertung des Aerogelbeton	7
3 Umweltwirkung	10
3.1 Werkstoffrecycling	10
3.1.1 Zerkleinern	10
3.1.2 Sieben	11
3.1.3 Materialtrennung	13
3.2 Gesundheitsrelevante Aspekte	14
3.2.1 Karzinogenes Potential	14
3.2.2 Expositionsrelevanz	15
3.2.3 Spezifische Angaben zu Nanogel®.....	15
3.2.4 Fachliche Kontakte.....	16
4 Materialentwicklung	17
4.1 Aufgabenstellung	17
4.2 Analyse der Aufgabe.....	17
4.3 Herstellen, Lagern und Prüfen von Prüfkörpern.....	18
4.3.1 Allgemein	18
4.3.2 Mischen.....	18
4.3.3 Schalen	18
4.3.4 Verdichten	19
4.3.5 Lagerung der Probekörper	21
4.4 Rezeptentwicklung.....	21

4.4.1	Voruntersuchungen.....	21
4.4.2	Rezepturenentwicklung.....	23
4.5	Rezeptur für Hauptprüfserie.....	25
4.6	Ausblick.....	26
5	Versuchsergebnisse.....	27
5.1	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	27
5.1.1	Probentrocknung.....	27
5.1.2	Einbau und Prüfung	28
5.2	Feuerwiderstandsversuch.....	30
5.3	Verbundverhalten der Betonbewehrung	33
5.3.1	Probekörperausbildung.....	33
5.3.2	Vergleich mit vorangegangenen Untersuchungen.....	37
5.4	Bestimmung des statischen Druck Elastizitäts-Moduls.....	38
5.5	Prüfungen zum Frostwiderstand	40
5.6	Prüfungen des Kriech- und Schwindmaßes.....	44
5.7	Prüfungen des Wärmeausdehnungskoeffizienten	45
5.7.1	Prüfung nach DIN EN 1770	45
5.7.2	Prüfung nach TP BE-PCC	45
6	Detailkatalog.....	47
7	Literatur	53
8	Anhang.....	55
8.1	Prozesspläne	55
8.2	Experimentelle Daten – Wärmeausdehnung	57

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Treibhauspotential von 1m ² gleichwertiger Außenwandsysteme.....	6
Abb. 2-2	Primärenergieaufwandsvergleich gleichwertiger Außenwandsysteme	6
Abb. 2-3	Prozessdiagramm für unterkritisch hergestelltes Aerogel (hydrophobiert) als Granulat – Angaben aus dem Patent der Firma Cabot [22]	8
Abb. 2-4	Schrumpfung eines Aerogelblockes während der unterkritisch durchgeführten Trocknung (Quelle: Cabot).....	9
Abb. 3-1	Simulation Bauwerksabbruch - Zerkleinern im Laborbackenbrecher - drei unterschiedliche Kornzusammensetzungen des Materials	11
Abb. 3-2	Sieblinienvergleich für die Spaltweitereinstellung 1 - 3 - 5	12
Abb. 3-3	Betonrezyklat mit zunehmender Trennquote für kleinere Korndurchmesser – Kornband 16 – 2,3mm (links), Siebrückstand bei 2mm (Mitte) und 1mm (rechts) Maschenweite	12
Abb. 3-4	zunehmender Anteil an gelösten Aerogelfeinstpartikel läßt das Rezyklat sich wie eine Flüssigkeit verhalten – Kornband 16–0,5mm (links), Siebrückstand bei 0,25mm (Mitte) und 0,125mm (rechts) Maschenweite	13
Abb. 3-5	Hydrophobes Aerogelbetonrezyklat bildet eine deutliche Trennschicht zu Wasser aus	14
Abb. 4-1	Probekörperoberflächen mit verschiedenen Trennmitteln	19
Abb. 4-2	Probekörperunterseite mit verschiedenen Trennmitteln	19
Abb. 4-3	WLF-Probekörper 500x500x50	20
Abb. 4-4	Verhältnis der Dichten von Platten und Prismen.....	21
Abb. 4-5	Aerogelgranulat TLD 101 (links) und TLD 302 (rechts)	22
Abb. 4-6	Die kumulative Verteilung der Aerogel – Fraktionen.....	22
Abb. 4-7	Aerogelbeton mit 75 Vol.% Aerogelanteil.....	23
Abb. 4-8	Dichte und Festigkeitswerte der Mischungen mit 75 / 70 / 65 % Aerogel – Anteil	24
Abb. 4-9	Aerogel - Beton mit 65 % Aerogel – Anteil (links) ; Ausschnittsvergrößerung (rechts).....	24
Abb. 4-10	Verhältnis von Dichte zu λ - Wert (vgl. Abb. 5-3, S.28)	25
Abb. 4-11	Entwicklung der Festigkeiten über die Zeit.....	25
Abb. 4-12	Vergleich der Festigkeitsentwicklung beim Einsatz verschiedener Zemente	26
Abb. 5-1	Relativer Gewichtsverlust der Probekörper während der Trocknung.....	27
Abb. 5-2	Trägerfolie mit Thermoelementen - Probekörper mit Randverbund aus Styropor.....	28
Abb. 5-3	Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ ausgewählter luftbasierter Leichtbetonwerkstoffe und Beton mit Aerogelzuschlag	29
Abb. 5-4	Schematischer Aufbau des Brandversuchs - Probenrückseite mit Thermoelemente	30
Abb. 5-5	Temperaturkurven der beiden Sensoren über den Versuchszeitraum	31
Abb. 5-6	Versagensstufen des Probekörpers unter Flammeinwirkung nach 7 – 11 – 17 Minuten	32
Abb. 5-7	Abtropfen der Schmelze (nach Versuchsdauer 20 Minuten)	32

Abb. 5-8	Aerogelbetonschmelze unmittelbar nach Versuchsende - Klebeband auf der Rückseite des Probekörpers - ausgekühlte Schmelze	33
Abb. 5-9	Prüfanordnung Verbundverhalten mit eingebauten Probekörper (Mitte) - Probekörper mit Wegaufnehmer am unbelasteten Bewehrungsende	34
Abb. 5-10	Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung für 65 Vol-% Aerogelgehalt	35
Abb. 5-11	Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung - Bereich 0 - 0,14mm	35
Abb. 5-12	Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung für 70 Vol-% Aerogelgehalt	36
Abb. 5-13	Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung - Bereich 0 - 0,14mm	36
Abb. 5-14	Verbundverhalten von Infralichtbeton (links aus [24]) und Verbundverhalten von konstruktiven Leichtbeton (rechts aus [14])	37
Abb. 5-15	Arbeitslinie der E-Modulprüfung – Probekörper Nr. E1	39
Abb. 5-16	Arbeitslinie der E-Modulprüfung – Probekörper Nr. E2	39
Abb. 5-17	Arbeitslinie der E-Modulprüfung – Probekörper Nr. E3	40
Abb. 5-18	Relativer dynamischer E-Modul (innere Schädigung) der untersuchten Probekörper bei der CIF-Prüfung	41
Abb. 5-19	Wasseraufnahme der untersuchten Probekörper bei der CIF-Prüfung	43
Abb. 5-20	Abwitterung der untersuchten Probekörper bei der CIF-Prüfung	44
Abb. 6-1	Frei wählbare Fensterebene innerhalb der Wandebene	48
Abb. 6-2	Wandfußpunkt auf Kellerboden mit Zusatzdämmung (li.) und ohne (re.)	48
Abb. 6-3	Fußpunkt einer monolithischen Leichtbeton Erdgeschoßwand	49
Abb. 6-4	Anschluss Terrasse an Außenwand auf ausgebauten Keller	50
Abb. 6-5	Fußpunkt aufgehende Wand auf Kragplatte aus Normalbeton	50
Abb. 6-6	Wandkopfpunkt und horizontale Fuge im Bereich des Deckenspiegels	51
Abb. 6-7	Wandabschluss mit Attika	51
Abb. 7-1	Prozessplan Wandsystem Porenbeton	55
Abb. 7-2	Prozessplan Wandsystem Ziegelwand	55
Abb. 7-3	Prozessplan Wandsystem Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem mit EPS-Dämmschicht	56
Abb. 7-4	Prozessplan Wandsystem Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem mit Minerwolle Dämmschicht	56

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Übersicht Arbeitsfelder im Projekt	3
Tab. 4-1	Auswirkung des Verhältnis Aerogel zu Leim auf verschiedenen Eigenschaften	17
Tab. 5-1	Versuchszeit–vorherrschende Oberflächentemperatur–Beobachtung am Probekörper	31
Tab. 5-2	Übersicht Verbundspannungen für Leichtbeton aus der Literatur	37
Tab. 5-3	Maße, Rohdichte, Trockenrohichte, Druckfestigkeit und statischer Elastizitätsmodul	38
Tab. 5-4	Relativer dynamischer E-Modul der Probekörper bei der CIF-Prüfung	41
Tab. 5-5	Wasseraufnahme der untersuchten Probekörper der Probekörper bei der CIF-Prüfung	42
Tab. 5-6	Abwitterung (kumuliert) der Probekörper bei der CIF-Prüfung	43
Tab. 6-1	ausgewählte Bauwerke mit monolithischen Wandaufbau aus Beton	47

1 Aufgabenstellung

1.1 Ausgangslage

Die Dämmung von Gebäuden stellt eine wichtige Maßnahme dar, um die in der ENEC vorgeschriebenen Vorgaben des Wärmeschutzes zu erfüllen. Derzeit gibt es abhängig von den verwendeten Baustoffen verschiedene Wandaufbauten, die diese Zielwerte erfüllen. In der Regel handelt es sich um einen zweischaligen Aufbau mit einer definierten Funktionstrennung nach statischen und bauphysikalischen Anforderungen. Als wichtigste Dämmmaterialien kommen mit einem Marktanteil von 54% Mineralwolle gefolgt von EPS mit einem Marktanteil von 30%¹ zum Einsatz. Die Fassade wird dabei als Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit einer abschließenden Putzschicht realisiert.

Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, die Dämmfunktion über den bestehenden Wandquerschnitt zu integrieren. Dies erfolgt bei Steinbauweisen, in dem die Hohlräume von Ziegelbaustoffen mit Dämmmaterialien wie Perlite oder Mineralwolle verfüllt werden. Der Baustoff Porenbeton integriert die Dämmfunktion nach einem grundlegend anderen Prinzip. Hier wird die tragende Matrix durch den Produktionsprozess schwammartig ausgebildet. Der eingeschlossene Luftporenanteil von bis zu 80 Vol% ist für die sehr gute Dämmwirkung verantwortlich. Holzbauweisen werden in der Regel als Ständerkonstruktion ausgeführt, die auf diese Weise im tragenden Querschnitt ebenfalls ausreichend Platz für Dämmmaßnahmen bieten.

Der mit einem sehr hohen Marktanteil vertretene Baustoff Beton erfüllt in einem Bauwerk in der Regel rein statische Funktionen und muss deshalb zur Erfüllung der wärmeschutztechnischen Anforderungen vollständig gedämmt werden. Leichtbeton ab einer Rohdichte von ca. 800kg/m³ und niedriger weist jedoch aufgrund des hohen Porenanteils ein nennenswertes Dämmvermögen auf. In der Vergangenheit wurden einige Bauvorhaben aus dämmendem Leichtbeton ohne Zusatzdämmung realisiert. Der große Vorteil aus planerischer Sicht ergibt sich durch die einfache und klare Detailausbildung der Bauwerke. Die bestehenden Leichtbetonmaterialien sind jedoch nicht in der Lage den stetig steigenden Anforderungen an den Wärmeschutz in gleichem Maße durch die Weiterentwicklung ihrer Leistungsfähigkeit nachzukommen, so dass diese Art des Bauens weitgehend eine Nischenanwendung blieb. Selbst aktuelle Werkstoffentwicklungen entsprechen den heutigen Standards nur mit einer Wandstärke von 50cm und mehr, so dass neuentwickelte Materialien wie der „Infraleichtbeton“ praktisch nicht mehr zur Ausführung kommen und das Material „Ultraporcrete“ von Anfang an für den Einsatz im Ausland konzipiert werden.

Der Entwicklungsstillstand liegt in der Ausreizung des physikalischen Prinzips begründet. Der Volumenanteil des verwendeten Isolators Luft kann nur mit großen Anstrengungen gesteigert werden, ohne die Tragfähigkeitseigenschaften des Werkstoffs extrem zu beeinträchtigen.

¹ Quelle: Gesamtverband Dämmstoffindustrie (GDI) - Baumarktstatistik 2005

1.2 Aufgaben und Ziele des Projekts

Das Projekt verfolgt eine Werkstoffneuentwicklung mit der Materialkomponente Aerogel als Dämmstoff. Diese Materialkombination ermöglicht die Anwendung Gefüge optimierender Methoden, wie sie aus der Entwicklung von Ultrahochfesten Beton (UHPC) bekannt sind. Dies führt zu einer Erhöhung der Dämmwirkung unter einer vergleichsweise moderaten Reduktion der Festigkeit, was einen leistungsfähigen Leichtbetonwerkstoff der neuesten Generation zum Ergebnis hat. Gleichzeitig vereint das Material ökologische und wirtschaftliche Ansprüche sowie Aspekte der Dauerhaftigkeit und Nutzerfreundlichkeit.

Ein tragender und dämmender Werkstoff verspricht sowohl von der planerischen Seite als auch für die Ausführung Vorteile bei der Anwendung:

Planung

- Vereinfachte Detailausbildung durch eine nicht ausgeprägte Dämmebene in den Außenwänden

Herstellung

- Die homogene Materialität über den kompletten Wandquerschnitt führt zu einer Reduktion der Arbeitsgänge bei der Herstellung.
- Anwendung als Ortbeton oder Fertigteilbauweise
- Ersatz von erdölbasierten (PUR, EPS, XPS) oder primärenergieintensiv hergestellten Dämmprodukten (Mineralwolle, Blähton, Blähglas)
- Fertigung von oberflächenfertigen Bauteilen als sogenannte Architekturelemente. Einsparung von Gewerken im Bereich des Fassadenaufbaus.

Mit dem neuentwickelten Baustoff ist der Anspruch verbunden, wirtschaftlicher, ökologischer und damit auch nachhaltiger zu bauen. Das Material prädestiniert sich für einen Einsatz im Bereich der industrialisierten Vorfertigung. Unter diesen Bedingungen kann das Potential des Werkstoffs besser genutzt werden, als es in dem technologisch weniger weit entwickelten Baustellenprozess möglich ist.

Da infolge der integrierten Dämmung und der möglichen oberflächenfertigen Ausführung der Bauteile eine erhebliche Steigerung des Vorfertigungsgrades erzielt wird, ist es nur konsequent, auf der Baustelle wie im Holz- und Stahlbau zu einer Montagetechnologie zu kommen, die damit auch eine leichtere Demontage der Massivbauteile ermöglicht und die Option der Wiederverwendung der Bauteile eröffnet. Dieses Thema ist eng mit den Werkstoffgrundlagen verzahnt, wird jedoch in diesem Forschungsvorhaben nicht weiter vertieft. Technische Entwicklungsarbeit für derartige Konzepte wurden hierzu in [16] geleistet.

Die Ermittlung von ingenieurmäßig verwendbaren Kenngrößen des Materials wie E-Modul, Kriech- und Schwindzahlen, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit und das Abwitterungsverhalten soll eine vertiefte Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Einsetzbarkeit des Materials ermöglichen. Die ermittelten Werte erlauben dabei einen direkten Vergleich mit bestehenden Produkten und Materialien des Marktes.

Dieses Bild wird ergänzt durch eine vergleichende ökologische Betrachtung verschiedener gängiger Wandaufbauten mit dem neuen Produkt Aerogelbeton, die mit Hilfe der Software GABI erstellt wurde.

1.3 Ablauf des Vorhabens - Arbeitsprogramm

Das Projekt gliedert sich in insgesamt fünf Arbeitsbereiche, die von dem in Tab. 1-1 jeweils erstgenannten Projektbeteiligten federführend bearbeitet wurden. Die Bearbeitungsinhalte zielen auf eine möglichst breit gefasste Einschätzung des Materials in Hinblick auf dessen Leistungsfähigkeit, den zu beachtenden umweltrelevanten Faktoren und der Anwendungsmöglichkeiten. Die Projektschwerpunkte wurden durch die beiden Projektpartner, der Firma G.tecz und dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) durchgeführt. Die Materialprüfungsanstalt Stuttgart (MPA) und das Institut für Bauphysik (IBP) haben als Fremdauftragnehmer Versuche innerhalb des Arbeitsfeldes C durchgeführt, die durch das ITKE koordiniert wurden. Die maßgebliche Projektzeitschiene ergab sich durch die Bearbeitungsinhalte der Arbeitsfelder B und C.

Tab. 1-1 Übersicht Arbeitsfelder im Projekt

Arbeitsfeld	Beschreibung	Bearbeitung durch
A	Ökobilanzielle Bewertung Aerogelbeton	ITKE
B	Rezeptentwicklung; Laborversuche	G.tecz
C	Materialuntersuchung	G.tecz - ITKE - MPA - IBP
D	Ausarbeitung Standarddetails	ITKE

Das Arbeitsfeld B wird im Kapitel Materialentwicklung behandelt. Dieses Kapitel wurde federführend durch die Firma G.tecz erstellt. Im Kapitel Versuchsergebnisse wurde der Berichtsteil der MPA bezüglich der Untersuchungen zum Thema E-Modul, Frost-Tauwechselwiderstand, Schwinden und Kriechen sowie der Bestimmung der Wärmeausdehnung integriert.

1.4 Förderliche und hemmende Umstände

Der in der Antragsstellung vorgesehene Zeitplan unterlag kurz nach Projektbeginn bereits einer Verzögerung von ca. 2 Monaten, da aufgrund einer unvorhersehbaren Umstellung der Produktlinie im März 2011 der Hersteller Cabot sich außerstande sah, das für die experimentelle Entwicklung erforderliche Aerogelmaterial zur Verfügung zu stellen. Wegen aufgebrauchter Lagerbestände musste hier die Lieferung aus der neuen Produktion abgewartet werden. Gedämpft werden konnte dieser Zeitverlust durch Restbestände an Aerogele aus den Lagerbeständen des ITKE aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt, die für erste Untersuchungen und Versuche dem Projektpartner G.tecz zur Verfügung gestellt wurden.

Da der Ablauf des Projektteils B planmäßig durchgeführt werden konnte, wurden die ersten Versuche aus dem Arbeitsfeld C im November 2011 durch die beteiligten Stellen begonnen. Der Abschluss der Versuche erfolgte mit Ausnahme der Kriechversuche Ende Januar 2012. Im April 2012 mussten die Langzeitversuche jedoch abgebrochen werden, da die große Schwindverformung der Probekörper eine aussagekräftige Messung der Kriechverformung verhinderte. Aus dem gleichen Grund konnten auch die Versuche zur Wärmeausdehnung des Materials nicht abgeschlossen werden, da die große Schwindverformung die Messung überlagerte. Im Mai 2012 wurden die Prüfungen zur Wärmeausdehnung nach neuer Prüfvorschrift unter Beachtung der Minimie-

rung des Schwindeinflusses erneut durchgeführt. Leider bestand aufgrund der reservierten Prüfplätze nicht mehr die Möglichkeit, die Langzeitversuche zum Kriechverhalten erneut durchzuführen.

Das Vorhaben, für das Produkt Nanogel in Kooperation mit dem Hersteller eine ökologische Bilanzierung durchzuführen, lehnte der Hersteller aufgrund Geheimhaltungsinteressen ab. Die Zielerreichung im Rahmen dieses Forschungsprojekts Aussagen zu diesem Themenbereich zu erhalten erfolgte deshalb über eine vergleichende Abschätzung aus öffentlich zugänglichen Daten. Hierzu wurden Patentschriften und aussagekräftige Veröffentlichungen herangezogen. Durch dieses Vorgehen lässt sich eine Tendenz in der Umweltwirkung belegen. Treten zunehmend Nachfragen von Kundenseite bezüglich einer Ökobilanzierung ein, hat der Hersteller das Signal gegeben, dass in absehbarer Zeit eine EPD für das Nanogel Nachfolgeprodukt ENOVA[®] erstellt werden wird.

2 Ökologische Bilanzierung

2.1 Datengrundlagen

2.1.1 Definition der funktionellen Einheit

Als Grundlage einer ökologischen Bilanzierung muss zu Beginn ein zutreffendes Vergleichssystem, die sogenannte funktionelle Einheit definiert werden, mit der ein sinnvoller Vergleich zu bestehenden Systemen gezogen werden kann. Hier ist besonders auf die Vergleichbarkeit der Systemparameter untereinander zu achten. Da die neue Werkstoffentwicklung so verschiedene Eigenschaften wie Dämmung und Tragverhalten integriert, müssen in den entsprechenden Vergleichssystemen ebenfalls die zur Erfüllung dieser Aufgaben notwendigen Komponenten, in diesem Fall also die Dämmung und die Tragschale in der Bilanzierung betrachtet werden.

Als funktionelle Einheit wird für diese Analyse 1m^2 Außenwandfläche mit einem vorgegebenen U-Wert von $0,21\text{ W/m}^2\text{K}$ beidseitig oberflächenfertig ausgeführt (verputzt) betrachtet. Die oberflächenfertige Ausführung der Referenzsysteme berücksichtigt dabei die Eigenschaft des untersuchten Werkstoffs Aerogelbeton sowohl auf der Außenwand als auch auf der Wandinnenseite als Sichtbetonoberfläche ausgeführt werden zu können.

2.1.2 Systemvergleich

Um eine Aussage zur Umweltverträglichkeit des entwickelten Wandbaustoffs treffen zu können, werden vergleichsweise vier in Ihren Eigenschaften gleichwertige Außenwandaufbauten in massiver Bauweise betrachtet. Die gewählten Systeme entsprechen dem Stand der Technik und repräsentieren im Segment des Massivbaus ca. 95% des ausgeführten Bauvolumens.

- System 1 Porenbetonwand mit beidseitigem Putzaufbau
- System 2 Ziegelwand mit beidseitigem Putzaufbau
- System 3a Kalksandstein mit WDVS (EPS) und Innenputz
- System 3b Kalksandstein mit WDVS (Mineralwolle) und Innenputz

Für alle vier Systeme wird das gleiche Innen- und Außenputzmaterial verwendet. Lediglich den unterschiedlichen Empfehlungen für die Ausbildung der Putzstärke der verschiedenen Ausführungen wurde bei der Modellierung der Systeme Rechnung getragen. Die Aufwendungen für den Transport der Einzelkomponenten treffen auf alle Systeme gleichermaßen zu. Zusätzlich nehmen sich diese Anteile vergleichsweise gering aus, so dass diese in der Bilanzierung nicht weiter berücksichtigt wurden.

Für die Modellierung wurde die Software GaBi 4 verwendet. Im Anhang dieses Berichts in Abschnitt 8.1 sind die aufgestellten Prozesspläne und Stoffströme dokumentiert.

2.1.3 Bilanzierungsergebnisse

Die ausgewählten Systeme wurden hinsichtlich ihres Primärenergieaufwands für die Herstellung und deren Beitrag zum Treibhauspotential analysiert.

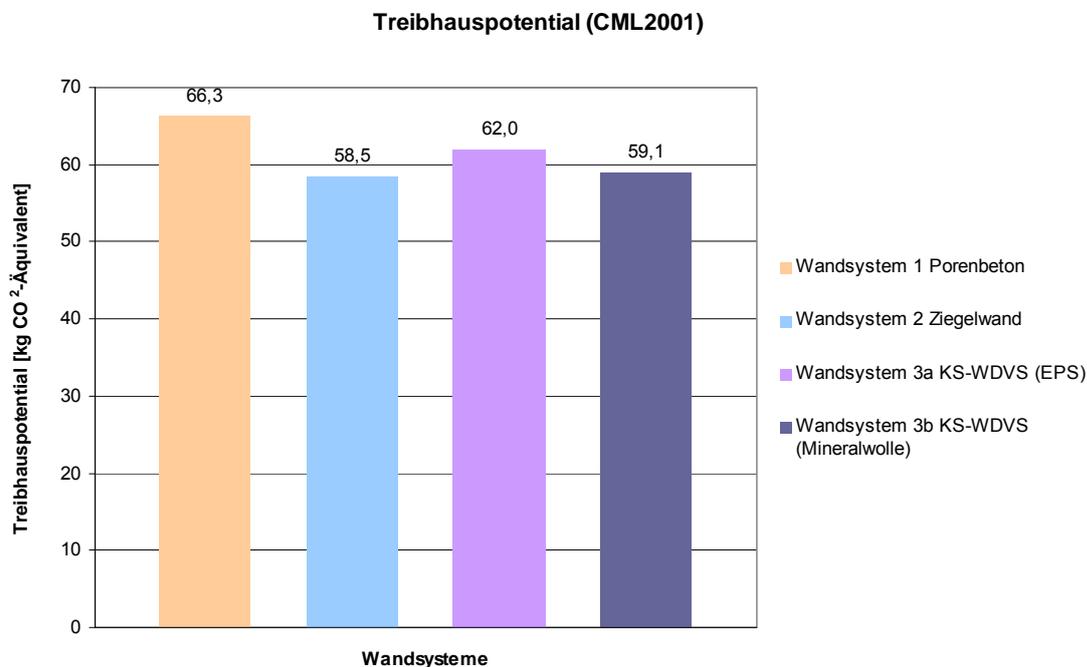


Abb. 2-1 Treibhauspotential von 1m² gleichwertiger Außenwandsysteme

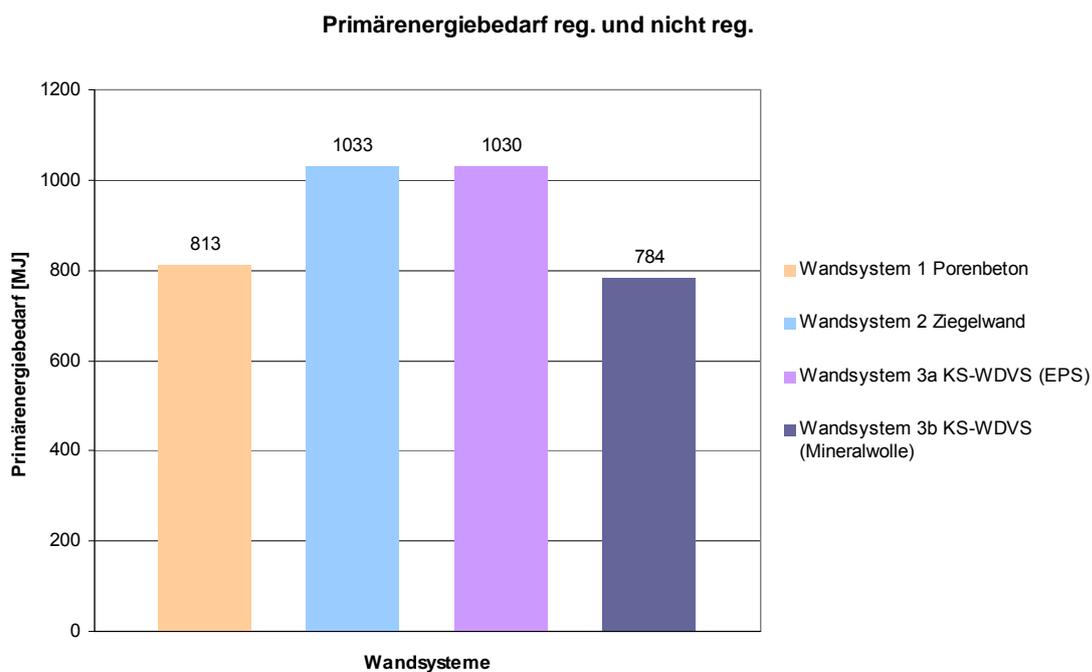


Abb. 2-2 Primärenergieaufwandsvergleich gleichwertiger Außenwandsysteme

Bezüglich des Beitrags zum Treibhauspotential in Abb. 2-1 geben alle vier betrachteten Systeme ein homogenes Bild ab. Der Wandaufbau aus Porenbeton übernimmt mit einem ca. 10% höheren Wert gegenüber dem Mittel der anderen Wandaufbauten die Spitzenstellung. Dagegen benötigt dieses System gemeinsam mit dem System 4 den geringsten Primärenergiebedarf für die Herstellung, wie aus Abb. 2-2 hervorgeht. In dieser Betrachtung zeigen die Ziegelwand und das Wandsystem mit einem WDVS mit EPS ein deutliches Plus von 30%. Dafür sind bei der Ziegelwand der etwas höhere Mörtelbedarf und die Herstellungsaufwendungen der gebrannten Ziegel verantwortlich. Die beiden Varianten 3a und 3b unterscheiden sich ausschließlich in der Ausführung der Dämmschicht, so dass festgestellt werden kann, dass EPS-Dämmplatten einen deutlich höheren Aufwand an Primärenergieeinsatz erfordern, als Mineralwolle-Dämmelemente.

2.1.4 Ökologische Bewertung des Aerogelbeton

Der Vergleich eines Wandsystems aus Aerogelbeton mit den Ergebnissen des vorhergehenden Kapitels ist aufgrund der fehlenden Ökobilanz für unterkritisch hergestelltes Aerogel nach dem patentierten Verfahren der Firma Cabot nur indirekt möglich. In der Literatur [11] findet man eine ökobilanzielle Aussage zu überkritisch hergestellten Aerogelplatten. Legt man die dort gemachten Angaben der Firma Aspen für deren Produkt Spaceloft® zu Grunde, so beläuft sich der Primärenergieaufwand für die Herstellung von 1m^3 Aerogel auf 8138MJ. Der Beitrag zum Treibhauspotential wird mit 648kg Co₂ Äquivalent je m^3 beziffert. Umgerechnet auf das erforderliche Volumen einer 40cm starken Wand mit 65Vol% Aerogelanteil bedeutet das einen Primärenergiebedarf nur für die Aerogelkomponente des Betons von 2116MJ und einem Co₂-Äquivalent von 168,5kg. Bei dem Produkt Spaceloft handelt es sich um monolithisch hergestellte Aerogelplatten großer Abmessungen mit einer hervorragenden optischen Qualität. Der Einsatzbereich dieses Produkts zielt auf den Ersatz von Isolierglasscheiben ab. Die hohe optische Qualität wird durch einen besonders aufwendigen Produktionsprozess mit einer überkritischen Trocknung erreicht.

Das in diesem Projekt zum Einsatz kommende Aerogel wird für die Zumischung im Beton als Granulat benötigt. Die Herstellung von Aerogelgranulat erfolgt mittels eines unterkritischen Herstellungsverfahrens. Das Flussdiagramm in Abb. 2-1 zeigt exemplarisch den Ablauf der Herstellung nach den Angaben im Patent der Firma Cabot [22]. Die Herstellung von Aerogele gliedert sich grundsätzlich in die drei Abschnitte Gelierung, Alterung und Trocknung. Die chemischen Ausgangskomponenten für die Herstellung des nassen Gels sind Salzsäure oder Schwefelsäure und eine mit SiO₂ versetzte Natriumwasserglaslösung. Große Unterschiede ergeben sich für die unterkritische und überkritische Herstellung vor allem in der Dauer des Produktionsprozesses und im Ablauf der Alterung und Trocknung. Eine kompakte Übersicht über die Produktionsmethoden und Eigenschaften von Aerogele findet man in [21]. Eine ökologisch bilanzierte Aufstellung der verwendeten Vorprodukte wurde in [20] durchgeführt. Der Bericht stammt aus dem Jahr 1993, so dass Produktionsdaten jedoch nicht mehr den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln.

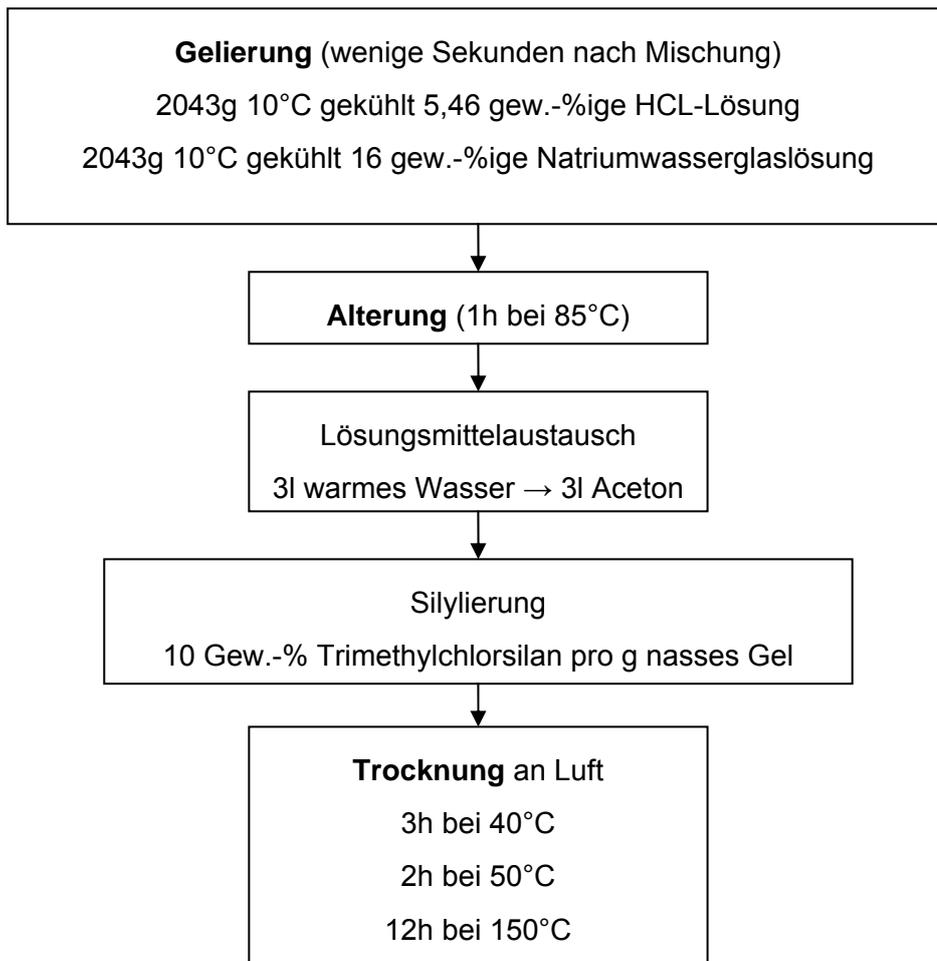


Abb. 2-3 Prozessdiagramm für unterkritisch hergestelltes Aerogel (hydrophobiert) als Granulat – Angaben aus dem Patent der Firma Cabot [22]

Während sich die überkritische Fertigung einer Aerogelplatte über mehrere Wochen hinzieht, erfolgt die Herstellung von Aerogelgranulat innerhalb eines Tages. Der Prozess läuft dabei kontinuierlich ab. Während der Alterung findet nur ein Lösungsmittelaustausch statt, wohingegen das Lösungsmittel bei monolithisch hergestellten Aerogelplatten bis zu 5-mal innerhalb des Alterungsprozesses ausgetauscht wird. Als Lösungsmittel kommt bei unterkritisch hergestellten Aerogel Aceton zum Einsatz. Bei überkritisch hergestellten Aerogel wird Methanol verwendet. Die Alterung und Trocknung von Aerogelgranulat geschieht unter normalen Luftdruckbedingungen und einer moderaten Prozesstemperatur von max. 150°C, die über einen Zeitraum von 17h schrittweise gesteigert wird. Durch den Verzicht auf die überkritischen Trocknungsbedingungen (270°C – 100bar) unterliegt das Aerogel hohen mechanischen Belastungen. Abb. 2-4 zeigt den unterkritischen Trocknungsvorgang in den drei Stadien Trocknung – Schrumpfung – Spring-Back und Bruch. Das Gelnetzwerk unterliegt aufgrund der hohen Kapillarkräfte bei der Trocknung einer Schrumpfung von bis zu 28 Vol.-%. Die dabei auftretenden Spannungen zerreißen das Gelnetzwerk jedoch in maximal 4mm große Bruchstücke.

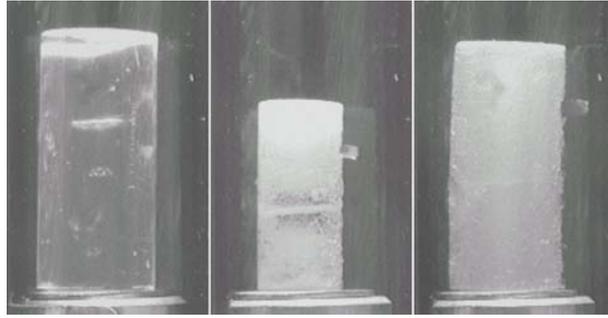


Abb. 2-4 Schrumpfung eines Aerogelblockes während der unterkritisch durchgeführten Trocknung (Quelle: Cabot)

Das erzeugte Aerogel kann sowohl transparent als auch opak hergestellt werden. Für eine Anwendung im Beton ist opakes Aerogel vollkommen ausreichend, was die Prozess-technischen Anforderungen reduziert. Tatsächlich ist das opake Material teurer, da hauptsächlich für transparentes Aerogelmaterial Anwendungsbereiche entwickelt wurden und opakes Material deshalb am Markt kaum zur Verfügung steht.

Bei der ökologischen Bilanzierung der einzelnen Prozessabschnitte in [11] wurde analysiert, dass die Gelierung einen Anteil von 3% am Primärenergieaufwand ausmacht. Der Anteil am Treibhauspotential ergab sich mit ca.1%. Die Ausgangsprodukte und deren Verarbeitung werden bis zu diesem Punkt für beide Verfahren als ähnlich in Ihrer Umweltwirkung angenommen. Somit besteht eine direkte Vergleichbarkeit für den Prozessabschnitt der Gelierung. Um genauso sparsam mit Primärenergieressourcen umzugehen, wie das effizienteste Referenzmodell, stehen für die noch ausstehenden Prozessschritte der Alterung und Trocknung insgesamt 270MJ zur Verfügung. Es scheint aufgrund der kurzen Prozessdauer und der relativ niedrigen Trocknungstemperatur unwahrscheinlich, dass das vorhandene Primärenergieguthaben dafür vollständig eingesetzt werden muss.

Betrachtet man den Beitrag zum Treibhauspotential, so lässt sich rechnerisch bestimmen, dass allein der bereits reduzierte Zementanteil ein CO₂-Äquivalent von 74kg einbringt (275 kg/m³ Zementanteil). Dieser Anteil übersteigt bereits deutlich das Ergebnis des schlechtesten Referenzsystems von 66kg. Bezüglich des Treibhauseffekts ist das Bindemittel Zement sehr ungünstig. Langfristig wird hier nur durch Produktentwicklungen wie den „Celitement“ Abhilfe geschaffen werden können, der aufgrund seiner effizienten Herstellung als umweltfreundliche Alternative gelten darf.

3 Umweltwirkung

3.1 Werkstoffrecycling

Bereits in den frühen 90er Jahren wurde vom österreichischen Ministerium für Umwelt eine Technikfolgenabschätzung für den massenhaften Einsatz von Aerogele in Auftrag gegeben [20]. Für Aerogelgranulat besteht demnach eine gute Möglichkeit der Weiter- bzw. Wiederverwertung. Als primäre Verwendung wurde von einem Einsatz der Aerogele als transluzente Dämmung in Fenstersystemen ausgegangen. Durch die zerstörungsfreie Demontage der Fensterelemente lässt sich das Aerogel zu 100% sortenrein wiedergewinnen. Der Einsatz als Dämmmaterial in zementgebundenen Werkstoffen wird in der Studie als ein möglicher sekundärer Verwendungszweck angenommen.

Eine Weiterverwendung der Aerogele auf Werkstoffebene ist mit der Frage verbunden, wie das Material wiedergewonnen werden kann. Hierzu ist es erforderlich, diese Aufgabe in die bestehende Recyclinginfrastruktur für Betonabbruchmaterial zu integrieren. Im Rahmen dieses Projekts wurden Methoden untersucht, wie Aerogele möglichst sortenrein aus Betonabbruch wiedergewonnen werden können. Für diesen Zweck werden die besonderen Eigenschaften von Aerogele genutzt.

- Aerogele weisen aufgrund ihrer Oberflächenmodifikation eine sehr geringe Haftungsneigung auf. Sie lassen sich daher sehr einfach aus dem Betongefüge herauslösen.
- Aerogele haben eine homogene Struktur. Bruchflächen infolge einer mechanischen Einwirkung stellen gleichzeitig wieder eine neue Oberfläche dar.
- Aerogele haben mit ca. 150 kg/m^3 eine wesentlich geringere Dichte als die übrigen Betonkomponenten. Der deutliche Dichteunterschied kann für die Materialtrennung ausgenutzt werden.

Die effektivste Form einer Nachnutzung erfolgt durch die Weiterverwendung des Aerogelwerkstoffs auf Bauteilebene. Die Grundidee umfasst die Nutzung des Materials als Werkstoff für vorgefertigte Elemente, die mit einem lösbaren Verbindungssystem montiert werden. Diese Elemente können kontrolliert rückgebaut und durch eine Remontage an anderer Stelle in gleicher Funktion wiederverwendet werden. Die konzeptionellen Grundlagen werden in [16] erarbeitet und diskutiert. Zu diesem Zweck kann auch die Infrastruktur der Bauteilbörsen [5] genutzt werden.

Grundsätzlich ist jedoch auch die Wiederverwendung der Aerogele auf Materialebene denkbar. Hierzu wird das Material durch einen konventionellen Abbruch wiedergewonnen und über die Infrastruktur der Bauschutttaufbereitung in verschiedene Korngruppen getrennt zur Verfügung gestellt. Kernstück dieser Anlagen sind die maschinellen Einrichtungen zum Zerkleinern und Sieben.

3.1.1 Zerkleinern

Zum Zerkleinern des Materials stehen Backenbrecher oder Prallbrecher zur Verfügung. Backenbrecher erscheinen für die Bearbeitung von Aerogelmaterial die technisch sinnvollere Lösung. Nach dem Prinzip eines Nussknackers wird die Materialstruktur durch die rhythmische Quetschung durch ein härteres Material kontinuierlich zerkleinert. Die

Korngröße wird durch die Breite des Austrittspalts festgelegt. Backenbrecher eignen sich besonders gut für mittelharte Stoffe. Prallbrecher zerkleinern das Material, indem das Brechgut mit hoher kinetischer Energie auf einen härteren und spitzeren Gegenstand geschleudert wird. Materialbereiche mit geringer Festigkeit werden dadurch besonders gut aufgeschlossen, so dass sich mit dieser Methode sehr gut härtere Einschlüsse aus einer weicheren Umgebung herauslösen lassen. Diese Form der Aufbereitung beeinflusst dadurch sehr stark die Kornzusammensetzung des Zielzyklats Aerogel, da sie die weichste Komponente im Werkstoffgefüge darstellen.

An der MPA Stuttgart wurden zwei Versuchsserien mit einem Laborbackenbrecher des Fabrikats Fritsch durchgeführt. Als Material dienten die bereits getesteten Probewürfel der Verbunduntersuchung. Durch gezielte Hammerschläge wurde in einem ersten Schritt ein im Durchmesser ausreichend kleines „Abbruchmaterial“ hergestellt, das nachfolgend im Backenbrecher gleichmäßig zerkleinert wurde. Dazu wurden die Bruchstücke getrennt nach dem Aerogelgehalt der Probekörper in drei verschiedenen Stufen zerkleinert. Das Gerät kann über 10 Stufen von 1 – 15mm Spaltweite eingestellt werden. Für den Versuchsdurchlauf wurden die Stufen 1, 3 und 5 gewählt.



Abb. 3-1 Simulation Bauwerksabbruch - Zerkleinern im Laborbackenbrecher - drei unterschiedliche Kornzusammensetzungen des Materials

Während des Brechvorgangs konnte keine sichtbare Staubentwicklung beobachtet werden, obwohl der Brecher keine besondere Kapselung aufwies.

3.1.2 Sieben

Im Anschluss an das Brechen wurde eine Siebung des Materials mit einem Normsieb-satz der Maschenweiten 0,125 – 0,25 – 0,5 – 1 – 2 – 2,8 – 4 – 8 – 16 durchgeführt. Abb. 3-2 zeigt den Verlauf der ermittelten Sieblinien für die Probekörper mit einem Aerogelgehalt von 70 Vol%. Erwartungsgemäß beinhaltet das Bruchmaterial mit der größten Spaltweiteneinstellung 5 den höchsten Größtkornanteil. Je kleiner die betrachtete Kornfraktion wird, umso geringer fällt jedoch der Einfluss der Spaltweite aus. Der Materialanteil <2mm fällt für alle drei Sieblinien sehr ähnlich aus. Die Sieblinie mit dem kontinuierlich höchsten Feinanteil wird mit der kleinsten Spaltweite des Backenbrechers erzielt.

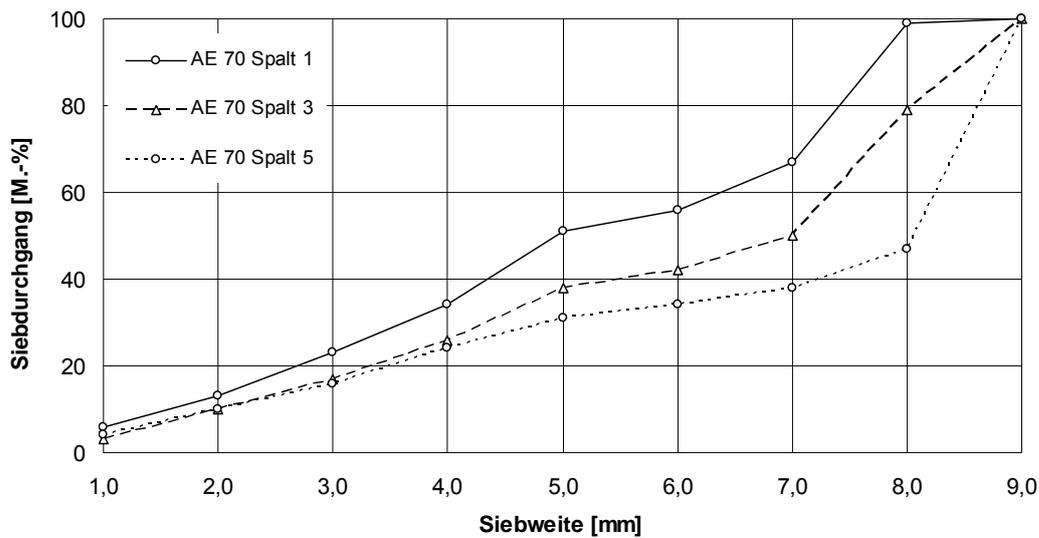


Abb. 3-2 Sieblinienvergleich für die Spaltweitereinstellung 1 - 3 - 5

Bis zu einer Siebweite von 2,8mm erhält man als Rückstand unterschiedlich große Betonrezyklatstücke (Abb. 3-3 links), die in ihrem Gefüge weitgehend intakt sind. Ab der nächst kleineren Maschenweite von 2mm findet man auf dem Sieb erstmals einwandfrei abgetrennte Aerogelteilchen vor (Abb. 3-3 Mitte). Die Bruchstücke haben sich vollständig aus der Zementmatrix gelöst und liegen im Sieb separiert vor. Diese Beobachtung wiederholt sich für alle kleineren Maschenweiten. Je feiner die Siebung wird, umso größer wird der Anteil an abgetrennten Aerogelgranulat (Abb. 3-3 rechts).



Abb. 3-3 Betonrezyklat mit zunehmender Trennquote für kleinere Korndurchmesser – Kornband 16 – 2,3mm (links), Siebrückstand bei 2mm (Mitte) und 1mm (rechts) Maschenweite

Infolge der feiner werdenden Bestandteile verhält sich das Rezyklat zunehmend wie eine Flüssigkeit. Diese Eigenschaft ist Aerogelen aufgrund ihrer Hydrophobierung zu Eigen und beruht auf der elektromagnetischen Abstoßung gleichgeladener Teilchen. Sobald das Teilchengewicht einen gewissen Grenzwert unterschreitet, reichen die Abstoßungskräfte aus, um ein aneinander Gleiten des Granulats zu bewirken. Dieser Effekt tritt ab einer Maschenweite von 0,25mm auf (Abb. 3-4 Mitte). Es kommt zu einer Tröpfchenbildung, obwohl das Material vollständig trocken ist.



Abb. 3-4 zunehmender Anteil an gelösten Aerogelfeinstpartikel lässt das Rezyklat sich wie eine Flüssigkeit verhalten – Kornband 16–0,5mm (links), Siebrückstand bei 0,25mm (Mitte) und 0,125mm (rechts) Maschenweite

Die Siebung und Klassierung hat deutlich gezeigt, dass eine effektive Trennung von Aerogele und Zementmatrix vor allem ab kleineren Korngruppen <2mm gut möglich ist. Für die sortenreine Trennung des Materials sollte daher ein möglichst hoher Sand- bzw. Mehlkornanteil im Bruchmaterial angestrebt werden.

Als Brecher hat sich der Backenbrecher als geeignet herausgestellt, da er auf Materialschonende Weise die Zerkleinerung vornimmt. Die Versuche haben jedoch auch gezeigt, dass mit kleineren Spaltbreiten eine größere Verstopfungsgefahr des Brechers verbunden ist. Da das Material sehr leicht ist, reicht das Gewicht des nachfolgenden Brechguts kaum aus, um das fein gemahlene Material durch den Austrittsspalt zu drücken. Hier muss durch geeignete technische Maßnahmen der kontinuierliche Materialfluss durch den Brecher auch in großtechnischen Anlagen gewährleistet bleiben.

3.1.3 Materialtrennung

Für eine Trennung des Materials kommt aufgrund der hohen Dichtunterschiede von Zement (3000 kg/m^3) und Aerogelgranulat (150 kg/m^3) eine Wasserabscheidung oder Windsichtung in Frage.

Aufgrund der wasserabweisenden Eigenschaften, die nicht nur den Beton sondern auch das Rezyklat in sämtlichen Korngrößen auszeichnet, lässt sich durch eine Nasssichtung keinerlei Trennung erzielen. Es kommt zu einer Schichtung von trockenen Granulat und dem zugesetzten Wasser. Es ist sogar möglich, das sich Rezyklat völlig unbenetzt zwischen zwei Wasserschichten einlagert (Abb. 3-5 rechts).

Unter diesen Umständen stellt die Windsichtung die einzige technische Alternative dar, um das Aerogelgranulat wirksam von den Zementbestandteilen zu trennen. Der mechanischen Zerkleinerung durch einen Backenbrecher sind jedoch technische Grenzen gesetzt. Die im Beton eingesetzten Feinpartikel mit einem Durchmesser von nur wenigen Micrometer können auf diese Weise nicht aufgeschlossen werden, und verbleiben im Mehlkorn. Dieses Material weist jedoch durch die Hydrophobierung hochinteressante Eigenschaften auf, für die es eine noch zukünftige Nutzung geben wird. Als alternative Nutzung verbleibt die Zugabe des rezyklierten Zuschlags in eine neue Aerogelbetonmischung.



Abb. 3-5 Hydrophobes Aerogelbetonrezyklat bildet eine deutliche Trennschicht zu Wasser aus

3.2 Gesundheitsrelevante Aspekte

Dieses Projekt leistet aufgrund der durchgeführten Untersuchungen in erster Linie einen Beitrag zur Innovationsforschung. Aufgrund der im Vorfeld auftretenden Fragestellung bezüglich der gesundheitsrelevanten Aspekte dieses Materials, wird in diesem Abschnitt der Stand der Sicherheitsforschung aufgezeigt und durch eigene Erkenntnisse ergänzt. Die am Projekt beteiligten Partner und Institute sind aufgrund ihrer Ausstattung und Ausrichtung nicht in der Lage, eine Gefährdungsbewertung für Nanomaterialien, in diesem speziellen Fall für modifizierte Siliziumdioxid-Verbindungen vorzunehmen.

3.2.1 Karzinogenes Potential

Nach einer umfassenden Auswertung der vorliegenden Studien kommt das Umweltbundesamt in Bezug auf amorphes SiO_2 zu dem Ergebnis, dass das Material im Gegensatz zu kristallinen Silizium als ein „weitgehend ungefährliches Material“ angesehen werden kann [23]. In den ausgewerteten Studien erwies sich amorphes Siliziumdioxid als nicht toxisch und nicht karzinogen. Die Einatmung sehr hoher Dosen amorphen Siliziums können Entzündungen in der Lunge hervorrufen, die jedoch schon nach wenigen Tagen wieder abklingen. Die geringen zu beobachtenden Beeinträchtigungen werden auf die gute Löslichkeit und die damit einhergehende Biopersistenz zurückgeführt.

Trotz einiger Studien zum Thema Silikatexposition kann keine klare Aussage zum Gefährdungspotential getroffen werden, da die Probanden sowohl amorphen als auch kristallinen SiO_2 -Stäuben ausgesetzt wurden. Als gering kann jedoch der Einfluss der Partikelgröße eingestuft werden. Obwohl Aerogele Materialeigenschaften eines Nanomaterials aufweisen, handelt es sich hierbei nicht um ein Nanomaterial im definierten Sinne. Obwohl Aerogele aus Primärpartikeln bestehen, die weniger als 100nm groß sind, weisen die kleinsten stabilen Aggregate eine Mindestgröße von einigen Micrometern auf [13]. Die Materialeigenschaften beruhen hauptsächlich auf der ca. 20-80nm großen Porenstruktur, die gleichmäßig verteilt in den Aggregaten vorliegt.

Da verlässliche Messtechniken sich derzeit erst in der Entwicklung befinden oder gerade zum Einsatz gebracht wurden, ist eine aussagekräftige Datenlage noch nicht vorhanden. Die chemische Verbindung SiO_2 ist unter E551 ebenfalls als Zusatzstoff in

Lebensmittel zugelassen und gilt als unbedenklich. Der Stoff dient als Trennmittel in Trockenlebensmittel oder als Trägerstoff für sekundäre Wirksubstanzen².

3.2.2 Expositionsrelevanz

Unabhängig vom Gefährdungspotential ist zu untersuchen, auf welche Weise der Stoff in die Umwelt gelangen kann, sobald er in einem Verbundwerkstoff wie Aerogelbeton zur Anwendung kommt. Bezüglich der Expositionsrelevanz gehören Aerogele durch die Bindung in und auf einer festen Matrix zu der Gruppe der niedrigsten Gefährdungsstufe. Die dennoch freigesetzten Partikel können jedoch insbesondere durch ihre Freisetzung auf der Innenwandseite in geschlossene Räume durch Inhalieren aufgenommen werden. Diese Form der Aufnahme stellt den wahrscheinlichsten Expositionspfad dar. Als untergeordnete Möglichkeit besteht auch der Weg der oralen Aufnahme.

Die Anwendungsform von Aerogele in der geplanten Form ist eher unkritisch zu bewerten. Die Beeinträchtigung des Menschen besteht nur indirekt, da die Verwendung in einem Produkt erfolgt, welches jedoch eine Aerogelhaltige Oberfläche aufweist und daher nicht als geschlossene Anwendung gelten kann. Durch eine Beschichtung der Wandinnenseite lässt sich jedoch die Exposition des Materials wirkungsvoll eindämmen.

Eine gesonderte Betrachtung erfordert die Herstellung, Bearbeitung und Entsorgung der Bauteile. Während der Produktion greifen die gültigen Arbeitsstättenrichtlinien, die den korrekten und ungefährlichen Umgang mit dem Material vorschreiben [4]. Während der Bearbeitung und Entsorgung werden größere Materialmengen freigesetzt. Hier ist im gleichen Maße wie für andere Materialien für eine wirksame Eindämmung der Staubexposition zu sorgen.

3.2.3 Spezifische Angaben zu Nanogel®

Auf Ihrer Website stellt die Firma Cabot Corporation eine Vielzahl weiterführender Informationen zum Material Nanogel® zur Verfügung. Demnach wurde als jüngster Tierversuch im August 2003 ein Haut-Sensibilisierungstest nach der Buehler-Methode durchgeführt. Weitere Tests werden zukünftig im konkreten Verdachtsfall oder aufgrund gesetzlicher Vorschriften durchgeführt. Cabot erklärt, dass Nanogel keine Chemikalie beinhaltet, die nachweislich als Auslöser für BSE oder der Creutzfeld-Jakob Krankheit in Verbindung zu bringen ist. Aufgrund der vollständigen Abstinenz verschiedener organischer und anorganischer Stoffe bei der Herstellung und der Handhabung des Produkts behauptet Cabot nach bestem Wissen, dass diese Stoffe auch nicht als Verunreinigung im Produkt auftauchen können. Dazu zählen unter anderem Asbest, Insektizide, Fungizide, Flammhemmer, PCB, PFOS, Schwermetalle und Biozide. Ebenso beinhaltet das Produkt keinerlei genetisch veränderte Bestandteile. Nanogel® besteht zu 100% aus synthetisch hergestellten amorphen SiO₂ ohne kristalline Bestandteile. Dies lässt sich anhand eines Röntgenbeugungsmusters nachweisen. Amorphe Strukturen führen dabei zu einem stark gestreuten Diagramm ohne die typischen scharf, und gut aufgelösten Streusignale, wie sie für kristalline Strukturen charakteristisch sind.

² Quelle: www.zusatzstoffe-online.de

3.2.4 Fachliche Kontakte

Im Rahmen des Projekts wurden diverse Forschungseinrichtungen kontaktiert, um ein aktuelles Bild der Forschungslandschaft zum Thema Gefährdungspotential von SiO₂-Aerogele zu bekommen. Die Auskünfte vom Institut für thermische Verfahrenstechnik (Prof. Smirnova) in Hamburg, dem ZAE in Würzburg (Dr. Reichenauer) und dem Fachbereich Materialforschung und Physik der Universität Salzburg (Prof. Hüsing) waren alle gleichlautend, dass sowohl das Gefährdungspotential als auch die ökobilanzielle Betrachtung unterkritisch hergestellter Aerogele derzeit keinen Forschungsgegenstand darstellen.

4 Materialentwicklung

4.1 Aufgabenstellung

Durch eine Kombination von hochdämmenden Aerogelen sowie einer Hochleistungsmatrix aus UHPC soll ein Werkstoff entwickelt werden, der die Eigenschaft der Wärmedämmung als monolithisches Bauteil erfüllt und dabei genügend Festigkeit hat, um die Anforderungen des Hochbaus zu erfüllen. Im Ergebnis soll ein zementgebundener Werkstoff stehen der in einem Betonwerk zu monolithischen Wandelementen verarbeitet werden kann, welche nach den Zusammenbau zu einer sich selbst tragenden Wohneinheit die Forderungen an den Wärmeschutz ohne zusätzliche Dämmsysteme erfüllen. Dabei werden, neben der Festigkeit und der Wärmeleitfähigkeit die üblichen Anforderungen an Kriechen, Schwinden und Frostsicherheit gestellt.

4.2 Analyse der Aufgabe

Um die isolierenden Eigenschaften des Aerogels möglichst effizient auszunutzen muss der Anteil im Verhältnis zum Leim sehr hoch angesetzt werden. Übliche UHPC – Rezepturen enthalten ca. 500 - 600l Leim der sich aus Bindemitteln, reaktiven und nicht-reaktiven Zusatzstoffen sowie Wasser und Zusatzmitteln zusammensetzt. Der Leim hat, je nach Zusammensetzung, eine Dichte von ca. 1,9 – 2,0 kg/dm³. Um bei einem Aerogel - Beton eine Dichte von 0,5 kg/dm³ zu erreichen darf der Anteil an Leim rechnerisch nur bei ca. 20 % liegen.

Da das Aerogel elastisch verformbar ist und somit keine wesentliche Druckfestigkeit aufweist, müssen die gesamten einwirkenden Kräfte von der Matrix (Leim) aufgenommen werden. Dabei wird die aufnehmbare Kraft durch die Zusammensetzung des Leims sowie dessen Anteil am Gesamtgefüge bestimmt. In Tab. 4-1 ist die Beeinflussbarkeit verschiedener Eigenschaften des Betons unter sich verändernden Verhältnissen von Aerogel und Leim zusammengestellt.

Tab. 4-1 Auswirkung des Verhältnis Aerogel zu Leim auf verschiedenen Eigenschaften

Entwicklung der Parameter	Anteil an 1 m ³	Hauptstoff	Anteil an 1 m ³	Entwicklung der Parameter
Dichte → niedriger				Dichte → höher
λ- Wert → niedriger	höher	Aerogel	niedriger	λ- Wert → höher
Festigkeit → niedriger				Festigkeit → höher
Verarbeitung → schlechter				Verarbeitung → besser
Dichte → höher				Dichte → niedriger
λ- Wert → höher				λ- Wert → niedriger
Festigkeit → höher				Festigkeit → niedriger
Verarbeitung → besser				Verarbeitung → schlechter

Durch eine Erhöhung des Aerogel – Anteils ist es möglich die Dichte und somit auch den λ -Wert zu senken. Gleichzeitig bedeuten aber die Reduzierung des Matrix – Anteils eine Absenken der aufnehmbaren Kräfte sowie eine Verschlechterung der Verarbeitbarkeit. Die Verarbeitbarkeit kann im Hinblick auf den geplanten Einsatzzweck und das Herstellungsverfahren nicht völlig vernachlässigt werden und die Festigkeit des Materials ist für statisch tragfähige Bauteile von entscheidender Bedeutung. Somit ergibt sich die Aufgabe, ein Material zu entwickeln, das allen geforderten Ansprüchen gerecht wird – geringe Dichte, niedriger λ -Wert, hohe Festigkeit und gute Verarbeitbarkeit. Da diese Eigenschaften teilweise konträr laufen, muss eine Optimierung der relevanten Parameter gefunden werden.

4.3 Herstellen, Lagern und Prüfen von Prüfkörpern

4.3.1 Allgemein

Als Probekörper zu Prüfung von Biegezug- und Druckfestigkeit wurden Prismen der Abmessung 40x40x160 mm verwendet. Nach 2 Tagen wurden die Probekörper ausgeschalt und in mit Wasser eingesprühten Folientüten eingeschlagen. In diesen Folien verblieben die Proben bis zum jeweiligen Prüftermin. Die Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeiten erfolgte mit einer Automax 5 Prüfanlage der Firma CONTROLS: Biegezug (150 kN) - und Druckprüfrahmen (3000 kN).

4.3.2 Mischen

Durch die hydrophobe Oberfläche des Aerogels und der damit verbundenen Unwilligkeit sich mit einem Wasser basierten System zu vermischen betrug die Mischzeit, bei herkömmlichen Mischabläufen, bei den ersten Versuchen bis zu 10 min in einem Hochenergiemischer der Firma Eirich. Eine Übertragung auf einen Zyklus - Mischer war unter diesen Umständen nicht möglich. Durch entsprechende Versuchsreihen wurde ein Mischverlauf herausgearbeitet, der in beiden Mischertypen einen annähernd gleich guten Aufschluss der Mischung sicherstellte. Die Mischzeit betrug am Ende bei beiden Mixern ca. 4 min.

4.3.3 Schalen

Bei normalem Beton ist das Entschalen der Probekörper nach zwei Tagen problemlos möglich. Die Oberflächenzugfestigkeit des Betons ist zu diesem Zeitpunkt bereits höher als die Adhäsionskräfte, die zwischen Schalung und Beton auftreten. Diese Haftung wird durch den Einsatz von Trennmittel weiter reduziert. Abb. 4-1 zeigt, dass dies bei Aerogel - Betonen nicht ausreichend ist. Auch die Verwendung von Teflon oder Silicon brachten nicht die gewünschten glatten und geschlossenen Oberflächen.

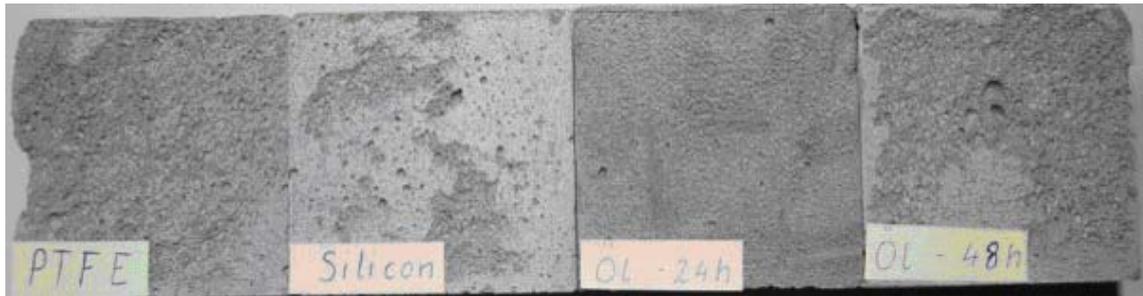


Abb. 4-1 Probekörperoberflächen mit verschiedenen Trennmitteln



Abb. 4-2 Probekörperunterseite mit verschiedenen Trennmitteln

Die Ursache für dieses Problem liegt in der geringen Festigkeit des Betons gerade im jungen Alter. Lediglich die Unterseiten lassen sich nach zwei Tagen sauber von der Schalung lösen. Dies wird bedingt durch eine sehr dünne (ca. 0,5mm) Leimschicht, die sich auf der Schalung absetzt. Das Absetzen erfolgt durch die sehr intensive Verdichtung auf dem Rütteltisch.

Die sicherste Möglichkeit, ansprechende Oberflächen zu erzielen, liegt in der Verwendung dünner Folien, die vor dem Betonieren auf die Schalung aufgezogen wird. Beim Entschalen verbleibt die Folie auf dem Beton und kann von diesen danach sauber abgezogen werden. Diese Methode ist allerdings sehr zeitaufwendig und für einen großtechnischen Einsatz nicht geeignet. In der Folge wurden weitere Versuche mit Schalölen, Wachsen und alternativen Trennmitteln durchgeführt und dabei eine sprühfähige Wachsart ermittelt, die ein befriedigendes Ergebnis brachte. Durch die Verwendung dieser bestimmten Wachsart lassen sich die Probekörper ohne Abrisse aus der Form lösen.

4.3.4 Verdichten

Eine weitere Herausforderung stellte die Verdichtung dar. Normalbetone und UHPC lassen sich in Ihrer Verarbeitbarkeit in bestimmten Grenzen einstellen. Dazu gehört auch die Verdichtungswilligkeit. Dies wird durch die Zusammensetzung der Sieblinien und die Menge vom Leim und Mörtel beeinflusst. Ein SCC (self compacting concrete) verdichtet sich ausschließlich durch sein Eigengewicht das die enthaltene Luft durch die entsprechend eingestellte Matrix drückt. Das Eigengewicht erzeugt dabei genug Energie, um das Fließen und Verdichten dieser Betone sicherzustellen. Das Einbringen von zusätzlicher Energie durch z.B. Rütteln regt die enthaltenen Zuschlagkörner eines normalen Betons an sich in eine optimal kompakte Lage zu begeben und dabei leichtere Stoffe wie Luft oder auch Leim zu verdrängen. Bei einer entsprechenden Höhe eines

Bauteils wird auch bei diesen Betonen das Eigengewicht aktiviert. Bei einem nicht ausgewogenen Verhältnis von Leim / Mörtel zum Zuschlag, kommt es zu einem Absetzen des Leims an der Oberfläche.

Ein Aerogel – Beton verhält sich hier anders. Das Raumgewichtsverhältnis von Leim zu Zuschlag ist hier umgekehrt und weist zusätzlich eine wesentlich höhere Differenz auf:

- Normalbeton 2,0 : 2,6 kg/dm³
- Aerogel – Beton 2,0 : 0,14 kg/dm³

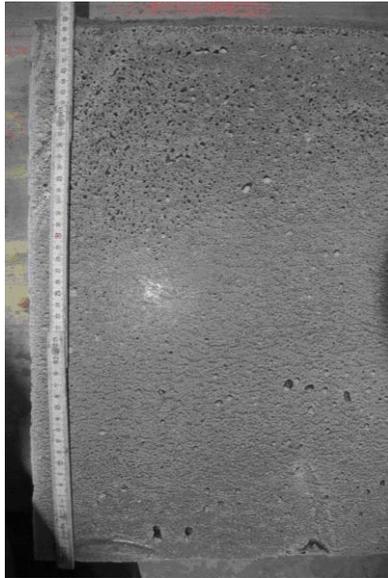


Abb. 4-3 WLF-Probekörper 500x500x50

Bei einer Entmischung setzt sich der Leim, wie in Abb. 4-2 zu erkennen, unten ab während das wesentlich leichtere Aerogel aufschwimmt. Das Eigengewicht des Aerogel – Betons ist ab einen bestimmten Füllgrad nicht mehr ausreichend um einen signifikanten Einfluss auf die Verdichtungswilligkeit auszuüben. Hinzu kommt das mit steigendem Aerogel – Gehalt die Verarbeitung auf Grund des sinkenden Leimgehalts stetig schlechter wird. In Summe macht dies einen intensiven Einsatz von Verdichtungsenergie notwendig. Insbesondere bei der Herstellung der Platten für die λ -Wert-Bestimmung werden die Probleme erkennbar. Um die Planparallelität und Ebenheit der Platten sicherzustellen wurden diese in einer stehenden Schalung gefertigt. Abb. 4-3 zeigt eine dieser Platten.

Zu erkennen ist die, abgesehen von den größeren Luftporen, zunehmende Porosität im oberen Bereich der Platte. Die eingeleitete hochfrequente Rüttelenergie wird über die Höhe immer stärker gedämpft. Zusätzlich nimmt der an sich bereits geringe Einfluss des Eigengewichtes mit zunehmender Höhe ebenfalls weiter ab. Der Einfluss der Bauteilgeometrie wird weiter deutlich wenn man sich das in Abb. 4-4 dargestellte Verhältnis der Dichten von Prismen und der stehend hergestellten Platten ansieht. Mit zunehmendem Gehalt an Aerogel steigt auch die Differenz (Abstand zur Nulllinie) zwischen den Dichten. Durch die Verschlechterung der Verarbeitbarkeit und der damit verbundenen Minimierung der Verdichtungswilligkeit über die Höhe der Platten erhöht sich der Anteil an verbleibender Luft im Gefüge, was zu einer weiteren Absenkung der Dichte gegenüber flachen Probekörpern führt.

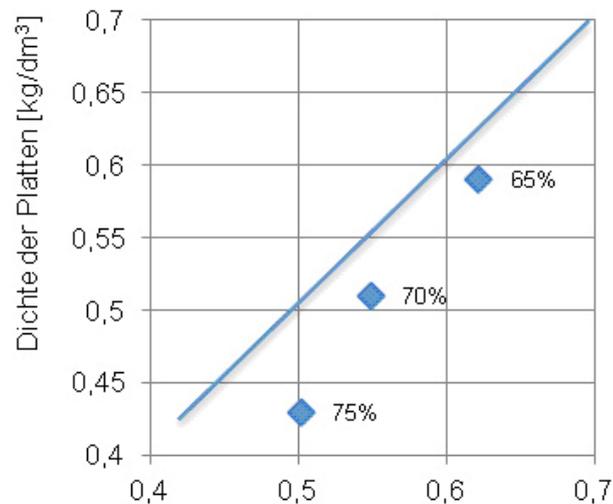


Abb. 4-4 Verhältnis der Dichten von Platten und Prismen

Für Standardprüfkörper bis zu einer Höhe von 300 mm wurde ein Verdichtungsregime mit den entsprechenden Frequenzen des Rütteltisches erstellt, das die Herstellung homogener Prüfkörper mit nur geringen Lusteinschlüssen ermöglicht.

4.3.5 Lagerung der Probekörper

Die übliche Lagerung von Proben unter Wasser ist bei Prüfkörpern aus Betonen mit einer Dichte $> 1,0 \text{ kg/dm}^3$ nicht ohne weiteres möglich, da diese aufschwimmen und somit nicht vollständig von Wasser umspült werden würden. Ein Auflastgewicht um die Proben unter Wasser zu halten sollte wegen der niedrigen Festigkeiten gerade im jungen Alter nicht verwendet werden. Als Alternative zur Wasserlagerung wurde eine Lagerung bei einer entsprechend hohen Luftfeuchtigkeit herangezogen. Dazu wurden die Proben nach dem Entschalen in Plastiktüten gestellt und mittels einer Sprühflasche mehrfach mit Wasser benetzt. Anschließend wurden die Tüten luftdicht verschlossen und bis zum Prüftermin bei 20 °C gelagert.

4.4 Rezepturentwicklung

4.4.1 Voruntersuchungen

Anhand der technischen Unterlagen wurde die folgenden Körnungen des Aerogels bei der Firma CABOT bestellt.

MT 1100	$d_{50} = 8 \text{ }\mu\text{m}$
TLD 101	0,01 – 0,7 mm
TLD 302	1,2 – 4,0 mm

Nach Eingang der Proben wurden diese optisch untersucht. Abb. 4-5 zeigt Aufnahmen der Aerogelfraktion TLD 101 und TLD 302. Das Aerogelgranulat ist von einer gedrun-

genen, kantigen Form. Es ist im Vergleich mit einem Normalzuschlagbereich einem Edelsplitt gleichzusetzen.

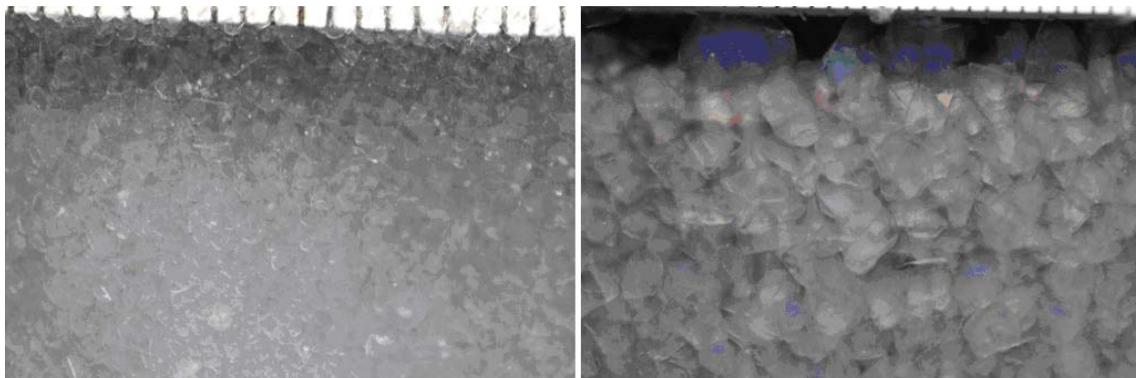


Abb. 4-5 Aerogelgranulat TLD 101 (links) und TLD 302 (rechts)

Das MT 1100 ist in seiner Feinheit mit einem Gesteinsmehl zu vergleichen. Es muss äußerst vorsichtig gehandhabt werden, da bereits geringe Luftbewegungen ausreichend sind um es aufzuwirbeln. Die genaue Dosierung und das homogene bzw. vollständige Untermischen gestalten sich dadurch sehr schwer.

Die verschiedenen Kornfraktionen wurden im weiteren Verlauf einer granulometrischen Untersuchung unterzogen. Auf Grund der sehr geringen Dichte war eine Messung im firmeneigenen Granulometer im Nassaufschluss nicht möglich. Die Messungen wurden von der Firma Sympatec GmbH mittels Trockendispergierung durchgeführt. Die Abb. 4-6 zeigt den kumulativen Verlauf der verschiedenen Kornfraktionen.

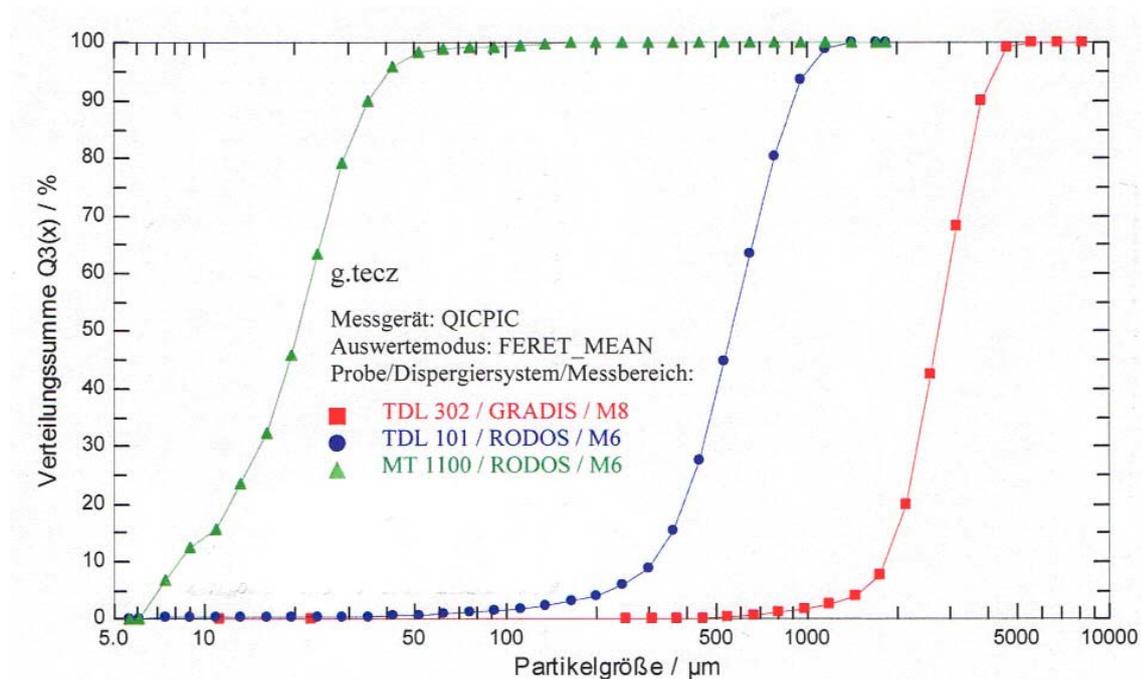


Abb. 4-6 Die kumulative Verteilung der Aerogel – Fraktionen

Die so gewonnenen Sieblinien wurden mit Hilfe eines mathematisch basierten Programms miteinander kombiniert um die ideale Zusammensetzung für eine optimale Packungsdichte zu berechnen. Durch das gleiche Verfahren wurden in der Folge auch die Komponenten des Leims optimal zusammengesetzt.

4.4.2 Rezepturenentwicklung

Nach Abschluss der Voruntersuchungen und Berechnungen wurden in einem ersten Schritt Mischungen mit verschiedenen Areogelanteilen hinsichtlich ihrer Herstellbarkeit und Verarbeitbarkeit geprüft. Begonnen wurde dabei mit einem Aerogel – Gehalt von 80%. Dieser Wert wurde aus Ergebnissen früherer Untersuchungen als ein Optimum für das Dämmverhalten angesehen. Die Verarbeitung des Aerogel - Betons mit einem Anteil von 80 % Aerogel war allerdings nicht möglich. Die geringe Leimmenge war nicht ausreichend, um alle Aerogel – Körner zu ummanteln und eine Verbindung der einzelnen Körner zu erreichen. Alternativ wäre eine Herstellung mit Auflastverdichtung möglich, wie sie bei der Verarbeitung erdfeuchter Betone angewandt wird. Zur Herstellung der zur Messung des Wärmedurchgangs erforderlichen Prüfkörper war dieses Verfahren unter Laborbedingungen nicht umsetzbar.

Auch bei einem Anteil von 75% Aerogel ist der Beton nach dem Mischen von einer eher krümeligen Konsistenz, wie in Abb. 4-7 zu sehen, die aber durch eine entsprechend lange Einwirkzeit von Rüttelenergie aufgeschlossen werden kann.

Ab einem Anteil von ≤ 65 Vol. % Aerogel wurde eine deutliche Veränderung im Verarbeitungsverhalten feststellbar. Bei 65 % verflüssigt sich der Beton bei dem Einsatz von Rüttelenergie zügig und beginnt in der Form zu fließen und sich teils selbst zu nivellieren. Eine fließfähige Konsistenz ohne den Einsatz von Rüttelenergie ist ab einem Anteil von 60% Aerogel einstellbar.



Abb. 4-7 Aerogelbeton mit 75 Vol.% Aerogelanteil

Mit den Erkenntnissen dieser Vorentwicklungen wurden drei Basisrezepturen für die λ -Wert - Bestimmung herausgearbeitet. Sie enthielten einen Aerogelanteil von 75, 70 und 65 Vol. %. Der Vergleich des λ -Wertes und der Festigkeitswerte nach 28 Tagen sollten erste Eckdaten für die weitere Entwicklung liefern. Dazu wurden je zwei Platten der Abmessung 500 x 500 x 50 mm zur Bestimmung des λ - Wertes sowie drei Sätze Prismen zur Bestimmung der Festigkeitswerte nach 7, 28 und 56 Tagen hergestellt. Alle Prüfkörper wurden im Alter von 2 Tagen ausgeschalt. Die Platten wurden im Alter von ca. 7 Tagen zur Messung des λ - Wertes nach Stuttgart verschickt. Nach 28 Tagen

erfolgten dann die relevanten Prüfungen. Die Werte der Druck- und Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen sind im Vergleich zu der ermittelten Dichten in Abb. 4-8 dargestellt.

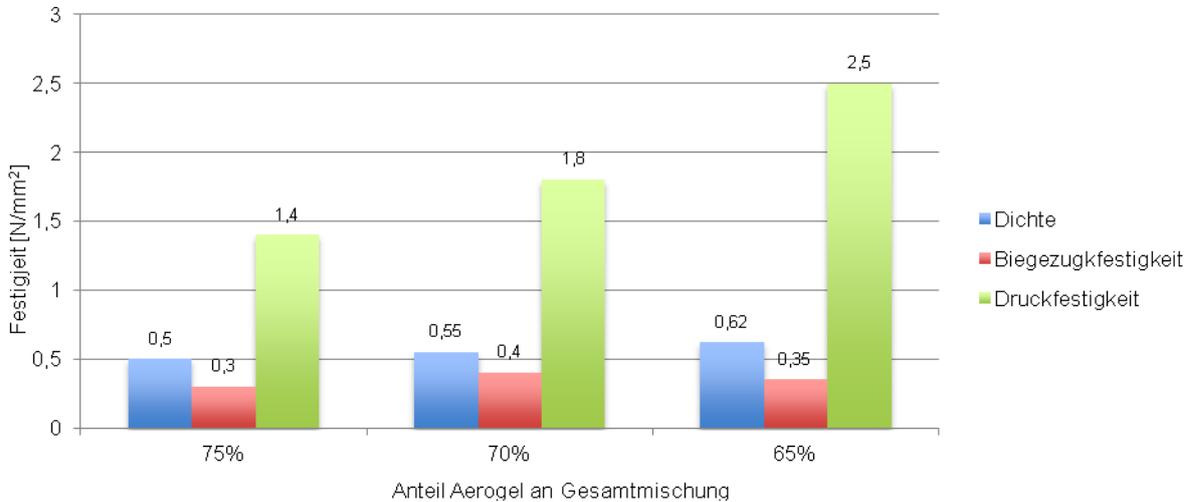


Abb. 4-8 Dichte und Festigkeitswerte der Mischungen mit 75 / 70 / 65 % Aerogel – Anteil

Wie zu erwarten steigt die Druckfestigkeit mit steigender Dichte bzw. abnehmenden Aerogel – Gehalt. Der Anstieg der Druckfestigkeit ist nicht linear. Ursache dafür ist der unter 4.3.4 bereits beschriebene Einfluss der Verarbeitbarkeit. In einer Schnitt- oder Bruchfläche sind die typisch runden Luftporen deutlich von den eckig ausgeprägten Aerogel – Körnern zu unterscheiden. Die Abb. 4-9 zeigen die Bruchfläche eines Aerogel - Betons mit einem Aerogel – Anteil von 65 Vol. %. Insbesondere in der Ausschnittsvergrößerung sind deutlich die eckigen Aerogel – Körner zu erkennen, die runden Luftporen hingegen sind nur vereinzelt vorhanden.

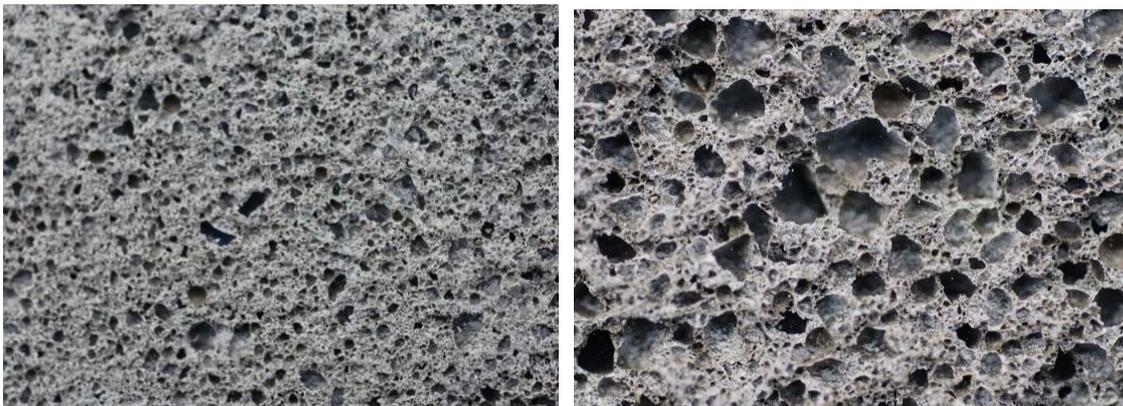


Abb. 4-9 Aerogel - Beton mit 65 % Aerogel – Anteil (links) ; Ausschnittsvergrößerung (rechts)

Weiterhin ist erkennbar wie dünn die Stege aus dem unschließenden UHPC – Leim zwischen den einzelnen Kornoberflächen des Aerogels sind. Zum Vergleich - das Größtkorn des Aerogels hat einen Durchmesser von 4 mm. Von dieser Struktur aus dünnwandigen Flächen müssen die aufgetragenen Kräfte bei der Festigkeitsprüfung

aufgenommen werden. Abb. 4-10 zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen Dichte und λ -Wert der Betone mit einem Anteil von 75, 70 und 65 Vol. % Aerogel. Deutlich zu erkennen ist die, in diesem Bereich, nahezu lineare Abhängigkeit der beiden Werte. Der angestrebte λ -Wert von 0,07 W/mK wird bei einem Aerogel - Gehalt von ca. 70 Vol. % erreicht.

Nach Auswertung der Ergebnisse wurde für die Hauptprüfserie ein Beton mit einem Anteil von 65 % Aerogel festgelegt. Er stellt den besten Kompromiss zwischen der erforderlichen Druckfestigkeit und dem λ -Wert dar.

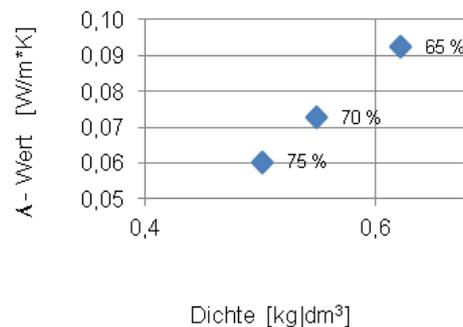


Abb. 4-10 Verhältnis von Dichte zu λ - Wert (vgl. Abb. 5-3, S.29)

4.5 Rezeptur für Hauptprüfserie

Für die Herstellung der für die verschiedenen Prüfungen notwendigen Prüfkörper wurden ca. 120 l in Mischgrößen von 17 – 25 l mit einem Zyklusmischer hergestellt. Die Hauptprüfserie wurde mit dem entwickelten Aerogel - Beton mit einem Aerogel – Anteil von 65 % hergestellt sowie eine Nebenserie mit 70 % Aerogel. Alle Prüfkörper wurden entsprechend des ermittelten Verdichtungsregimes verdichtet. Nach zwei Tagen wurden die Prüfkörper ausgeschalt und entsprechend des in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Verfahrens gelagert.

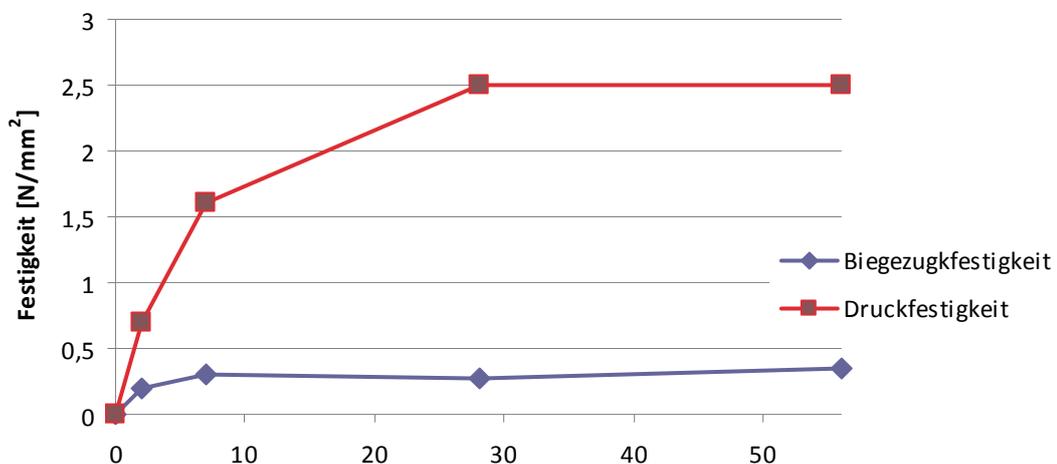


Abb. 4-11 Entwicklung der Festigkeiten über die Zeit (Alter in Tagen)

Zur Ermittlung der Festigkeitsentwicklung wurden die Druck- und Biegezugfestigkeit im Alter von 2, 7, 28 und 56 Tagen geprüft. Die Ermittlung der Festigkeitswerte nach einem Tag war nicht möglich da zu diesem Zeitpunkt ein Ausschalen nicht möglich war. Abb. 4-11 zeigt die Entwicklungen der Festigkeiten über die Zeit. Der Absolute Verlauf entspricht dem eines UHPC auf Basis eines CEM I. Nach 7d werden ca. 60 % der Endfestigkeit erreicht. Die Endfestigkeit bleibt mit 2,5 N/mm² hinter den Erwartungen zurück.

4.6 Ausblick

Die Werte der Druckfestigkeit sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ein verstärktes Schwinden zurückzuführen. Da die Körner des Aerogels ein großes elastisches Verformungsvermögen in Höhe von bis zu 4% aufweisen, wird der Schwindprozess der Matrix durch sie nicht behindert. Das Schwinden der Matrix führt dazu, dass sich Mikrorisse innerhalb des Matrixgefüges ausbilden und somit zu einer Reduzierung der aufnehmbaren Kräfte führen. Die Schwindneigung der Matrix lässt sich durch eine veränderte Zementauswahl, sowie durch eine Verringerung des reaktiven Anteils in der Matrix reduzieren. Für eine erste Versuchsreihe wurde ein äquivalent gestalteter Aerogel – Beton mit einem Anteil von 65 und 75 Vol. % Aerogelanteil jedoch mit einem reduzierten hochreaktiven Anteil gegenüber der bisher verwendeten Rezeptur, hergestellt. Abb. 4-12 zeigt eine Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung der bisherigen und der modifizierten Rezeptur. Die Druckfestigkeiten des Betons mit der neuen Rezeptur liegen bereits im Alter von 7d etwa doppelt so hoch. Die gleiche Tendenz zeigen die Werte nach 28d. Auch die Biegezugfestigkeit nach 28d ist ca. doppelt so hoch wie bei dem bisherigen Aerogel – Beton. Die signifikante Verringerung des Schwindpotentials führt zu einem deutlich stabileren Matrixgefüge. Als weiteres Resultat ist zu erwarten, dass sich der Wärmedurchgangswiderstand verbessern wird, da es weniger offene Wärmebrücken (Risse) im Gefüge gibt.

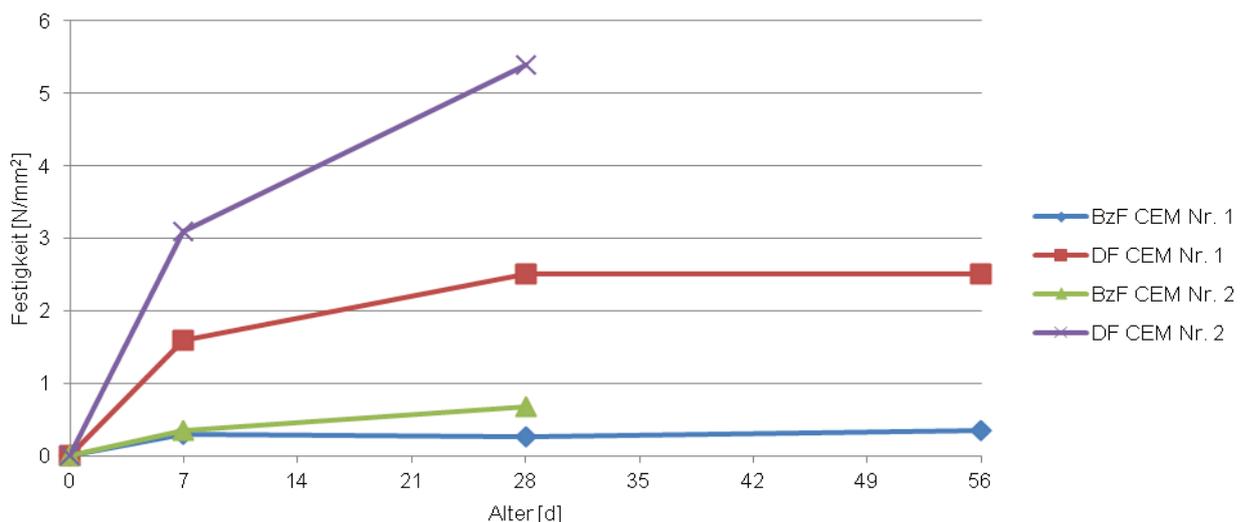


Abb. 4-12 Vergleich der Festigkeitsentwicklung beim Einsatz verschiedener Zemente

5 Versuchsergebnisse

5.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Eine der wichtigsten Eigenschaften des neu entwickelten Leichtbetons stellt die Wärmeleitfähigkeit λ dar. Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem Zwei-Plattenprüfverfahren nach DIN EN 12667 [9] am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) sowie am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) bestimmt. Parallel zur Materialentwicklung wurden die Wärmeleitfähigkeit der drei Probekörper AE-01 bis AE-03 gemessen, um den Einfluss des Aerogelgehalts zu untersuchen. Die abschließende Messung an einem Probekörper der Hauptprüfserie (AE-05) erfolgte an einem zertifizierten Messgerät des IBP. Zum Vergleich wurde ein Probekörper (AE-04) mit gleicher Rohdichte jedoch ohne Aerogele sondern mit Schaumbildner hergestellt. Die Matrix basiert ebenfalls auf einer Packungsoptimierten Rezeptur. Mit diesem Vergleich wird die Wirksamkeit der zugeschlagenen Aerogele quantifiziert.

5.1.1 Probentrocknung

Für die Durchführung der Messung ist es erforderlich, dass die Probekörper trocken geprüft werden. Zu diesem Zweck wurden die Proben in einem Trockenschrank bei 65°C bis auf Gewichtskonstanz getrocknet. Abb. 5-1 zeigt den Verlauf der Probentrocknung anhand des relativen Gewichtsverlusts über den Trocknungszeitraum.

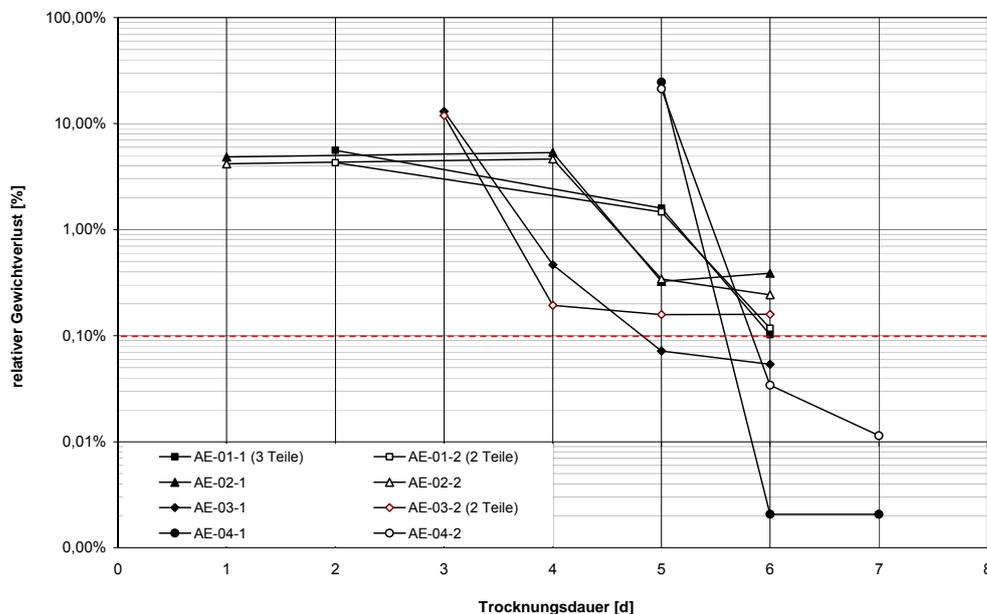


Abb. 5-1 Relativer Gewichtsverlust der Probekörper während der Trocknung

Definitionsgemäß sind die Proben trocken, wenn die im Abstand von 24h gemessene Gewichtsänderung $<0,1\%$ ist. Um eine Aussage zur Wärmeleitfähigkeit zu erhalten, wurde eine Messung für eine Probenmitteltemperatur von 10°C durchgeführt. Es fällt auf, dass die Probekörper die Gewichtskonstanz binnen kürzester Trocknungszeit von

4-5 Tagen erreichen. Dies ist für Leichtbeton ein ungewöhnlich kurzer Zeitraum und ist dadurch begründet, dass die Aerogele sich bezüglich des Wassergehalts des Betons wie ein Normalzuschlag mit 0,0% Eigenfeuchte verhalten. Die Hydrophobierung der Aerogele verhindert jegliche Wasseraufnahme und leistet deshalb keinerlei Beitrag zur Regulierung des Feuchtegehalts im Beton. Alle gemessenen Proben waren zwischen 28 und 35 Tage alt.

5.1.2 Einbau und Prüfung

Abb. 5-2 zeigt den Einbau der Plattenprobekörper in das Zweiplattenprüfgerät am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. Der Randverbund besteht aus EPS 25 und schirmt die Proben zum Plattenrand hin ab. Die geprüften Platten haben eine Abmessung von 500x500mm mit einer Dicke von 50mm. Die Proben wurden in Kassel von der Firma G.tecz hergestellt und zur Messung per Post nach Stuttgart geschickt. Das aktive Heizelement liegt in der Mitte der beiden Probekörper (schwarze Platte – Bild rechts). Der Wärmefluss erfolgt durch die beiden Probekörper nach oben und unten zu den kühlen Außenplatten. Die Dauer einer Messung für eine Probenmitteltemperatur beträgt ca. 12h. In jeder Schicht dokumentieren zwischen 5 und 7 Messpunkte die Temperaturen und berechnen daraus die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$. Dieser Standardwert ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit mit anderen Materialien.

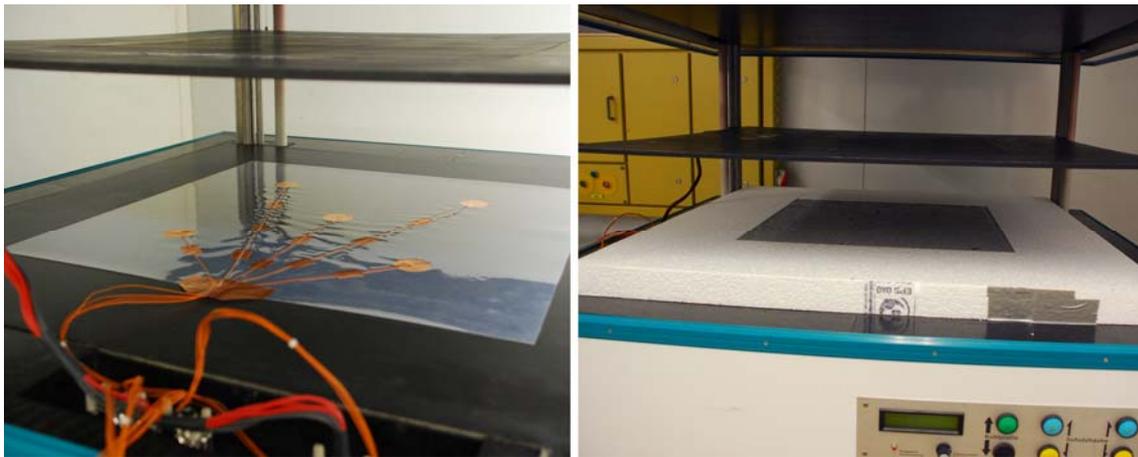


Abb. 5-2 Trägerfolie mit Thermoelementen - Probekörper mit Randverbund aus Styropor

Porenbeton weist derzeit als Betonmaterial die niedrigste Wärmeleitfähigkeit aller sich auf den Markt befindlichen Baustoffe auf. Die Festigkeiten sind jedoch nur durch die Dampfhärtung zu erzielen, die einen industriellen Herstellungsprozess des Materials erfordern. Die Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton wurde durch eine Vielzahl von Versuchen experimentell ermittelt. Die aus diesen Daten abgeleitete mathematische Beziehung ermöglicht eine Berechnung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte [17]. Diese Gleichung ist in Abb. 5-3 grafisch dargestellt (durchgehende Linie). Man erkennt, dass auch die als reines Dämmprodukt entwickelten Multipor Elemente diesem Zusammenhang folgen. Auch der normal aushärtende Infralichtbeton kommt den theoretischen Werten des Porenbetons sehr nahe. Durch die starke Poroisierung der Zementmatrix weisen die beiden Materialien eine hohe Ähnlichkeit in Ihrem strukturellen Aufbau auf. Einer weiteren Reduktion der Rohdichte sind jedoch aufgrund der Verwendung korporiger Zuschläge Grenzen gesetzt.

Im Rahmen einer Promotion wurden am ITKE bereits Betonrezepturen mit Aerogelzuschlägen getestet. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine umfassende Betrachtung und Bewertung mesoporöser und nanoporöser Werkstoffe [16]. Die experimentell ermittelten Werte (grüne Datenpunkte) lassen sich ebenfalls mit einer Geraden verbinden. Das IBP hat eine zertifizierte Messung der Wärmeleitfähigkeit an Prüfkörpern der Hauptprüfserie durchgeführt (schwarzer Datenpunkt). Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit der Aerogele ergeben sich gegenüber den ausschließlich luftbasierten Materialien vor allem in den Bereichen geringerer Rohdichte reduzierte Wärmeleitfähigkeiten. Bei größeren Rohdichten überwiegt trotz Aerogelanteil die Wärmeleitung der Matrix. Ein technisch sinnvoller Einsatzbereich ergibt sich demnach für einen Rohdichtebereich zwischen 400 und 500 kg/m³. Die untere Grenze wird hierbei durch den noch zu verarbeitbaren Volumenanteil an Aerogele im Beton definiert.

Im Rahmen dieses Projekts erfolgte deshalb eine Fokussierung auf diesen Rohdichtebereich. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gefüge optimierenden Maßnahmen eine weitere Reduktion der Wärmeleitfähigkeit zur Folge haben. Abschließend kann man sagen, dass ein an der Luft härtender Aerogelbeton mit einer Rohdichte von 400kg/m³ eine um 40% reduzierte Wärmeleitfähigkeit gegenüber einem Porenbeton der gleichen Rohdichte erzielt. Zum Vergleich wurde ein matrixoptimierter Quantz®-Beton mit Schaumbildner auf eine vergleichbare Rohdichte eingestellt und gemessen. Die erzielte Wärmeleitfähigkeit (blauer, runder Datenpunkt) liegt wieder in unmittelbarer Nähe zum theoretischen Erwartungswert mesoporöser Materialien mit dem Isolator Luft. Dieser Vergleich zeigt sehr deutlich den Beitrag der Aerogele zu den reduzierten Wärmeleitfähigkeiten. Gleichzeitig stellen die unterschiedlichen Aerogelkörnungen den Schlüssel für eine optimierte Kornzusammensetzung dar.

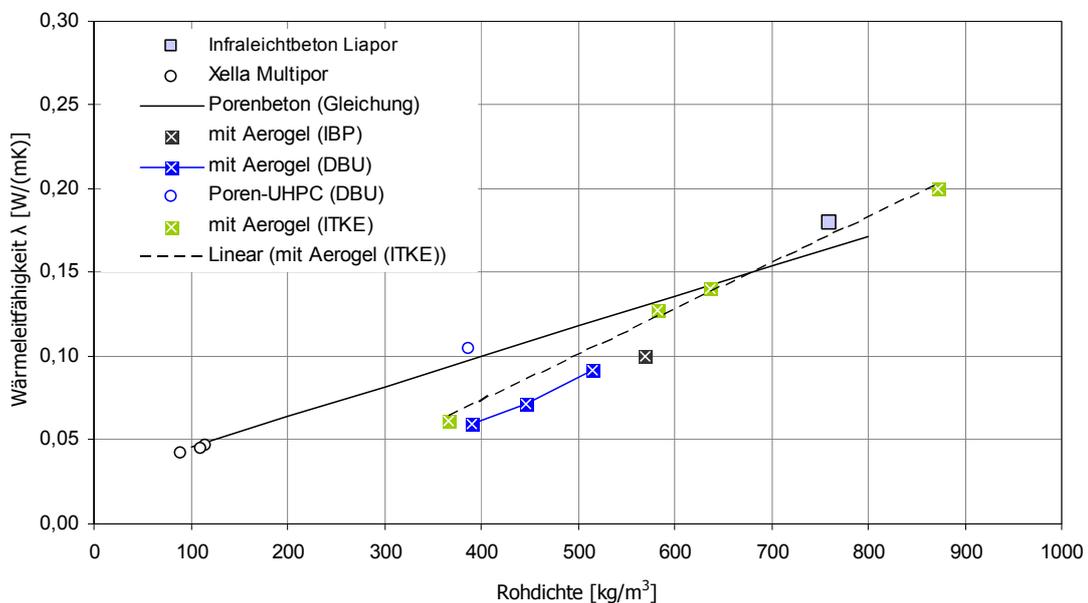


Abb. 5-3 Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ ausgewählter luftbasierter Leichtbetonwerkstoffe und Beton mit Aerogelzuschlag

5.2 Feuerwiderstandsversuch

Aerogelbeton weist aufgrund des zu 100% mineralischen Gefüges und der stark reduzierten Wärmeleitung sehr gute Ausgangsvoraussetzungen für den Einsatz im Brandschutz auf. Durch Untersuchungen konnte bereits in [18] die grundsätzliche Eignung von Aerogelbeton als Brandschutzelement bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von F120 nachgewiesen werden. Der dort zur Anwendung kommende vereinfachte Versuchsaufbau in Anlehnung an die DIN 4102-2 wurde für die erneute Untersuchung des Materials unter Brandbeanspruchung in diesem Projekt adaptiert. Abb. 5-4 zeigt den schematischen Versuchsaufbau. Als Probekörper wurden die Aerogelbetonplatten der Versuchsserie 2 aus der Wärmeleitfähigkeitsuntersuchung mit der Abmessung 500x500x50 und einem Aerogelvolumengehalt von 65Vol% genutzt. In der Mitte der Platte wurde durch eine durchgehende Bohrung ein Thermoelement (2) direkt auf die Oberfläche der beflamnten Seite platziert. Ein weiteres Thermoelement (1) wurde um 2cm versetzt auf der abgewandten Seite des PK platziert. Die Beflammung erfolgte mittels eines Acetylen-Schweißbrenners.

Vorangegangene Untersuchungen an gefügeoptimierten Materialien haben bezüglich der Brandbeanspruchung gezeigt, dass das Material unter extremer Hitzeeinwirkung explosionsartig versagt. Die hohe Gefügedichtigkeit des Werkstoffs bewirkt, dass die sich unter Hitzeeinwirkung ausdehnenden Stoffe wie freies Wasser keinen Raum zur Ausdehnung zur Verfügung haben. Das stark ansteigende Druckniveau bewirkt schließlich ein explosionsartiges Versagen des Werkstoffgefüges. Auch die vorliegende Materialentwicklung beeinflusst Eigenschaften durch eine Gefügeverdichtung, so dass sich die Fragestellung ergab, wie sich das Material unter der starken Wärmezufuhr und der geringen Wärmeleitfähigkeit verhält.

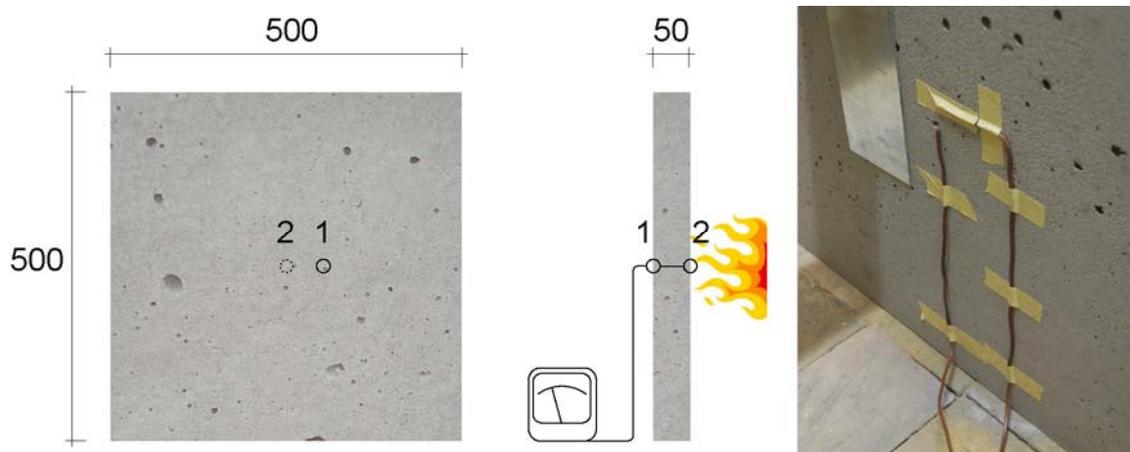


Abb. 5-4 Schematischer Aufbau des Brandversuchs - Probenrückseite mit Thermoelemente

Für die Aufbringung der Brandlast auf den Probekörper wurde die Einheits-Temperaturzeitkurve gemäß der DIN EN 1363-1 zugrunde gelegt. Das Diagramm in Abb. 5-5 zeigt den Verlauf der Temperaturkurve für die beiden Messpunkte über den Versuchszeitraum mit Flammeinwirkung von 24 Minuten. Da Temperaturen über 400°C außerhalb des Messbereichs der Temperaturfühler lagen, wird die vorherrschende Temperatur auf der Oberfläche des Probekörpers anhand des Abstands und der Temperaturvoreinstellung des Schweißbrenners ermittelt. Die Werte sind Tab. 5-1 zu entnehmen.

Aufgrund der fehlenden direkten Kontrolle durch einen Temperaturfühler wurde der Probekörper einer wesentlich höheren thermischen Belastung ausgesetzt, als es die Einheitstemperaturkurve ursprünglich vorsieht. Auf diese Weise konnte das Verhalten des Werkstoffs unter extremen Temperatureinwirkungen studiert werden. Die Befürchtung, dass zu hohe Drücke zu Abplatzungen führen, konnte nicht bestätigt werden. Obwohl die Platte für die Messung der thermischen Leitfähigkeit bis auf Gewichtskonstanz getrocknet wurde, ist davon auszugehen, dass sich während der dreimonatigen Lagerungszeit unter Normalklima ein Ausgleichsfeuchtezustand eingestellt hat.

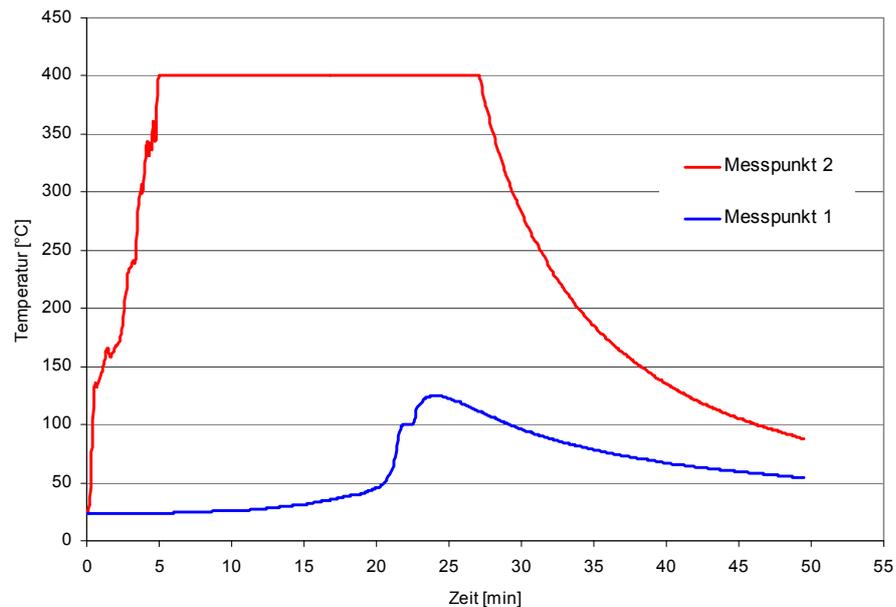


Abb. 5-5 Temperaturkurven der beiden Sensoren über den Versuchszeitraum

Tab. 5-1 Versuchszeit–vorherrschende Oberflächentemperatur–Beobachtung am Probekörper

Zeit [min]	Temp. [°C]	Beobachtung
7:15	1200	erste Oberflächenverfärbung mit beginnender Rissbildung
9:20	1400	stetige Zunahme von Rissanzahl und –Breite
12:15	2000	Risstiefe und Breite ca. 1cm - Schmelzen der Oberfläche
15:10	2450	Kraterbildung – zunehmend Schmelzmasse
20:00	2500	Ausfluss von Schmelzmasse
22:00	2550	Zunehmende Kraterbildung (45mm) – kein Schmelzausfluss
24:00	2550	Ende des Versuchs – Temperaturanstieg auf Rückseite
50:00	87,8	Abkühlung Probekörper

Aufgrund des sehr guten Dämmvermögens ist der Werkstoff in der Lage, dass sich die enormen Temperatureinwirkungen nur lokal begrenzt auswirken. Der zunehmende Anstieg der Temperatur am Messpunkt 1 ab einer Versuchsdauer von 15 Minuten ist hauptsächlich auf die Reduktion der Probekörperdicke infolge der Werkstoffschmelze

zurückzuführen. Die verbleibende Restwandstärke von 5mm war auch der Grund, weshalb der Versuch nach 24 Minuten abgebrochen wurde. Die Fortsetzung der Beflammung hätte zu einem Durchschlagen der Flammen und zu einer Zerstörung des Temperaturlaufnehmers auf der Probenrückseite geführt.

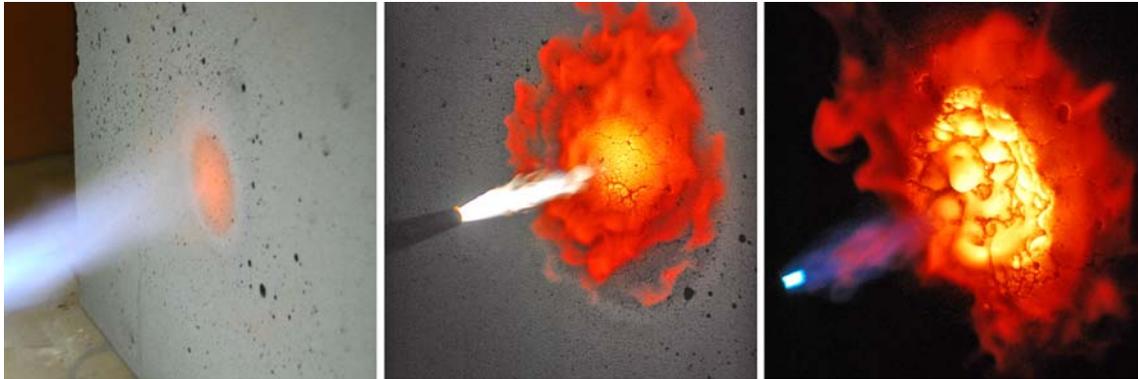


Abb. 5-6 Versagensstufen des Probekörpers unter Flammeinwirkung nach 7 – 11 – 17 Minuten

Die Bildung einer Schmelze ist für einen Betonwerkstoff auf den ersten Blick eine ungewöhnliche Versagensform. Bedenkt man jedoch, dass der Werkstoff im Prinzip einen „Glasanteil“ von 65 Vol% aufweist, verhält sich der Probekörper schon nicht mehr so unerwartet. Zu keinem Zeitpunkt des Versuchs kommt es zu einer Entflammung oder dem eigenständigen Abbrennen des Werkstoffs. Im Brandfall ist die Entwicklung derartig hoher Temperaturen, wie in diesem Versuch simuliert, sehr unwahrscheinlich, so dass diese Versagensform des Materials nur theoretisch besteht.



Abb. 5-7 Abtropfen der Schmelze (nach Versuchsdauer 20 Minuten)

Die Beflammung führt zu einem regelrechten Abschmelzen des Betons. Übrig bleibt nach dem Auskühlen eine glasartige Schlacke (Abb. 5-8). Das auf der Rückseite verwendete Klebeband zur Fixierung der Thermoelemente wird lediglich durch 5mm Aerogelbeton von der Schmelze getrennt. In der letzten Minute des Versuchs hat die ansteigende Temperatur auf der Rückseite zu einem Anhängen des Klebebands geführt.



Abb. 5-8 Aerogelbetonschmelze unmittelbar nach Versuchsende - Klebeband auf der Rückseite des Probekörpers - ausgekühlte Schmelze

5.3 Verbundverhalten der Betonbewehrung

5.3.1 Probekörperausbildung

Der bei Verbundversuchen am häufigsten eingesetzte Prüfkörper ist der würfelförmige Ausziehkörper mit mittig angeordnetem Stab. Die Abmessung des Prüfkörpers wurde mit einer Kantenlänge von 200mm gewählt. Als Bewehrungsstab wurde ein BSt 500 S Ø8 mit paralleler Profilierung verwendet, wie er in typischen Hochbauprojekten des privaten Wohnungsbaus zum Einsatz kommt. Die Verbundlänge beträgt 100mm und liegt in der unteren Würfelhälfte (Verbundbereich1= guter Verbund). Auf der gezogenen Stabseite in der oberen Probekörperhälfte wurde mit Hilfe einer Kunststoffhülse der Verbund des Bewehrungsstabes mit dem Betonwürfel unterbunden. Die Hülse wurde mit einem dauerelastischen Dichtmittel abgedichtet, um einen exakt definierten Verbundbereich zu erhalten.

In Ergänzung zur Rezepturenentwicklung wurden zwei Serien mit unterschiedlichem Aerogelvolumengehalt getestet. Wie es sich gezeigt hat, gibt es ab einem Volumengehalt von 65% eine merkliche Veränderung in den Verarbeitungseigenschaften des Betons. Daher wurde eine zweite Serie von drei Probekörpern mit einem Volumengehalt von 70% getestet, um die zu erzielenden Verbundeigenschaften zu beurteilen.



Abb. 5-9 Prüfanordnung Verbundverhalten mit eingebauten Probekörper (Mitte) - Probekörper mit Wegaufnehmer am unbelasteten Bewehrungsende

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 5-9 dargestellt. Der Probekörper wird durch eine Rückhaltekonstruktion aus zwei gelenkig an den Prüfraumen angeschlossenen UPE-Profilen auf der Bewehrungszugseite fixiert. Eine eingelegte Schaumstoffplatte zwischen Probekörper und Stahlflansch verhindert die Ausbildung lokaler Spannungsspitzen. Am passiven Ende erfolgt die Aufnahme des Bewehrungsschlupfes relativ zum Betonprobekörper mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers. Die Belastung wurde weggesteuert mit einer Steigerungsrate von 0,005 mm/s aufgebracht und ebenfalls in das Versuchsprotokoll aufgezeichnet. Die Versuche sind auf einer Schenk Hydropuls Prüfmaschine der Fakultätseigenen Werkstatt durchgeführt worden.

Aus den Versuchsdaten wurde mit Gleichung 1 aus [12] die im Probekörper wirkende Verbundspannung berechnet. Die Ergebnisse für die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung sind in Abb. 5-10 und Abb. 5-11 dargestellt. Das zweite Diagramm fokussiert den Versuchsbereich bis zum Verlust der Verbundhaftung. Man kann erkennen, dass mit dem Verlust des Haftverbunds die maximale Verbundspannung erreicht wird. Danach fällt die Verbundspannung zuerst sprunghaft und dann stetig bis auf nahezu Null ab. Die Ergebnisse der drei Versuche streuen nur sehr gering und liegen sowohl im Maximalwert als auch in ihrem Verbundverhalten über den Auszugsweg sehr eng zusammen. Bei einer Auszugsstrecke von 6mm wurden die Versuche beendet.

$$\tau_v = \frac{F}{U \cdot l_v}$$

Gleichung 1

mit: F gemessene Zugkraft (Kraftmessdose)
 U Stabumfang des Bewehrungsstabes
 l_v Verbundlänge des Bewehrungsstabes

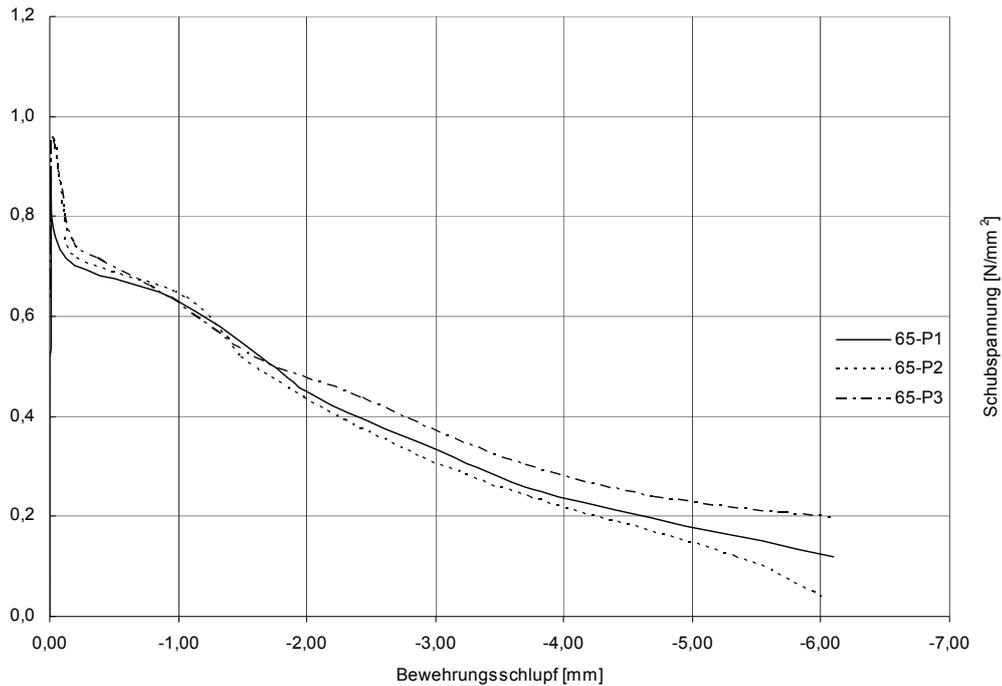


Abb. 5-10 Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung für 65 Vol-% Aerogelgehalt

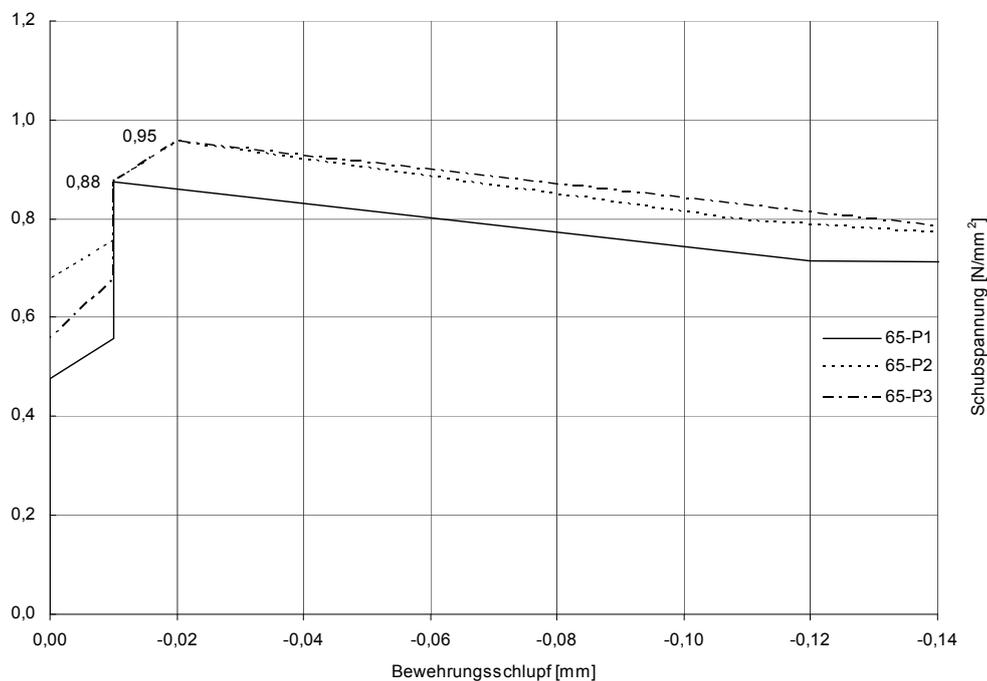


Abb. 5-11 Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung - Bereich 0 - 0,14mm

Die Abb. 5-12 und Abb. 5-13 zeigen die Versuchsergebnisse für die Probekörper mit 70 Vol.-% Aerogelgehalt. Die Maximalwerte der erzielten Verbundspannung fallen um ca. 25% niedriger aus. Zusätzlich lässt sich eine wesentlich stärkere Streuung der Versuchsergebnisse beobachten.

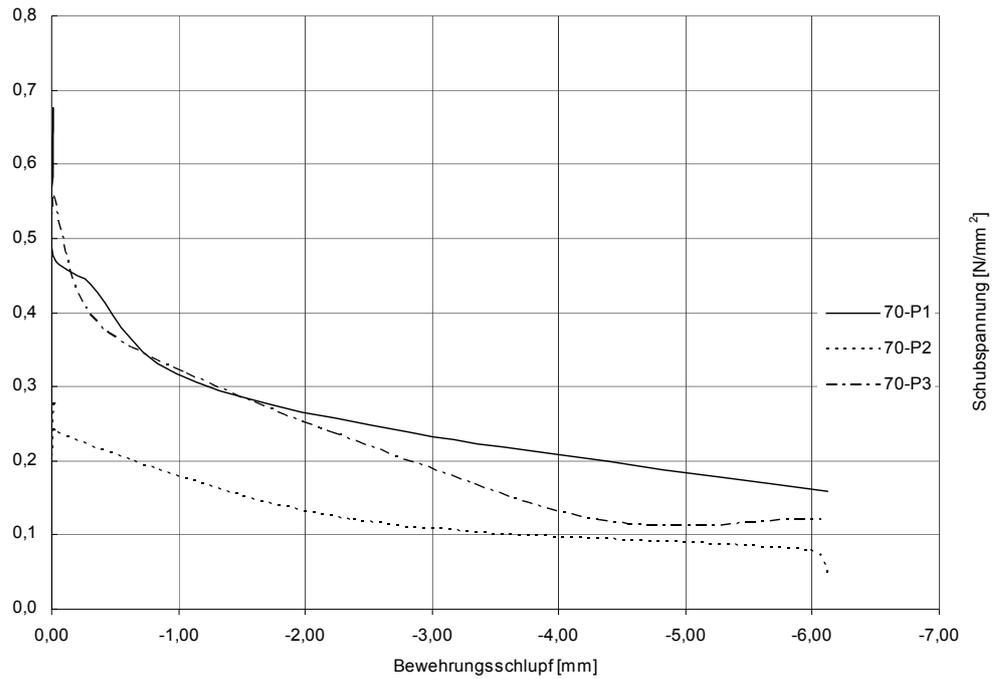


Abb. 5-12 Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung für 70 Vol-% Aerogelgehalt

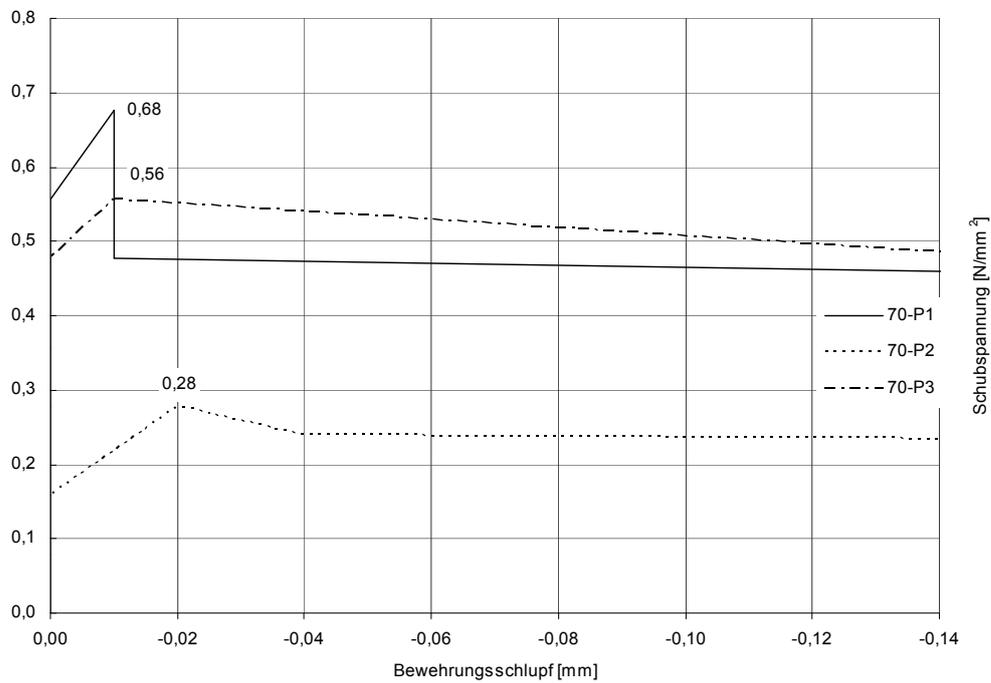


Abb. 5-13 Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung - Bereich 0 - 0,14mm

5.3.2 Vergleich mit vorangegangenen Untersuchungen

Bereits früher wurden Bewehrungs-Verbundversuche an Leichtbeton durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tab. 5-2 aufgeführt. Als Kriterium wurden Versuchswerte mit möglichst geringer Rohdichte ausgewählt. In Untersuchungen an Infraleichtbeton mit einer Rohdichte von 700-800 kg/m³ hat sich gezeigt, dass für die Ausbildung des Verbunds die Ausbildung der Rippenoberfläche eine maßgebliche Rolle spielt [24]. So konnte bei Verwendung einer Bewehrung mit einer höheren Rippenzahl pro Meter ebenfalls eine erhöhte Verbundwirkung festgestellt werden.

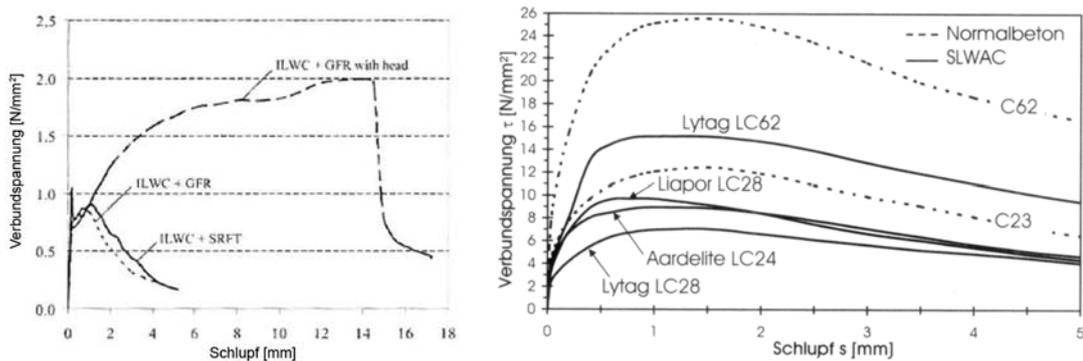


Abb. 5-14 Verbundverhalten von Infraleichtbeton (links aus [24]) und Verbundverhalten von konstruktiven Leichtbeton (rechts aus [14])

Die erzielten Verbundspannungen liegen bei einem vergleichbaren Schlupfverhalten mit 0,87 N/mm² sogar geringfügig niedriger als bei den in diesem Projekt durchgeführten Versuchen mit Aerogelbeton. Dies ist insofern bemerkenswert, da die Rohdichte der getesteten Probekörper mit 520 kg/m³ (65 Vol%) und 450 kg/m³ (70Vol%) deutlich niedriger liegt als die des Infraleichtbetons mit 760 kg/m³. Dieses Ergebnis ist als Indiz zu werten, dass die Optimierung der Gefügedichtigkeit einen messbaren Beitrag zur Steigerung der mechanischen Eigenschaften des Materials leistet.

Infolge der eingeleiteten Druckspannungen über die Rippen des Bewehrungsstahls ergibt sich die Ausbildung eines Zugrings um den Bewehrungsstab. Aus diesem Grund wird die wesentlich geringere Zugfestigkeit des Betons als der maßgebliche Faktor für die übertragbare Verbundspannung angesehen. Im Versuch sind keinerlei Maßnahmen (z.B. Faserzugaben, Querbewehrung) getroffen worden, um die Zugaufnahmefähigkeit des Betons zu erhöhen.

Tab. 5-2 Übersicht Verbundspannungen für Leichtbeton aus der Literatur

Material	T_{\max} [N/mm ²]	Schlupf [mm]	Dichte [kg/m ³]	Quelle
Infraleichtbeton	0,87	0,703	760	[24]
Leichtbeton LC20	3,5	1,0	2000	[14]

5.4 Bestimmung des statischen Druck Elastizitäts-Moduls

Die Prüfungen der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [10] und des statischen Druck-Elastizitätsmoduls in Anlehnung an DIN 1048 Teil 5 [7] erfolgten an insgesamt vier Zylindern mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe. Die Proben wurden 7 Tage feucht und nach der Anlieferung bis zur Prüfung im Normklima 21 Tage bei 20°C und 65% relativer Feuchte gelagert. Vier Tage vor der Prüfung wurden die Prüfflächen mit Gips abgeglichen.

Vor der Ermittlung des statischen E-Moduls wurden die Maße und die Rohdichte bestimmt. Im Anschluss an die E-Modulprüfung wurden die Probekörper bis zum Bruch belastet und die Druckfestigkeit ermittelt.

Die für die E-Modulprüfung erforderliche Oberspannung wurde zu rund ein Drittel der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit ($f_{c,dry}$) gewählt. Diese wurde zunächst an dem Zylinder mit der Bezeichnung E4 bestimmt.

Als Belastungsgeschwindigkeit wurde bei allen Versuchen zu 0,1 MPa/s gewählt.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeit und der E-Moduln sind in Tab. 5-3, die Arbeitslinien in den Abb. 5-15, Abb. 5-16 und Abb. 5-17 dargestellt.

Tab. 5-3 Maße, Rohdichte, Trockenrohichte, Druckfestigkeit und statischer Elastizitätsmodul

Bezeichnung	Abmessungen [mm]		Rohdichte [kg/m ³]	Oberspannung [MPa]	Statischer E-Modul ^a [MPa]	Druckfestigkeit $f_{c, \text{Zylinder}}$ [MPa]
	Durchmesser	Höhe				
E4	149,5	295,8	680	-	-	2,0
E1	149,5	291,7	670	0,7	1200	2,4
E2	149,5	297,1	680	0,7	1100	2,4
E3	149,5	289,4	670	0,7	1100	2,3

^a Die Unterspannung betrug 0,1 MPa

Im Mittelwert ergab sich aus den Prüfergebnissen ein statischer E-Modul von 1100 MPa.

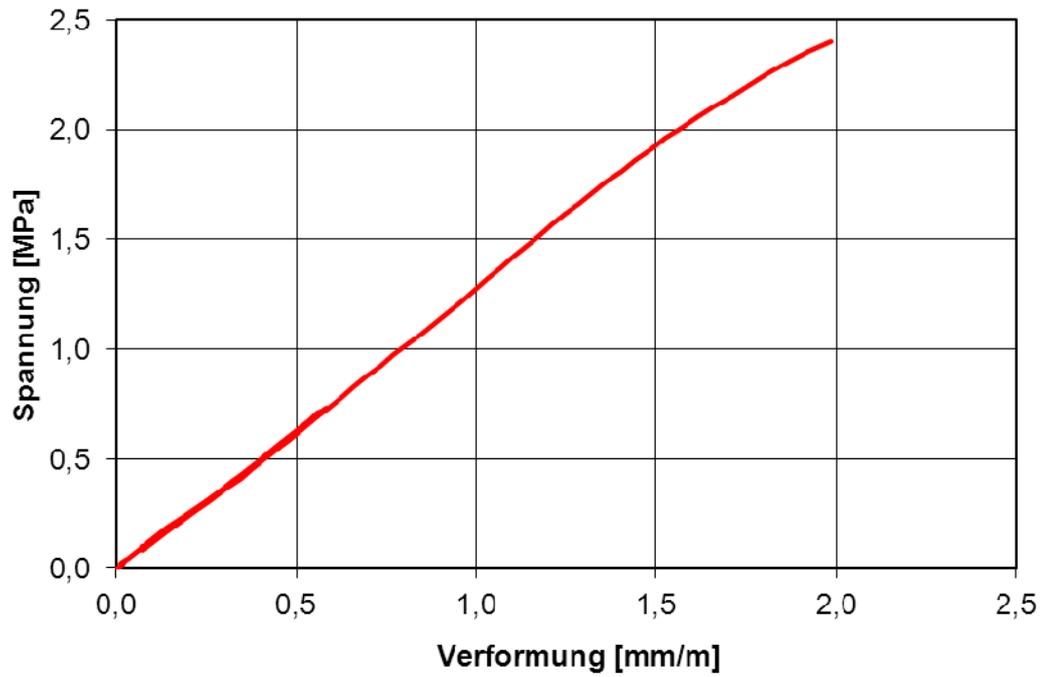


Abb. 5-15 Arbeitslinie der E-Modulprüfung – Probekörper Nr. E1

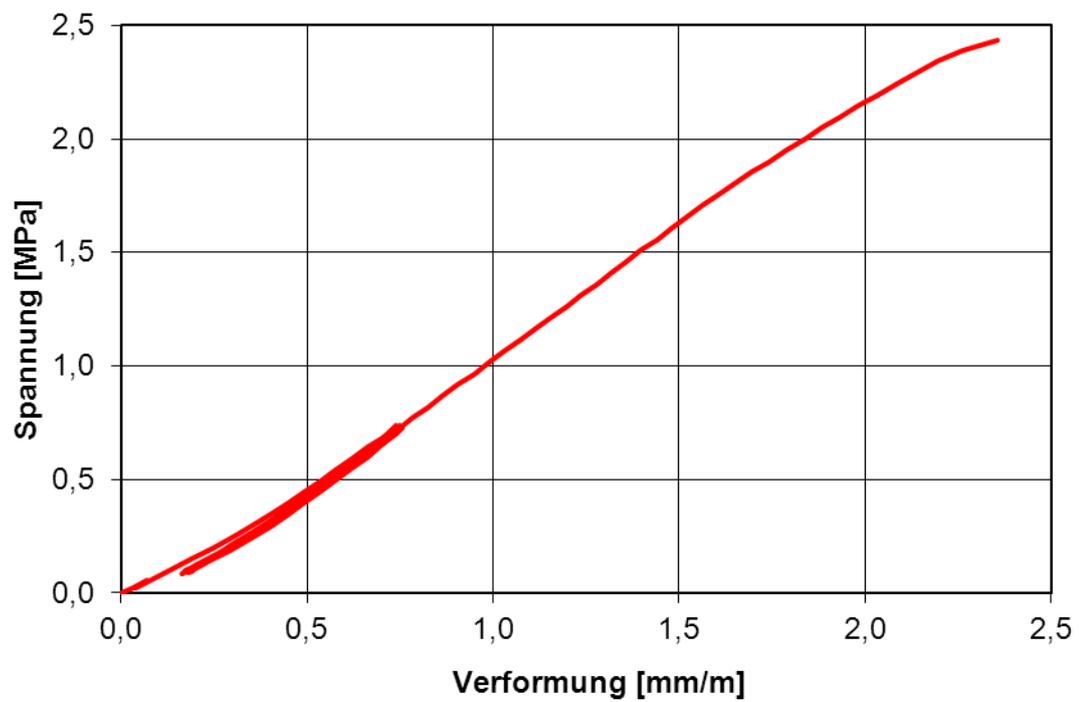


Abb. 5-16 Arbeitslinie der E-Modulprüfung – Probekörper Nr. E2

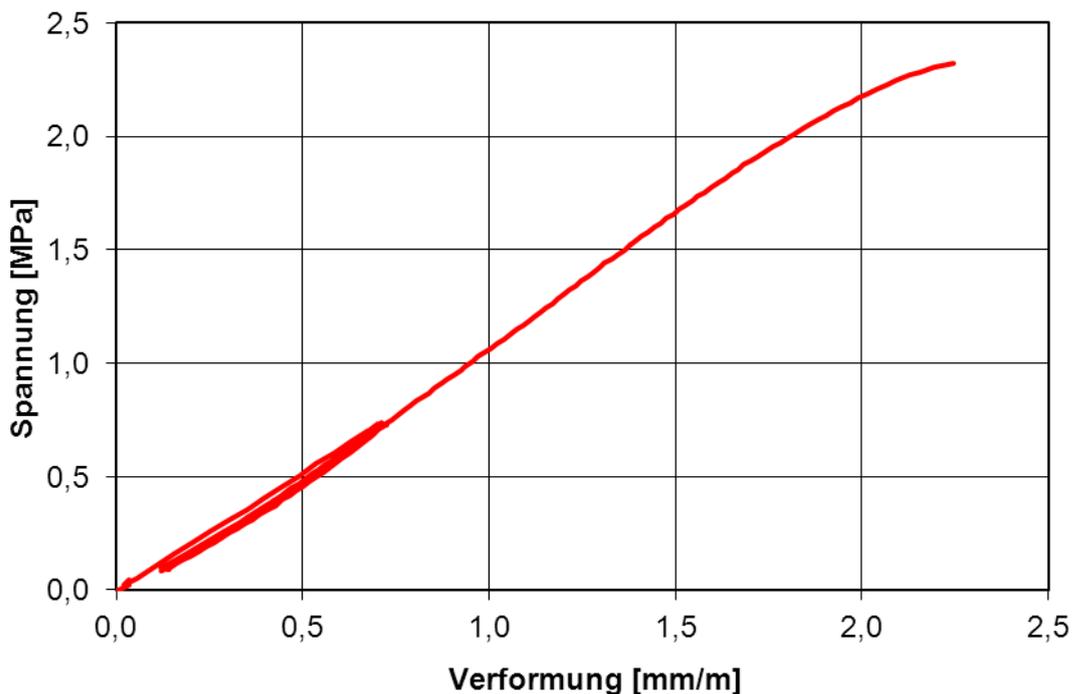


Abb. 5-17 Arbeitslinie der E-Modulprüfung – Probekörper Nr. E3

5.5 Prüfungen zum Frostwiderstand

Die Prüfungen des Frostwiderstands erfolgten mit dem CIF-Verfahren nach dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [2]. Laut Hersteller wurden bei der Herstellung der Probekörper die Schalungsseiten der Würfel, bis auf die mit Teflon geschaltete Seite, mit einer Zellophan-Folie versehen, damit die Proben besser ausgeschalt werden konnten. Die Proben wurden 7 Tage feucht und nach der Anlieferung bis zur Prüfung im Normklima 21 Tage bei 20°C und 65% relativer Feuchte gelagert.

Im Alter von 25 Tagen wurden die Probekörper auf die Standardhöhe von 70mm zugesägt und seitlich mit Epoxidharz abgedichtet. Bei der CIF-Prüfung wurden beide Würfelhälften geprüft. Bei 5 Würfelhälften wurde die an Teflon geschaltete Seite, bei den anderen Hälften die an Folien geschaltete Seite als Prüffläche verwendet.

Im Alter von 28 Tagen wurden die Probekörper zum kapillaren Saugen mit der Prüfseite in demineralisiertes Wasser gestellt. Während der 7-tägigen Lagerung wurden die Probekörper in regelmäßigen Abständen gewogen. Danach wurden die Probekörper in die Frosttruhe eingelagert und einer Frost-Tau-Beanspruchung mit destilliertem Wasser unterzogen. Die feuchte Masse der Probekörper und der dynamische E-Modul sowie die getrocknete Masse der abgewitterten Bestandteile des Betons wurden nach 4, 8, 14, 18, 22 und 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) bestimmt. Der Temperaturzyklus eines FTW's dauerte 12 h.

Die Ergebnisse des relativen dynamischen E-Moduls als Maß für die innere Schädigung sind in Tab. 5-4, und Abb. 5-18 aufgeführt. Die Wasseraufnahme der Würfel ist in Tab. 5-5 und in Abb. 5-19, die der ermittelten Abwitterungsmengen in Tabelle 5 und Bild 6, Beilage 7, dargestellt.

Tab. 5-4 Relativer dynamischer E-Modul der Probekörper bei der CIF-Prüfung

Prüffläche	Anzahl FTW	Relativer dynamischer E-Modul [%]					Mittelwert
		Probekörper					
		1	2	3	4	5	
an Teflon geschalte Seite	0	100	100	100	100	100	100
	4	85	95	92	92	77	88
	8	99	125	101	68	100	99
	14	100	94	101	91	100	97
	18	100	92	82	69	77	84
	22	83	92	83	70	78	81
	28	99	93	77	70	75	83
an Folien geschalte Seite	0	100	100	100	100	100	100
	4	77	92	85	95	75	85
	8	99	100	101	114	101	103
	14	86	100	101	104	76	93
	18	77	97	85	102	65	85
	22	76	70	92	95	77	82
	28	78	77	92	92	76	83

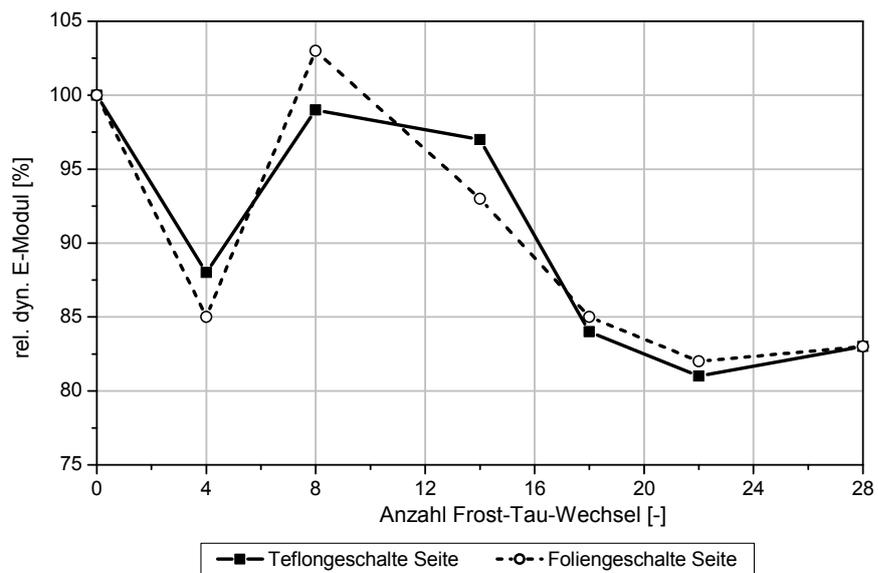


Abb. 5-18 Relativer dynamischer E-Modul (innere Schädigung) der untersuchten Probekörper bei der CIF-Prüfung

Der relativ dynamische E-Modul stellt ein Maß für die innere Schädigung eines Prüfkörpers infolge Frost-Tauwechsel dar. Erst bei einem Abfall auf 70% spricht man von einer Schädigung des Materials. Die Messungen ergeben in der Regel einen stetig abfallenden Kurvenverlauf über die Zyklen des Frost-Tauwechsels. Die gemessenen Schwankungen in Abb. 5-18 sind mechanisch nicht interpretierbar. Insgesamt ist eine abfallende Tendenz auf einen Wert von ca. 81% nach 28 Zyklen zu beobachten.

Tab. 5-5 Wasseraufnahme der untersuchten Probekörper der Probekörper bei der CIF-Prüfung

Prüffläche	Anzahl FTW ¹	Wasseraufnahme [M.-%]					Mittelwert
		Probekörper					
		1	2	3	4	5	
an Teflon geschalte Seite	-14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-12	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0
	-8	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,6
	0	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2	2,2
	4	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
	8	2,8	2,8	2,9	3,2	3,0	2,9
	14	3,2	3,2	3,5	3,5	3,4	3,4
	18	3,3	3,4	3,8	3,7	3,6	3,6
	22	3,5	3,6	4,1	4,0	3,9	3,8
	28	3,9	4,0	4,5	4,5	4,4	4,3
an Folien geschalte Seite	-14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-12	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	-8	1,6	1,4	1,6	1,5	1,5	1,5
	0	2,2	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2
	4	2,5	2,4	2,5	2,6	2,5	2,5
	8	2,9	2,6	2,9	2,9	2,7	2,8
	14	3,3	3,0	3,2	3,4	3,1	3,2
	18	3,5	3,3	3,5	3,6	3,2	3,4
	22	3,7	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
	28	4,0	3,9	4,1	4,1	3,8	4,0

¹ FTW: Frost-Tau-Wechsel, bezogen auf den Beginn der Frostbeanspruchung (2 FTW entsprechen 1 Tag)

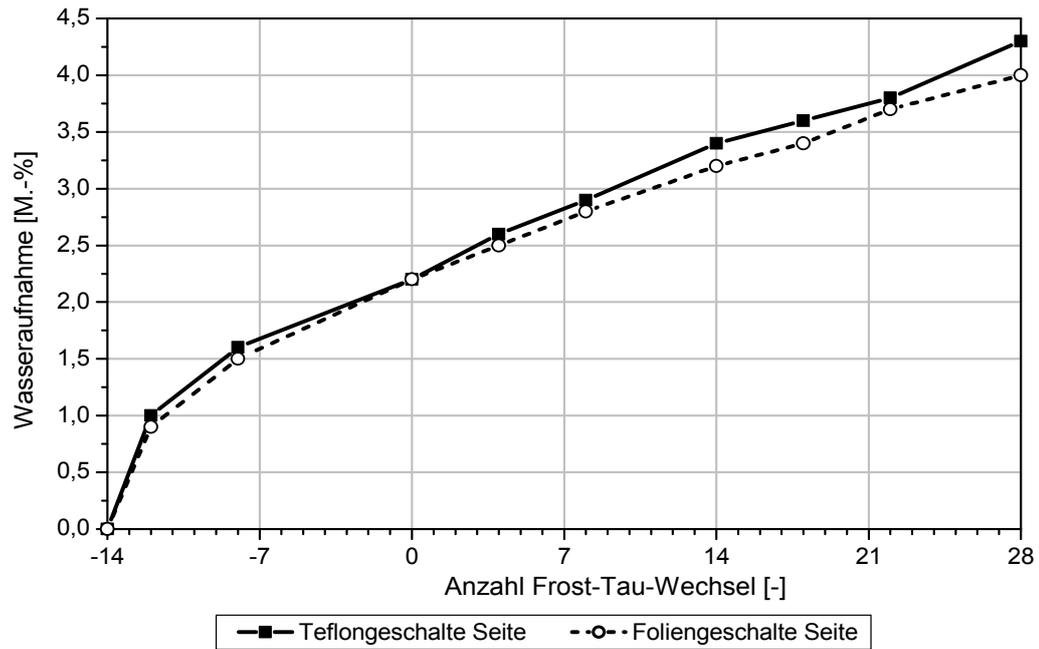


Abb. 5-19 Wasseraufnahme der untersuchten Probekörper bei der CIF-Prüfung

Tab. 5-6 Abwitterung (kumuliert) der Probekörper bei der CIF-Prüfung

Prüffläche	Anzahl FTW	Abwitterung [g/m ²]					Mittelwert
		Probekörper					
		1	2	3	4	5	
an Teflon geschalte Seite	4	8	10	8	7	6	8
	8	10	13	11	16	8	12
	14	13	14	15	18	9	14
	18	14	15	17	21	17	17
	22	15	17	19	23	19	19
	28	16	19	21	25	31	22
an Folien geschalte Seite	4	8	5	8	10	6	7
	8	12	8	14	14	8	11
	14	14	10	16	12	9	12
	18	16	11	19	14	13	15
	22	17	12	20	15	14	16
	28	18	14	21	15	15	17

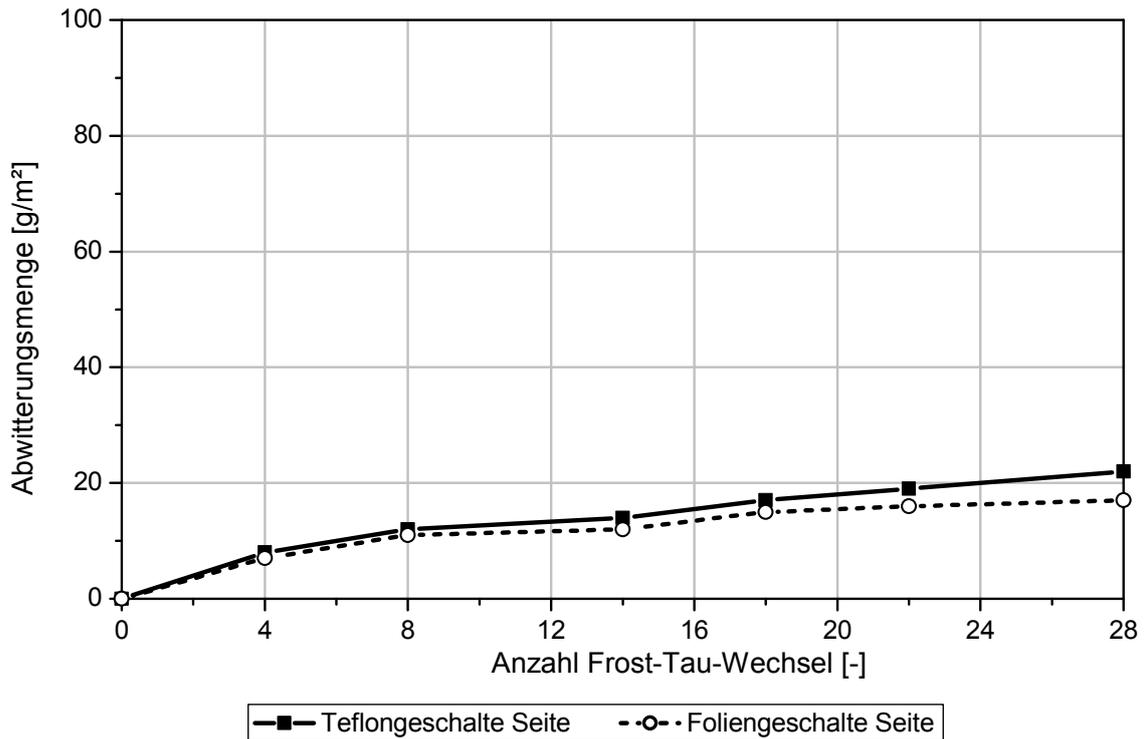


Abb. 5-20 Abwitterung der untersuchten Probekörper bei der CIF-Prüfung

Die gemessene Abwitterungsmenge betrug 20g/m^2 . Für den gleichen Versuchsaufbau weist Infrareichtbeton eine Abwitterung von 340g/m^2 auf, was einen sehr niedrigen Wert darstellt [19]. Praktisch gesehen kann man bei Beton mit Aerogelgranulat von keiner messbaren Abwitterung sprechen.

5.6 Prüfungen des Kriech- und Schwindmaßes

Die Durchführung des Kriechversuchs erfolgte nach Heft 422 des DAfStb „Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048“ [6]. Demnach ergibt sich das Kriechmaß $\varepsilon_{k,t}$ aus der Gesamtverformung $\varepsilon_{\text{ges},t}$, dem Schwindmaß $\varepsilon_{s,t}$ und der elastischen Verformung $\varepsilon_{\text{el},t_0}$ zu:

$$\varepsilon_{k,t} = \varepsilon_{\text{ges},t} - (\varepsilon_{s,t} + \varepsilon_{\text{el},t_0}) \quad [\text{mm/m}]$$

- $\varepsilon_{\text{ges},t}$ Wird im Dauerstandversuch unter konstanter Kriechspannung zum Zeitpunkt t ermittelt. Die Kriechspannung σ_k beträgt 30 % der Druckfestigkeit.
- $\varepsilon_{s,t}$ Schwindmaß, wird zeitgleich zum Dauerstandversuch an gleich gelagerten gesonderten Proben gemessen.
- $\varepsilon_{\text{el},t_0}$ Ist die anfängliche elastische Verformung, die sich aus der Kriechspannung σ_k zu Beginn des Kriechversuches im Alter von 28 Tagen ergibt.

Als spezifisches Kriechmaß wird das auf die Spannungseinheit bezogene Kriechmaß bezeichnet:

Spez. $\varepsilon_{k,t} = \varepsilon_{k,t} / \sigma_k$ [($\mu\text{m}/\text{m}$)/MPa]

Um für die Ermittlung der Kriechverformung eine genügend hohe Festigkeit der Proben zu haben wurden die Proben erst im Alter von 28 Tagen in den Kriechstand bzw. Schwindrahmen eingebaut. Bis dahin wurden die Prüfkörper bei 20°C feucht gelagert.

Zur Bestimmung der Belastungsgröße für die Kriechversuche wurde der Mittelwert der im Alter von 28 Tagen durchgeführten E-Modul-/ Druckprüfungen herangezogen.

Die Ermittlung des Kriech- und Schwindverhaltens wurde jeweils an drei Betonzylinder mit einer Höhe von rd. 300 mm und einem Durchmesser von rd. 150 mm geprüft. Die Prüfungen erfolgten in einem klimatisierten Raum bei 20°C und 65%r.F..

Im Kriechstand wurden die drei Zylinder in Reihe eingebaut (K1=oben, K2=Mitte, K3=unten) und mit einer konstanten Kriechspannung $\sigma_k = 0,73$ MPa belastet.

Zur Ermittlung der Schwindverformung wurde die Längenänderung an den restlichen drei Zylindern (S1, S2, S3) in sogenannten Schwindrahmen über die Prüfdauer gemessen. Die Schwindrahmen befanden sich im selben Klimaraum in Nähe der Kriechstände. Laut Hersteller wurden jeweils zwei Zylinder aus einer Charge hergestellt: K1 und S1, K2 und S2, K3 und S3.

Bei der Ermittlung der einzelnen spezifischen Kriechmaße für die Proben K1 bis K3 wurde von der Gesamtverformung das jeweils chargen-zugehörige Schwindmaß abgezogen.

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung wurden die Kriechprüfungen bereits abgebrochen, da die Probekörper sich kaum stabilisierendes Schwindverhalten aufwiesen.

5.7 Prüfungen des Wärmeausdehnungskoeffizienten

5.7.1 Prüfung nach DIN EN 1770

Die Prüfungen der Wärmeausdehnungskoeffizienten erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1770 (Alternativverfahren) [8] an insgesamt drei Prismen mit 40 mm x 40 mm x 160 mm Größe. Die Proben wurden 7 Tage feucht und nach der Anlieferung bis zur Prüfung im Normklima 21 Tage bei 20°C und 65% r.F. gelagert.

Vor dem Beginn der Prüfung wurden an die Stirnseiten der Prismen Messzapfen aufgeklebt. Die Ausgangsmessung (Gewicht und Länge) erfolgte unmittelbar vor dem Beginn der Lagerung in der Klimakammer.

Die Klimakammer wurde zunächst auf 23°C und 50% r.F. eingestellt. Die Proben wurden solange in der jeweils eingestellten Temperatur gelagert, bis die gemessene Längenänderung konstant ist. Danach wurde die nächste Temperaturstufe angefahren. Die Messungen erfolgten bei den Prüfkörpertemperaturen von 23°C, 40°C, 60°C, 0°C und -20°C.

Aufgrund der starken Anfälligkeit der Probekörper auf äußere Einflüsse durch Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit konnten keine aussagekräftigen Ergebnisse ermittelt werden.

5.7.2 Prüfung nach TP BE-PCC

Im Mai 2012 wurde eine Nachmessung mit einer Prüfkörperserie bestehend aus einer schwind reduzierten Rezeptur nach den technischen Prüfvorschriften für Betonersatz-

systeme vorgenommen. Hierbei wird durch den Einsatz eines Exsikator auf einen konstanten Feuchtigkeitseinfluss geachtet. Die Messung erfolgte nach den Prüfvorgaben in [3]. Hierbei konnte der Wärmeausdehnungskoeffizient α mit $1,1e-6$ bestimmt werden. Die Grunddaten sind im Anhang 8.2; S.57 gelistet.

6 Detailkatalog

Beim Bau eines Gebäudes sind eine Vielzahl von Details zu beachten, deren korrekte Ausbildung notwendig ist, um eine hinsichtlich statischer und bauphysikalischer Ansprüche funktionale Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen zu gewährleisten. Details sind in der Regel als Schnittstelle flächiger Bauteile linienförmig und erfüllen die Aufgabe, die einzelnen Schalen einer Wand funktionsgerecht miteinander zu verbinden. Die komplexesten Bereiche entstehen dabei im Schnittpunkt der Details an den Eckpunkten von Bauteilen.

Derzeit stellen mehrschalige Außenwände den Stand der Technik dar, wo jede Schicht abgestimmt in Ihrer Funktion eine optimale Gesamtfunktionalität der Wand gewährleistet. Aufgrund der steigenden Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten wird die Anfälligkeit auf eine Schwachstelle in diesem System immer größer. Dieses Problem tritt am wahrscheinlichsten im Bereich der Detailausbildung auf. Die korrekte Ausbildung dieser Punkte ist aufgrund der hohen Komplexität in einem hohen Maße von der handwerklichen Qualität der Umsetzung auf der Baustelle abhängig.

Durch die Integration einiger Funktionen in einem Werkstoff wird diese Entwicklung zurückgedreht. Der Planer ist in der Lage eine wesentlich einfachere und funktionsfähige Detaillösung zu entwerfen. Dieser Ansatz konnte bereits bei beispielhaften Gebäuden aus Wärme dämmenden Leichtbeton beobachtet werden. Aus diesem Material sind eine Reihe von Objekten gebaut worden, die durch eine besonders klare und einfache Detailausbildung bestechen. Tab. 6-1 gibt eine Übersicht einiger, ausgewählter Beispiele.

Tab. 6-1 ausgewählte Bauwerke mit monolithischen Wandaufbau aus Beton

Bauwerk	Baujahr	Literaturhinweis
Haus Meuli (CH)	2001	[15]
Haus Gartmann	2003	[15]
Haus Schlaich	2007	[19]
Wohn- und Geschäftshaus in Basel (CH)	2010	[1]

Die nachfolgenden Standarddetails zeigen exemplarisch, dass mit einem monolithischen Wandaufbau konstruktive Details wesentlich vereinfachter umgesetzt werden können. Besonders deutlich ist das am Beispiel des Fensters zu sehen. Ein Bezug zur Dämmebene ist nicht erforderlich, da es keine ausgeprägte Dämmebene gibt. Die Fenster können sowohl bündig mit der Außenseite oder tief in der Wand liegend eingebaut werden. Die Befestigung erfolgt über eine direkte Verschraubung mit der Wand. Zusätzlich sind Dichtungsmaßnahmen erforderlich, die optisch ansprechend über eine Acrylverfugung oder ein Quellfugenband erreicht werden.

Der dämmende Beton kann ebenfalls im Kellerbereich eingesetzt werden. Auch wenn auf eine Dämmung verzichtet werden kann, ist eine Abdichtung gegen das Erdreich empfehlenswert.

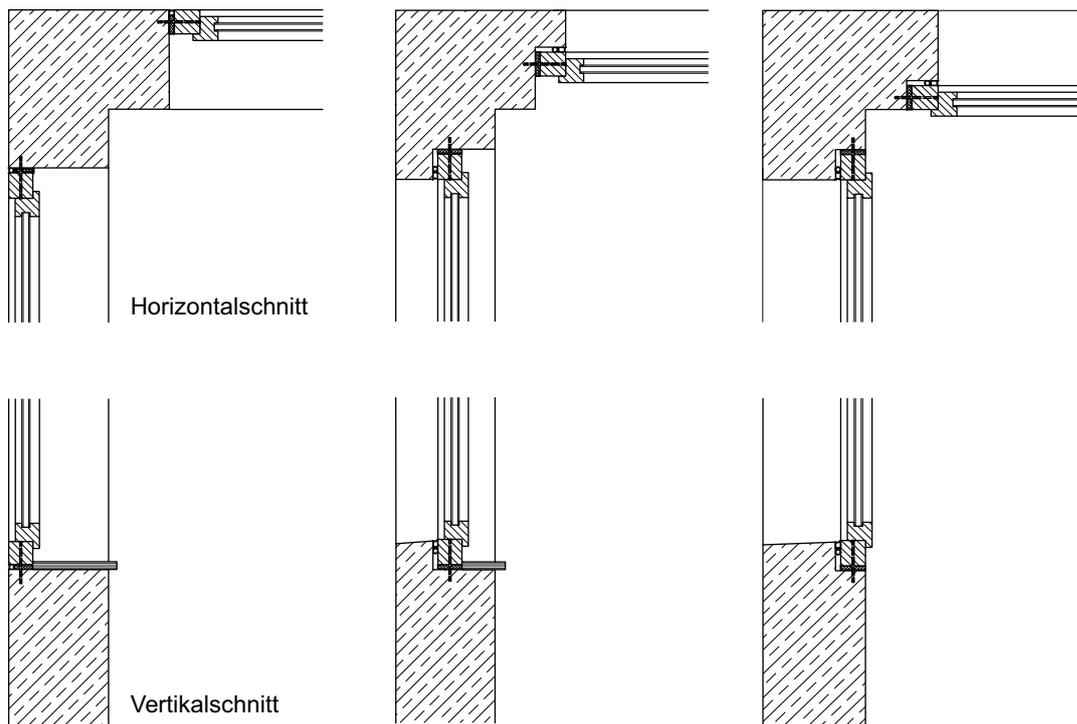


Abb. 6-1 Frei wählbare Fensterebene innerhalb der Wandebene

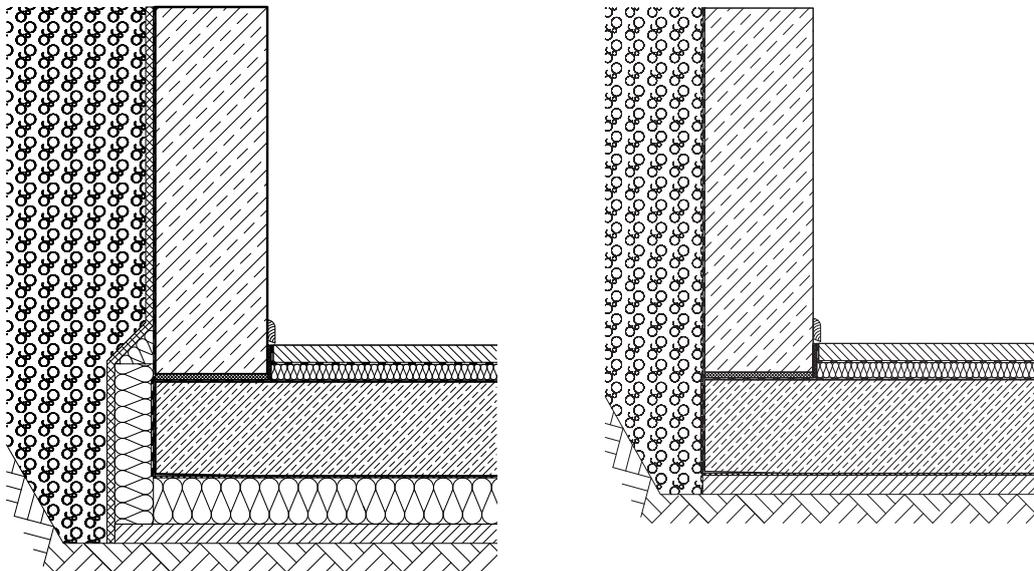
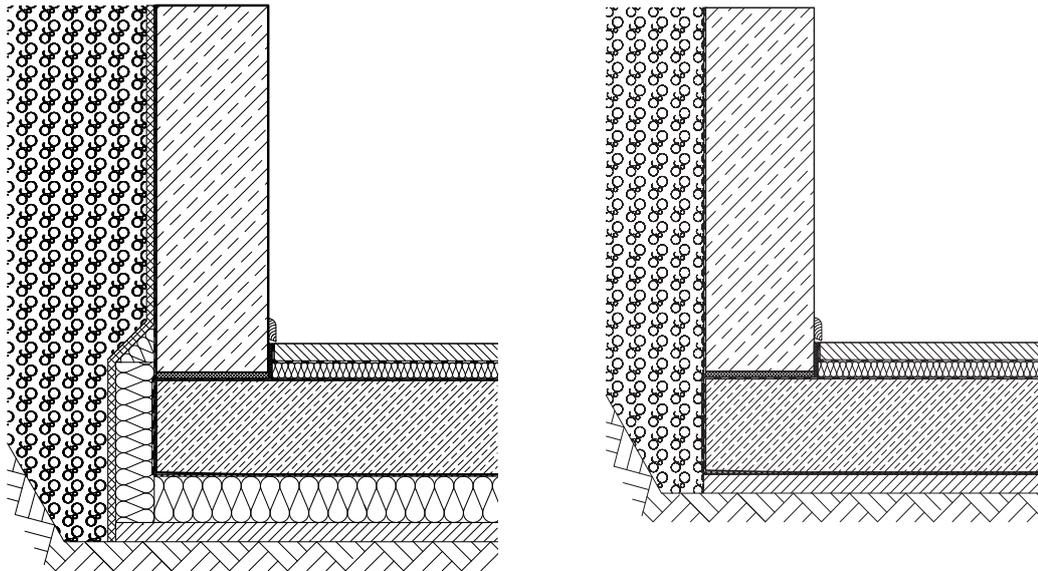


Abb. 6-2 Wandfußpunkt auf Kellerboden mit Zusatzdämmung (li.) und ohne (re.)



Die in

Abb. 6-2 links dargestellte Ausführung einer aufgehenden Kellerwand auf einer außen gedämmten Bodenplatte ist bauphysikalisch einwandfrei aber eine recht kostenintensive Lösung. Daher wird recht häufig die Dämmung auf der Innenseite der Bodenplatte ausgeführt (rechts), was wiederum zu einer Kältebrücke über die Unterseite der Bodenplatte und den Wandfußpunkt zur führt. Durch die Dämmwirkung des Leichtbetons wird dieser Punkt jedoch entschärft und es ergibt sich eine einwandfrei durchgehende Dämmebene.

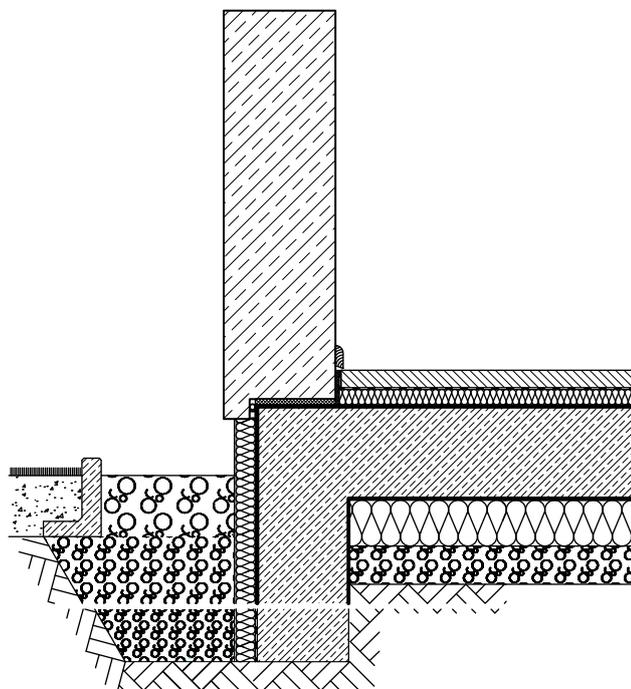


Abb. 6-3 Fußpunkt einer monolithischen Leichtbeton Erdgeschoßwand

Bei einem Gebäude ohne Keller wird die Bodenplatte ebenfalls von unten gedämmt. Um die Frostgefahr möglichst gering zu halten, kann auch in Kombination mit einer

Frostschürze gearbeitet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, eine Dämmschicht auf der Bodenplatte zu verlegen. Der Wandfuß ist über die komplette Wandtiefe gedämmt und kann somit wärmebrückenfrei auf der kalten Bodenplatte stehen.

Einen weiteren wichtigen Punkt stellt der Übergang zwischen einem Außen- und Innenbereich auf einer gebauten Struktur, etwa einem Keller dar (Abb. 6-4). Die Dämmung im Außenbereich ist erforderlich, um die tragende Deckenplatte aus Normalbeton zu dämmen. Aufgrund der geringen Biegezugfestigkeit eignet sich das neue Material nicht zur Herstellung ebener, auf Biegung beanspruchter Tragwerkselemente. Auf der Dämmschicht wird zusätzlich eine Gefälledämmung angeordnet, damit das Wasser auf der darüber liegenden Dichtungsschicht sicher abfließen kann. Die Dichtungsebene wird im Bereich der Außenwand nach oben gezogen und wasserdicht an die aufgehende Wand angeschlossen, um ein Eindringen von Wasser unterhalb der Dämmebene zuverlässig zu verhindern. Der Plattenbelag steht auf der Dichtungsebene, ohne diese zu durchdringen. Die Dämmbetonwand führt sowohl die Dämm- als auch die Dichtungsebene nach oben fort.

Für einen hervorspringenden Gebäudeteil kann die Außenwand auf eine auskragende Stahlbetonplatte gestellt werden (Abb. 6-5). Mit Hilfe einer Schürze wird die Wand bis zur Unterkante optisch verlängert. Das für die Kragplatte erforderliche WDVS wird bis zur Innenkante der Schürze geführt. Eine Tropfkante an der Unterseite verhindert, dass das Wasser daran entlangläuft. Alternativ kann auch bei diesem Detail ebenfalls mit einer innen liegenden Dämmschicht auf der Kragplatte gearbeitet werden, um eine geschlossene Dämmebene herzustellen. In diesem Fall kann die Kragplatte frei sichtbar in der Fassadenebene liegen.

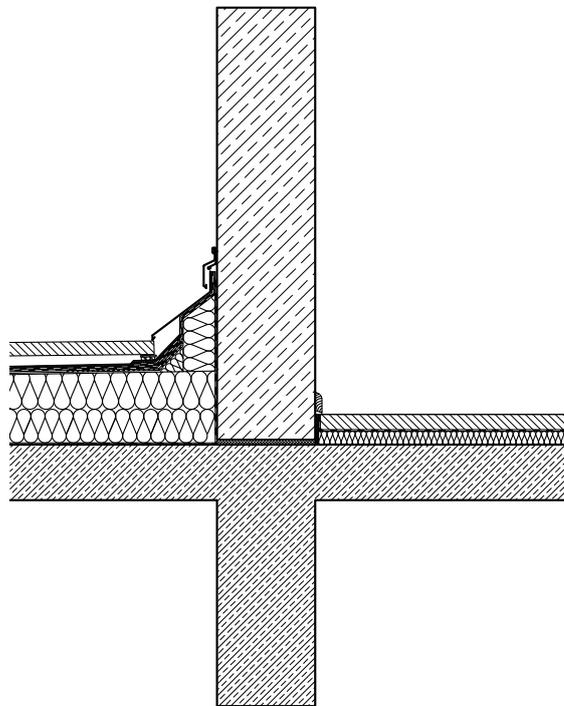


Abb. 6-4 Anschluss Terrasse an Außenwand auf ausgebauten Keller

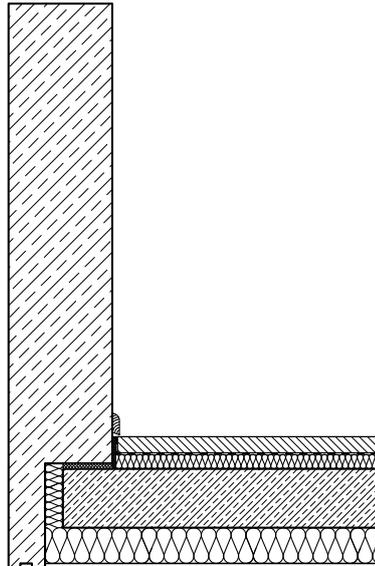


Abb. 6-5 Fußpunkt aufgehende Wand auf Kragplatte aus Normalbeton

Die Fertigteile erhalten im Bereich des Deckenspiegels eine horizontale Fuge. Hier liegt die Platte auf einem Konsolenartigen Rücksprung der darunterliegenden Wand auf (Abb. 6-6). Abhängig von der Auflagertiefe muss in diesem Bereich die verminderte Dämmwirkung durch eine Zusatzdämmung ausgeglichen werden. Die aufgehende Wand steht auf der Deckenplatte und kann ebenfalls auf die hochgezogene Blende der unteren Wand gestellt werden. Zu diesem Zweck wird deren Breite minimal auf $1/3$ der Wandstärke begrenzt. Die Fuge zwischen den Elementen wird von außen durch eine PU-Fuge dauerelastisch geschlossen.

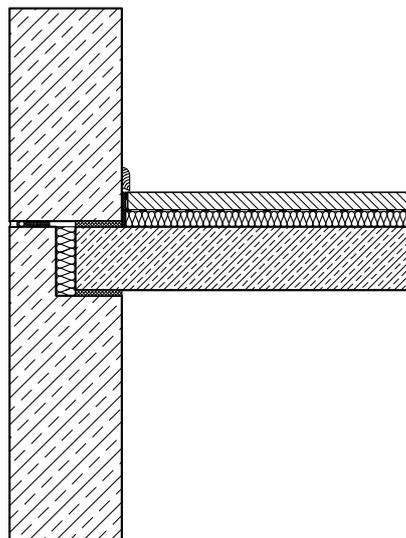


Abb. 6-6 Wandkopfpunkt und horizontale Fuge im Bereich des Deckenspiegels

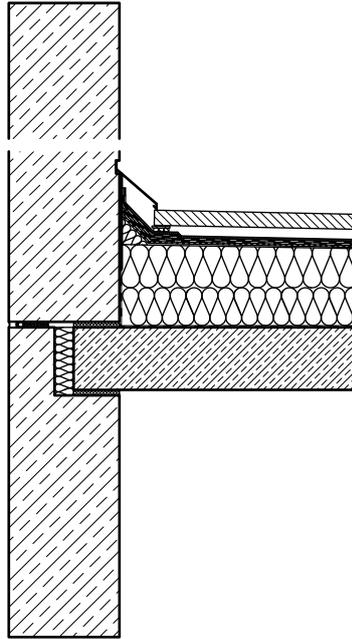


Abb. 6-7 Wandabschluss mit Attika

Oberhalb des letzten Geschosses erfolgt die Ausbildung einer Attika, um den Dachaufbau zu fassen. Die Dachdämmung schließt rückseitig direkt an die Attika an. Die Dachabdichtung wird rückseitig durch eine geeignete Dichtkonstruktion an der Attika angeschlossen. Die Auflagerung der Dachplatte erfolgt analog zum Detail des Deckenaufbauers. Durch die Dämmwirkung des Leichtbetons ist keine Umdämmung der Attika erforderlich.

7 Literatur

- [1] Wohn- und Geschäftshaus in Basel. DETAIL (2011), S. 366–371.
- [2] *Bundesanstalt für Wasserbau BAW*: Frostprüfung von Beton (Dezember 2004).
- [3] *Bundesverkehrsministerium*: TP BE-PCC Technische Prüfvorschriften für Betonsatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz (PCC): Verkehrsblatt-Verlag (1990).
- [4] Sicherheitsdatenblatt Nanogel (alle Sorten) Dezember 2008.
- [5] *Dechantsreiter, U.*: Aufbau eines Netzwerkes zur Wiederverwendung von gebrauchten Bauteilen in Deutschland. Ergebnisbericht ; Projektförderung von 2006 - 2009. Bremen ca. 2009].
- [6] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*: Heft 422 Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin: Beuth (1991).
- [7] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 1048 Teil 5: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellt. Berlin: Beuth (Juni 1991).
- [8] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 1770 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten. Berlin: Beuth (April 1998).
- [9] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 12667; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Berlin: Beuth (Mai 2001).
- [10] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 12390-3 Prüfung von Festbeton, Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Berlin: Beuth (Juli 2009).
- [11] *Dowson, M., Grogan, M., Birks, T., Harrison, D., Craig, S.*: Streamlined life cycle assessment of transparent silica aerogel made by supercritical drying. Applied Energy (2011).
- [12] *Eligehausen, R., Kreller, H., Langer, P.*: Untersuchungen zum Verbundverhalten gerippter Bewehrungsstäbe mit praxisüblicher Betondeckung. Stuttgart: IWB 1989.
- [13] Verantwortungsvoller Umgang mit Nanotechnologie bei Evonik. Essen.
- [14] *Faust, T.*: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn 2003.
- [15] *Filipaj, P.*: Architektonisches Potential von Dämmbeton. Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH 2006.
- [16] *Hub, A.*: Integriertes Konzept zur nachhaltigen Errichtung von Gebäuden in massiver Elementbauweise. Stuttgart 2012.

- [17] *Künzel, H. Dr.-Ing.*: Wärme- und Feuchteschutz. Wiesbaden 2003.
- [18] *Ratke, L.*: Herstellung und Eigenschaften eines neuen Leichtbetons: Aerogelbeton. Beton und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 236–243.
- [19] *Schlaich, M.*: Infraleichtbeton. Beton und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 175–182.
- [20] *Schramm, W.*: Endbericht zum Forschungsprojekt Technikbewertung von Aerogelen. Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie 1993.
- [21] *Schubert, U., Hüsing, N.*: Aerogele - luftige Materialien: Chemie, Struktur und Eigenschaften. ISSN 0044-8249. Angewandte Chemie 110 (1998), S. 22–47.
- [22] *Schwertfeger, F.*: Verfahren zur Herstellung von organisch modifizierten Aerogelen (01.08.1997).
- [23] Beurteilung eines möglichen Krebsrisikos von Nanomaterialien und von aus Produkten freigesetzten Nanopartikeln. Dessau Februar 2011.
- [24] *Zareef, M. e.*: Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete. Aachen: Shaker 2010.

8 Anhang

8.1 Prozesspläne

Wandsystem 1 Porenbeton

GaBi 4 Prozessplan: Masse [kg]

Es werden die Namen der Basisprozesse angezeigt.

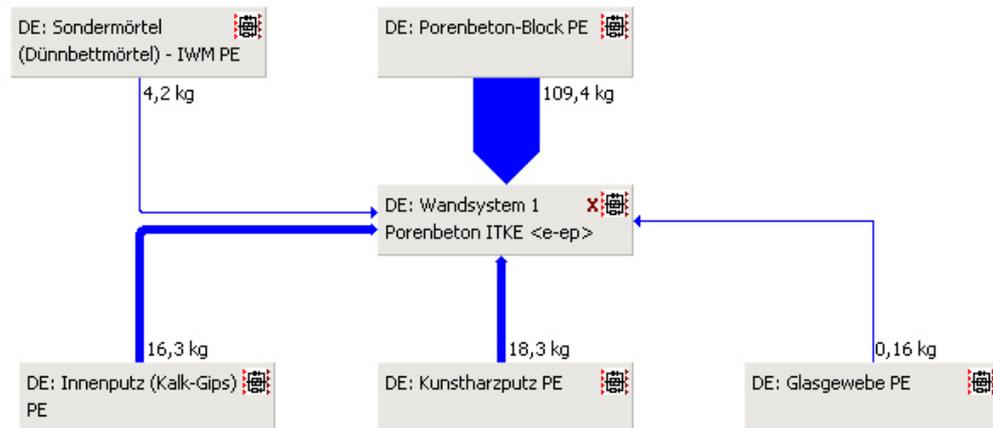


Abb. 8-1 Prozessplan Wandsystem Porenbeton

Wandsystem 2 Ziegelwand

GaBi 4 Prozessplan: Masse [kg]

Es werden die Namen der Basisprozesse angezeigt.

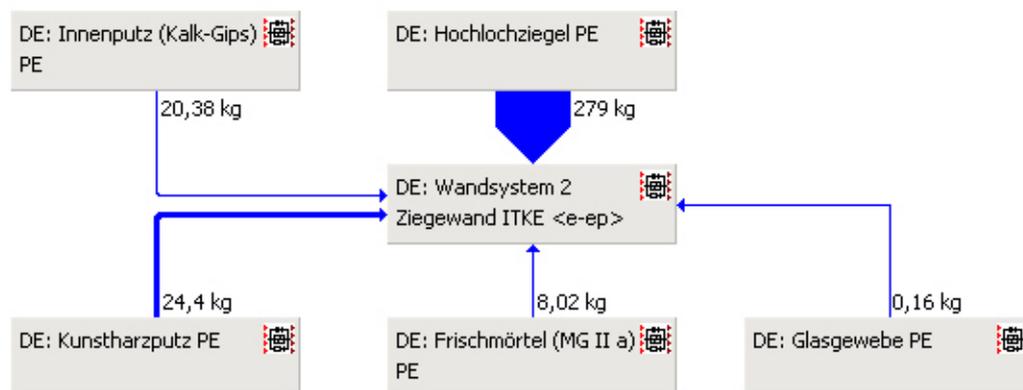


Abb. 8-2 Prozessplan Wandsystem Ziegelwand

Wandsystem 3a KS-WDVS (EPS)

GaBi 4 Prozessplan: Masse [kg]

Es werden die Namen der Basisprozesse angezeigt.

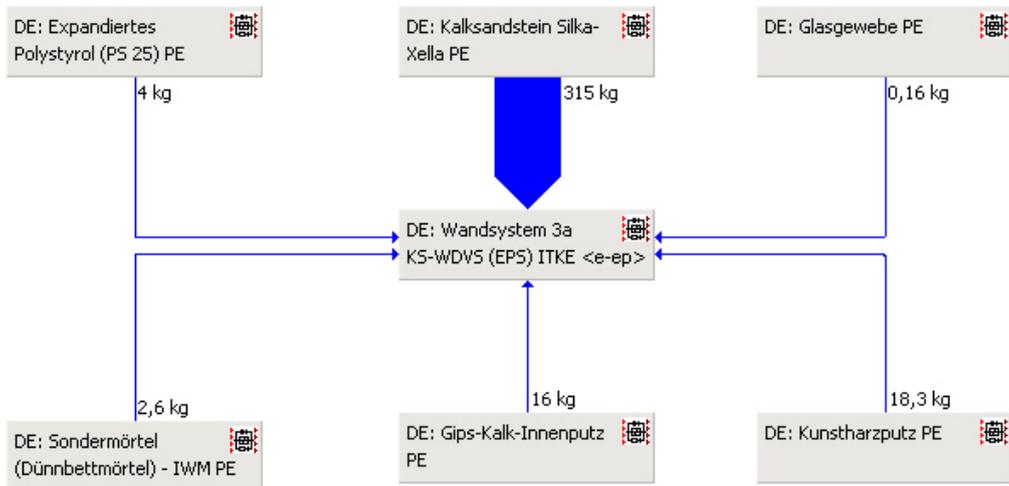


Abb. 8-3 Prozessplan Wandsystem Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem mit EPS-Dämmschicht

Wandsystem 3b KS-WDVS (Mineralwolle)

GaBi 4 Prozessplan: Masse [kg]

Es werden die Namen der Basisprozesse angezeigt.

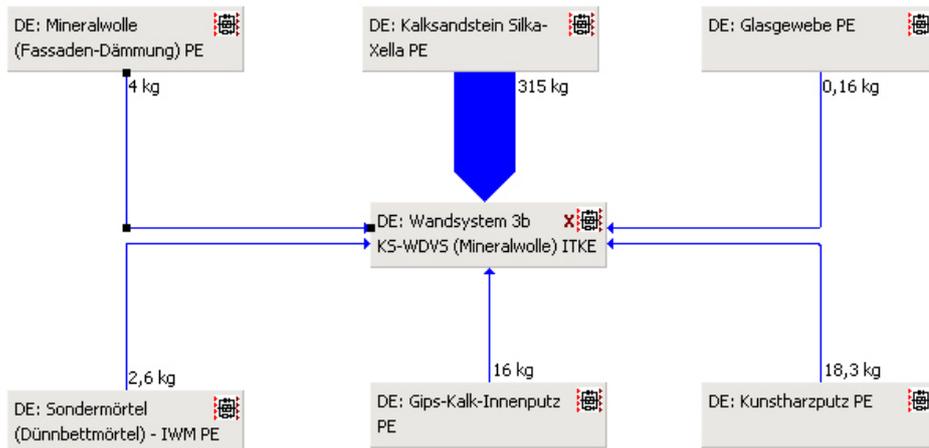


Abb. 8-4 Prozessplan Wandsystem Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle Dämmschicht

8.2 Experimentelle Daten – Wärmeausdehnung

Ermittlung der Thermischen Dehnung in Anlehnung an TP BE-PCC
von Prismen aus Aerogelbeton

Auftraggeber:
ITKE

Versuchsdurchführung:
MPA
Stuttgart

Pro- be-Nr.	Seite A (Breite) mm	Seite B (Dicke) mm	Länge mm	Volumen dm ³	Ausgangs- masse, ohne Messmar- ken g	Gesamt masse mit Messmar- ken und Kleber g	Masse Meß- marken incl. Kleber g	Trockenmas- se nach Schwindver- such ohne Messmarken (berechnet) g	Trockenmas- se nach Schwindver- such incl. Messmarken (berechnet) g	ermittelte Restfeuchte an Ver- gleichs- proben (Kriechzy- linder) %	Dichte Prüf- körper (berech- net) kg/dm ³
1	39,80	39,88	160,40	0,255	183,5	192,6	9,10	151,53	160,63	17,42%	0,595
2	39,77	39,66	160,43	0,253	183,2	192,6	9,40	151,29	160,69		0,598
3	39,75	40,06	160,26	0,255	184,2	193,3	9,10	152,11	161,21		0,596
Mittelwert:											0,596

		Aus- gangs- messung	Anmerkung: - = schwinden; + = quellen						
Ablesedatum:		16.05.2012	21.05.2012	22.05.2012	23.05.2012	24.05.2012	25.05.2012	29.05.2012	30.05.2012
Lagerungsdauer:			16. bis 21. bei 40°C	21. bis 22. bei 40°C	22. bis 23. bei 80°C	23. bis 24. bei 80°C	24. bis 25. bei 20°C	25. bis 29. bei 80°C	29. bis 30. bei 20°C
Probe Nr.:	Lagerungsbedingungen:	20°C/65%	40°C	40°C	80°C	80°C	20°C (Exikator)	80°C	20°C (Exikator)

1	Messanzeige	[mm]	0,209	-0,071	-0,074	-0,166	-0,201	-0,309	-0,257	-0,365
	Masse	[g]	192,6	172,4	172,0	167,1		166,9	166,3	166,4
2	Messanzeige	[mm]	0,617	0,335	0,330	0,240	0,203	0,094	0,149	0,038
	Masse	[g]	192,6	171,9	171,5	166,7		166,4	165,9	166,0
3	Messanzeige	[mm]	0,252	-0,022	-0,025	-0,122	-0,153	-0,257	-0,210	-0,314
	Masse	[g]	193,3	172,8	172,5	167,6		167,4	166,8	166,9
Differenzwerte zur vorherigen Temperaturlagerung bei 20°C bzw. 80°C:										
1	Δ Länge	[mm]				-0,375	-0,410	-0,108	0,052	-0,108
	Δ Masse	[g]				-25,5		-0,2	-0,6	0,1
2	Δ Länge	[mm]				-0,377	-0,414	-0,109	0,055	-0,111
	Δ Masse	[g]				-25,9		-0,3	-0,5	0,1
3	Δ Länge	[mm]				-0,374	-0,405	-0,104	0,047	-0,104
	Δ Masse	[g]				-25,7		-0,2	-0,6	0,1
abs. Längenänderung:										
1	ΔL	[mm/m]				2,338	2,556	0,673	0,324	0,673
2	ΔL	[mm/m]				2,350	2,581	0,679	0,343	0,692
3	ΔL	[mm/m]				2,334	2,527	0,649	0,293	0,649
Wärmedehnzahl $\alpha_T = \Delta L / \Delta T$ mit $\Delta T = 60K$:										
1	α_T	[1/K]				3,9E-05	4,3E-05	1,1E-05	5,4E-06	1,1E-05
2	α_T	[1/K]				3,9E-05	4,3E-05	1,1E-05	5,7E-06	1,2E-05
3	α_T	[1/K]				3,9E-05	4,2E-05	1,1E-05	4,9E-06	1,1E-05
MW	α_T	[1/K]				3,9E-05	4,3E-05	1,1E-05	5,3E-06	1,1E-05

8.3 Prüfbericht Wärmeleitfähigkeit

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Prüfbericht P1-012/2012

Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstands und der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12667 von Leichtbetonplatten mit Aerogelzuschlag »AE-05«

Auftraggeber:
Universität Stuttgart
Institut für Tragwerksplanung und
Konstruktives Entwerfen
Keplerstraße 11
70174 Stuttgart

Stuttgart, 26. Januar 2012

Prüflabor durch das DAP akkreditiert
nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005



DEUTSCHES
AKKREDITIERUNGSSYSTEM
PRÜFWESSEN GMBH **DAP**



DAP-PL-3743.27
Wärme-Kennwerte

Prüflabor Wärme-Kennwerte
Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-3333
Telefax +49 711 970-3340
www.ibp.fraunhofer.de/pruefstellen

Wärmedurchlasswiderstand und Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12667: 2001

Auftraggeber	Universität Stuttgart, ITKE, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart
Prüfverfahren/Prüfgerät/Probeneinbau	Zweiplattenverfahren, 500 mm-Gerät Nr. 7 mit Schutzring, Probeneinbau horizontal, Umgebungstemperatur 20 °C
Prüfungszeitraum	4. KW 2012

Proben:

Probenbezeichnung	»AE-05 P1« und »AE-05 P2«		
Materialart	Leichtbetonplatten mit Aerogelzuschlag		
Probenanlieferung	Am 14. Dezember 2011 durch den Auftraggeber.		
Vorbehandlung	Trocknung bei 105°C (Trockenschrank mit Luftumwälzung)		
Ermittelte Probenkennwerte		Probe 1 (11/528)	Probe 2 (11/529)
Dichte nach Vorbehandlung	kg/m ³	571,2	565,2
Relative Massenänderung	kg/kg	0,113	0,159
Länge x Breite x Dicke, vor Messung	mm	496 x 495 x 51,0	495 x 495 x 52,0
Länge x Breite x Dicke, nach Messung	mm	496 x 495 x 51,0	495 x 495 x 52,0
Relative Massenänderung	kg/kg	0,002	0,002
Dichte nach Messung	kg/m ³	572,4	564,9
Flächenbezogene Masse nach Messung	kg/m ²	–	–

Ergebnisse:

Messung Nr.	Mitteltemperatur der Probenoberfläche		Mittlere Temperaturdifferenz	Mitteltemperatur der Proben	Wärme-strom-dichte	Wärme-durchlass-widerstand R	Wärmeleit-fähigkeit λ
	Heiz-plattenseite	Kühl-plattenseite					
	°C	°C					
1	15,0	5,1	9,9	10,0	19,3	0,515	0,0999

Hinweis:

Die gemessenen Werte stellen keine Bemessungswerte nach DIN 4108 dar. Anträge zur Festsetzung von Bemessungswerten sind zu richten an das Deutsche Institut für Bautechnik, Kolonnenstraße 30, 10829 Berlin.

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den Prüfgegenstand.

Die Prüfung wurde in einem Prüflaboratorium durchgeführt, das vom DIBt nach LBO/BRL mit Nr. BWU-10 anerkannt und nach DIN EN ISO/IEC 17025 durch das DAP mit der Nr. DAP-PL-3743.27 flexibel akkreditiert ist.

Dieser Prüfbericht besteht aus 2 Seiten.

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

Stuttgart, den 26. Januar 2012/WD

Stellv. Leiter der PÜZ-Stelle

Bearbeiterin

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Zegewitz

M. Eng. Giulia De Aloysio

