

Wolfgang Brameshuber, Julia Steinhoff, Rebecca Mott

**Entwicklung eines Wandsystems  
mit hoher Wärmedämmung aus  
selbstverdichtendem porosiertem  
Leichtbeton in Kombination mit einer  
bauteilintegrierten Wandschalung aus  
textilbewehrtem Beton**

F 2770

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8463-0

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

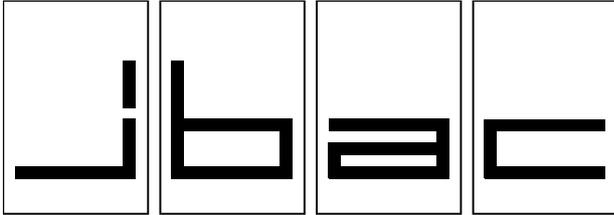
Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

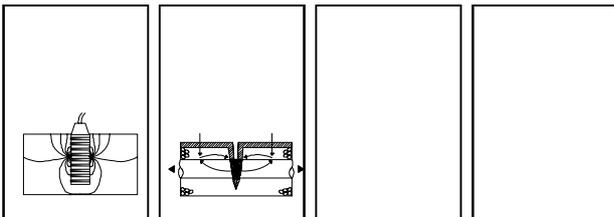
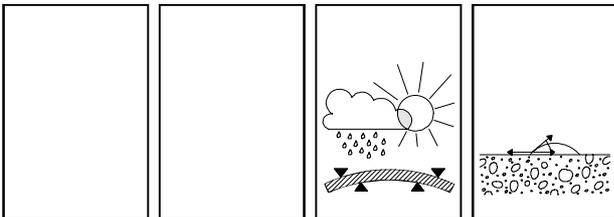
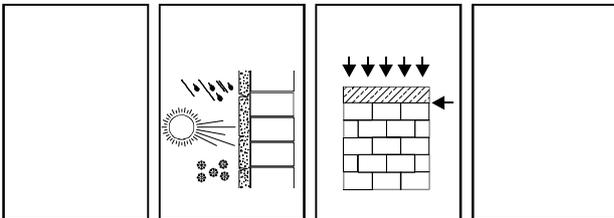
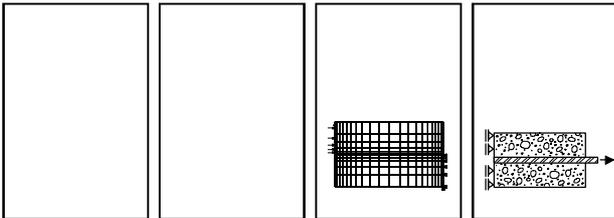
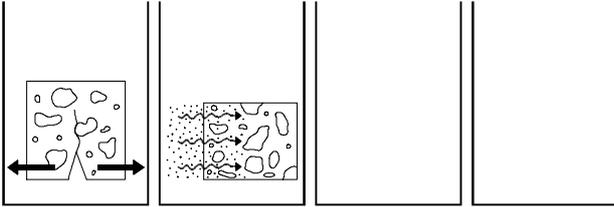
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN



FORSCHUNG · ENTWICKLUNG  
 ÜBERWACHUNG  
 PRÜFUNG · BERATUNG

RHEINISCH-  
 WESTFÄLISCHE  
 TECHNISCHE  
 HOCHSCHULE  
 AACHEN  
**RWTH**  
 AACHEN  
 UNIVERSITY

## Forschungsbericht F 958

Entwicklung eines Wandsystems mit hoher Wärmedämmung aus selbstverdichtendem porosiertem Leichtbeton in Kombination mit einer bauteil-integrierten Wandschalung aus textilibewehrtem Beton

Sth/Fk

5. Ausfertigung

## **THEMA**

Entwicklung eines Wandsystems mit hoher  
Wärmedämmung aus selbstverdichtendem  
porosiertem Leichtbeton in Kombination mit  
einer bauteilintegrierten Wandschalung aus  
textilbewehrtem Beton

- ABSCHLUSSBERICHT -

**Forschungsbericht Nr.**

F 958  
vom 30.11.2010

**Projektbearbeitung**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. J. Steinhoff

Dipl.-Ing. R. Mott

**Auftraggeber/Förderer**

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
BBR - Forschungsinitiative "Zukunft Bau"  
Referat II 2  
Deichmannsaue 31-37  
53179 Bonn

**Ihre Bestellung/Beauftragung vom  
Ihr Aktenzeichen**

30.11.2006  
Z6-10.08.18.7-06.31

Dieser Bericht umfasst 108 Seiten, davon 105 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

## FÖRDERHINWEIS

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7-06.31/ II 2 – F20-06-029)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

| <b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b> |   | <b>Seite</b> |
|----------------------------------|---|--------------|
| 1                                | EINLEITUNG .....                                    | 1            |
| 2                                | STAND DER FORSCHUNG .....                           | 2            |
| 2.1                              | Allgemeines .....                                   | 2            |
| 2.2                              | Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk .....         | 2            |
| 2.3                              | Textilbeton .....                                   | 4            |
| 2.4                              | Schaumbeton / Leichtbeton .....                     | 8            |
| 2.5                              | Bauphysikalische Berechnungen .....                 | 9            |
| 2.5.1                            | Allgemeines .....                                   | 9            |
| 2.5.2                            | Glaser-Verfahren .....                              | 11           |
| 3                                | ZUSAMMENFASSUNG DES ARBEITSPROGRAMMS.....           | 14           |
| 4                                | BEMESSUNG DER BAUTEILINTEGRIERTEN SCHALUNG .....    | 15           |
| 4.1                              | Allgemeines .....                                   | 15           |
| 4.2                              | Feinbeton .....                                     | 16           |
| 4.2.1                            | Mischungsentwicklung .....                          | 16           |
| 4.2.2                            | Frischbetonkennwerte.....                           | 17           |
| 4.2.3                            | Festbetonkennwerte .....                            | 18           |
| 4.2.3.1                          | Allgemeines .....                                   | 18           |
| 4.2.3.2                          | Druck- und Biegezugfestigkeit .....                 | 18           |
| 4.2.3.3                          | Statischer E-Modul.....                             | 19           |
| 4.2.3.4                          | Schwinden und Kriechen .....                        | 19           |
| 4.2.3.5                          | Wärmeleitfähigkeit .....                            | 22           |
| 4.3                              | Vorversuche zum Querkrafttragverhalten .....        | 22           |
| 4.4                              | Berechnungen der BIS.....                           | 25           |
| 4.5                              | Versuche zum Tragverhalten von $\pi$ -Platten ..... | 30           |
| 4.6                              | Herstellung der BIS-Elemente im Fertigteilwerk..... | 33           |

| <b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b> |  | <b>Seite</b> |
|----------------------------------|--|--------------|
| 5                                | ENTWICKLUNG DES SELBSTVERDICHTENDEN POROSIERTEN LEICHTBETONS (SVPLB) ..... | 38           |
| 5.1                              | Allgemeines .....  | 38           |
| 5.2                              | Tastversuche .....   | 38           |
| 5.3                              | Hauptversuche .....  | 40           |
| 5.3.1                            | Mörtelversuche .....   | 40           |
| 5.3.2                            | Ausgewählte Ausgangsstoffe .....   | 41           |
| 5.3.3                            | Mischungsoptimierung des SVPLB .....                                       | 42           |
| 5.3.4                            | Schwierigkeiten bei der Betonherstellung .....                             | 44           |
| 5.3.5                            | Festbetoneigenschaften des SVPLB .....                                     | 44           |
| 5.3.5.1                          | Allgemeines .....  | 44           |
| 5.3.5.2                          | Druckfestigkeit .....  | 45           |
| 5.3.5.3                          | Spaltzugfestigkeit .....   | 45           |
| 5.3.5.4                          | E-Modul und Spannungs-Dehnungslinien .....                                 | 46           |
| 5.3.5.5                          | Schwinden und Kriechen .....   | 47           |
| 5.3.5.6                          | Karbonatisierung .....   | 49           |
| 5.3.5.7                          | Trockenrohdichte .....   | 50           |
| 5.3.5.8                          | Frost-Widerstand .....   | 50           |
| 5.3.5.9                          | Wärmeleitfähigkeit .....   | 52           |
| 6                                | WANDHERSTELLUNG .....  | 52           |
| 6.1                              | Allgemeines .....  | 52           |
| 6.2                              | Bauphysikalische Berechnung und Abmessungen der Wand .....                 | 52           |
| 6.3                              | Herstellung der Wände im Fertigteilwerk .....                              | 57           |
| 6.4                              | Herstellung am ibac .....  | 60           |
| 6.4.1                            | Allgemeines .....  | 60           |
| 6.4.2                            | Wand 1 .....   | 60           |
| 6.4.3                            | Wand 2 .....   | 61           |
| 6.4.4                            | Wand 3 und Wand 4 .....  | 62           |

| <b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b> |                                 | <b>Seite</b> |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------|
| 7                                | WANDPRÜFUNG .....               | 63           |
| 7.1                              | Allgemeines .....               | 63           |
| 7.2                              | Wand 1 .....                    | 66           |
| 7.2.1                            | Allgemeines .....               | 66           |
| 7.2.2                            | Zentrische Druckfestigkeit..... | 66           |
| 7.2.3                            | Versagensverhalten .....        | 67           |
| 7.2.4                            | Kennwerte des SVPLB .....       | 69           |
| 7.2.4.1                          | Allgemeines .....               | 69           |
| 7.2.4.2                          | Druckfestigkeit .....           | 69           |
| 7.2.4.3                          | Haftzugprüfung .....            | 70           |
| 7.3                              | Wand 2 .....                    | 71           |
| 7.3.1                            | Allgemeines .....               | 71           |
| 7.3.2                            | Zentrische Druckfestigkeit..... | 71           |
| 7.3.3                            | Versagensverhalten .....        | 72           |
| 7.3.4                            | Kennwerte des SVPLB .....       | 74           |
| 7.3.4.1                          | Allgemeines .....               | 74           |
| 7.3.4.2                          | Temperaturentwicklung.....      | 74           |
| 7.3.4.3                          | Druckfestigkeit .....           | 75           |
| 7.3.4.4                          | Haftzugprüfung .....            | 75           |
| 7.4                              | Wand 3 .....                    | 76           |
| 7.4.1                            | Allgemeines .....               | 76           |
| 7.4.2                            | Zentrische Druckfestigkeit..... | 76           |
| 7.4.3                            | Versagensverhalten .....        | 77           |
| 7.4.4                            | Kennwerte des SVPLB .....       | 79           |
| 7.4.4.1                          | Allgemeines .....               | 79           |
| 7.4.4.2                          | Druckfestigkeit .....           | 79           |
| 7.4.4.3                          | Trockenrohdichte .....          | 80           |
| 7.4.4.4                          | Haftzugprüfung .....            | 80           |
| 7.5                              | Wand 4 .....                    | 81           |
| 7.5.1                            | Allgemeines .....               | 81           |
| 7.5.2                            | Zentrische Druckfestigkeit..... | 81           |
| 7.5.3                            | Versagensverhalten .....        | 82           |

| <b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b> |   | <b>Seite</b> |
|----------------------------------|---|--------------|
| 7.5.4                            | Kennwerte des SVPLB .....                             | 84           |
| 7.5.4.1                          | Allgemeines .....                                     | 84           |
| 7.5.4.2                          | Temperaturentwicklung.....                            | 84           |
| 7.5.4.3                          | Druckfestigkeit .....                                 | 85           |
| 7.5.4.4                          | E-Modul .....   | 86           |
| 7.5.4.5                          | Trockenrohddichte .....                               | 86           |
| 7.5.4.6                          | Haftzugprüfung .....                                  | 87           |
| 7.6                              | Diskussion der Ergebnisse .....                       | 87           |
| 7.6.1                            | Allgemeines .....                                     | 87           |
| 7.6.2                            | Vergleich der Wandprüfungen .....                     | 87           |
| 7.6.3                            | Traglastverteilung .....                              | 89           |
| 7.6.4                            | Wärmetechnische Eigenschaften der Wände 1 und 2 ..... | 91           |
| 7.6.5                            | Wirtschaftliche Betrachtung .....                     | 92           |
| 8                                | ZUSAMMENFASSUNG .....                                 | 93           |
| 9                                | DANKSAGUNG .....                                      | 96           |
| 10                               | LITERATUR .....                                       | 96           |
|                                  | TABELLEN .....  | A1-A2        |
|                                  | BILDER .....  | B1           |

## 1 EINLEITUNG

Im Wohnungsbau werden Außenwandkonstruktionen üblicherweise aus ein- oder zweischaligem Mauerwerk erstellt. Mit Hilfe dieses Forschungsvorhabens sollte eine Alternative für eine Außenwandkonstruktion entwickelt werden, die zum einen den Ansprüchen des Wärmeschutzes entspricht und zum anderen eine sehr gute Oberflächenqualität aufweist. Bei dem angestrebten Wandaufbau sollten keine zusätzlichen Wärmedämmstoffe angewendet werden, um alle verwendeten Baustoffe voll recyclingfähig zu halten. Bei dieser neuartigen Wandbauweise handelt es sich um eine Fertigteilelementwand unter Einsatz einer bauteilintegrierten Wandschalung aus textilbewehrtem Beton. Als Verfüllbeton kommt ein selbstverdichtender porosierter Leichtbeton (SVPLB) unter Verwendung von leichter Gesteinskörnung und einer porösen Matrix zum Einsatz.

Durch den kombinierten Einsatz der bauteilintegrierten Schalung aus Textilbeton und des SVPLB lassen sich die technischen Eigenschaften der beiden Bauarten positiv addieren und ökologische und ökonomische Vorteile erwirken. Im Folgenden sind die Vorteile der Gesamtkonstruktion kurz zusammengefasst:

- Herstellung eines Wandsystems mit geringem Gewicht bei gleichzeitig deutlich erhöhter Wärmedämmung im Vergleich zu Normalbeton
- Einhaltung der Bestimmungen zum Wärmeschutz
- Hohe Dauerhaftigkeit der Gesamtkonstruktion durch verbesserte und gleichmäßigere Betonqualität des Fertigteils möglich
- Weitgehend freie Gestaltungsmöglichkeit der Oberfläche in Sichtbetonqualität
- Beschleunigung des Betoniervorgangs durch Verwendung des SVPLB
- geringere Belastung der Schalelemente durch Wegfall des Rüttelvorgangs
- Beschleunigung des Baufortschritts durch Verwendung von Fertigteilelementen
- Kostenreduzierung durch Beschleunigung des Baufortschritts
- Ressourcenschonung durch gezielte Ausnutzung und Kombination des Anwendungspotentials der Baustoffe
- Schonung der Umwelt aus ökologischer Sicht (wärmetechnische und energetische Einsparmöglichkeiten)

Das neu entwickelte Wandsystem wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens auf seine grundsätzliche Eignung getestet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in diesem Abschlussbericht zusammengestellt.

## 2 STAND DER FORSCHUNG

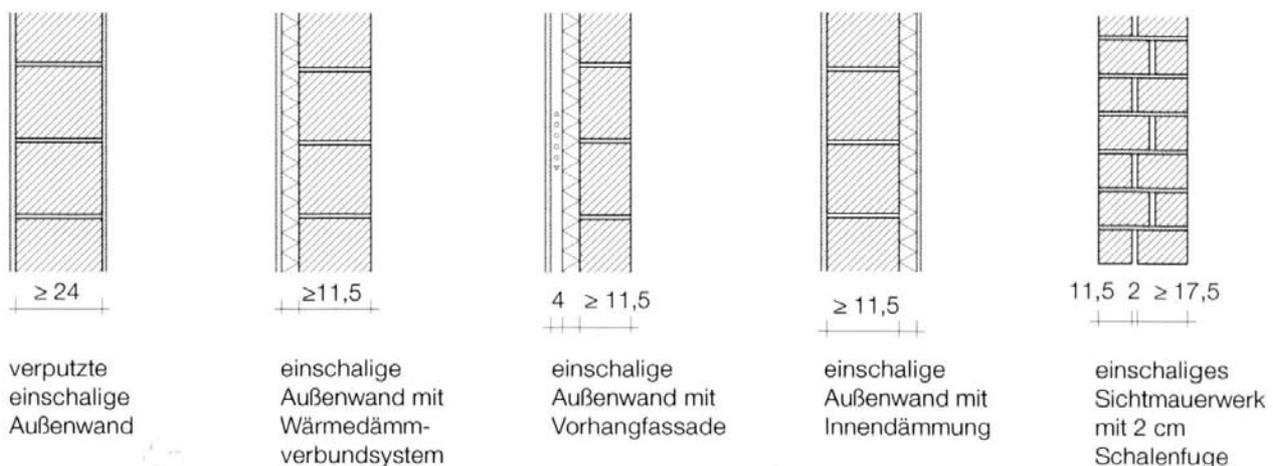
### 2.1 Allgemeines

Dieses Kapitel gliedert sich in vier Themenbereiche. Zunächst wird ein Überblick über die üblicherweise im Wohnungsbau verwendeten Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk gegeben. Im Folgenden werden dann die beiden Ausgangsstoffe der neuartigen Wandkonstruktion, Textilbeton und Schaumbeton, näher betrachtet. Abschließend werden die grundsätzlichen bauphysikalischen Hintergründe und Berechnungen für Außenwände kurz erläutert.

### 2.2 Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk

Bei Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk unterscheidet man zwischen einschaligen und zweischaligen Wandaufbauten. Beide Konstruktionen müssen statische und bauphysikalische Aufgaben gleichermaßen erfüllen.

Bei einschaligen Mauerwerkswänden unterscheidet man fünf verschiedene Aufbauarten, wobei jede neben meist gutem Wärmeschutz auch Nachteile beinhaltet. Bild 1 zeigt eine Übersicht dieser Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk.

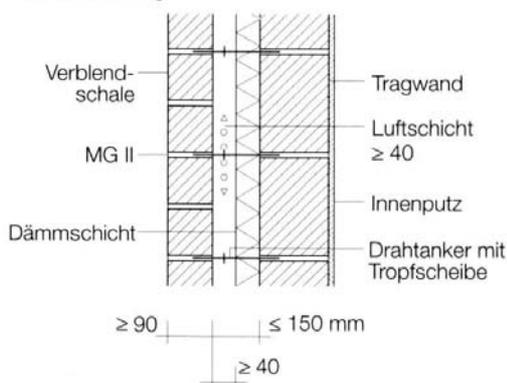


**Bild 1:** Einschalige Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk /Pfe01/

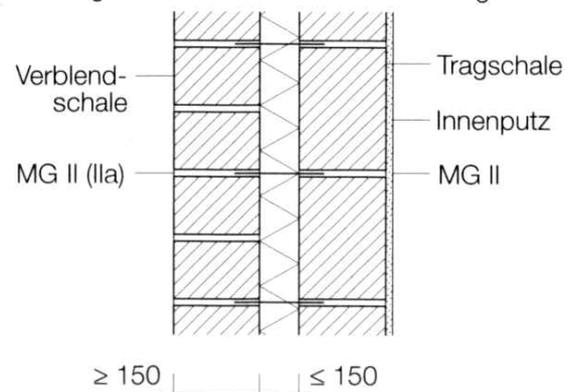
Einschalige Außenwände mit Putz oder mit Wärmedämmverbundsystem sind empfindlich gegenüber mechanischen Beschädigungen. Die Ausführung eines Wärmedämmverbundsystems erfordert eine große Sorgfalt, um Schäden zu vermeiden. Bei einschaligen Außenwänden mit Vorhangfassade entstehen durch die mechanische Abfangung der Vorhangfassade Wärmeverluste, deren Ausmaß erheblich sein kann. Eine einschalige Außenwand mit Innendämmung wird meist nur bei Sanierungen von Altbauten angewendet. Aus bauphysikalischer Sicht ist die fast vollständig fehlende Wärmespeicherwirkung als ungünstig zu bewerten, und bei schlechter Ausführung können Tauwasserprobleme auftreten. Der Schallschutz kann durch Flankenübertragung zu Nachbarräumen durch ungeeignete Innendämmsysteme beeinträchtigt werden. Mit unverputzten und ungedämmten einschaligen Außenwänden wird es oft schwierig, die Anforderungen an den Wärmeschutz zu erfüllen /Pfe01/.

Zweischaliges Mauerwerk bietet guten bis sehr guten Wärmeschutz. Man unterscheidet zwischen einer zweischaligen Außenwand mit Luftschicht, mit Luftschicht und Wärmedämmung, mit Kerndämmung sowie mit Putzschicht. Bei all diesen Wandarten muss besonders auf ausreichende Entwässerungsmöglichkeiten und Lüftungsöffnungen geachtet werden, damit die Konstruktion nicht durchfeuchtet. Zudem sind die Aufbauten von zweischaligem Mauerwerk durch ihre Komplexität und den damit verbundenen hohen Arbeitsaufwand anfällig für Fehler. Sie benötigen daher eine sehr sorgfältige Ausführung, um Schäden zu vermeiden /Pfe01/. Bild 2 zeigt beispielhaft zwei zweischalige Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk.

Zweischalige Außenwand mit Luftschicht und Wärmedämmung



Zweischalige Außenwand mit Kerndämmung



**Bild 2:** Zweischalige Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk /Pfe01/

Mauerwerkswände sind grundsätzlich recyclingfähig. Eine Einschränkung dieser Aussage bezieht sich auf das verwendete Wärmedämmmaterial. Hier ist die Recyclingfähigkeit abhängig von den Ausgangsstoffen des verwendeten Wärmedämmstoffes oder Wärmedämmputzes.

## 2.3 Textilbeton

Textilbewehrter Beton ist ein innovativer Verbundwerkstoff, dessen Materialeigenschaften seit 11 Jahren in zwei Sonderforschungsbereichen, dem SFB 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ an der TU Dresden sowie dem SFB 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ an der RWTH Aachen, erforscht werden. Diese Untersuchungen gehen mit der Erkundung neuer Anwendungsgebiete und Herstellverfahren für den Textilbeton einher.

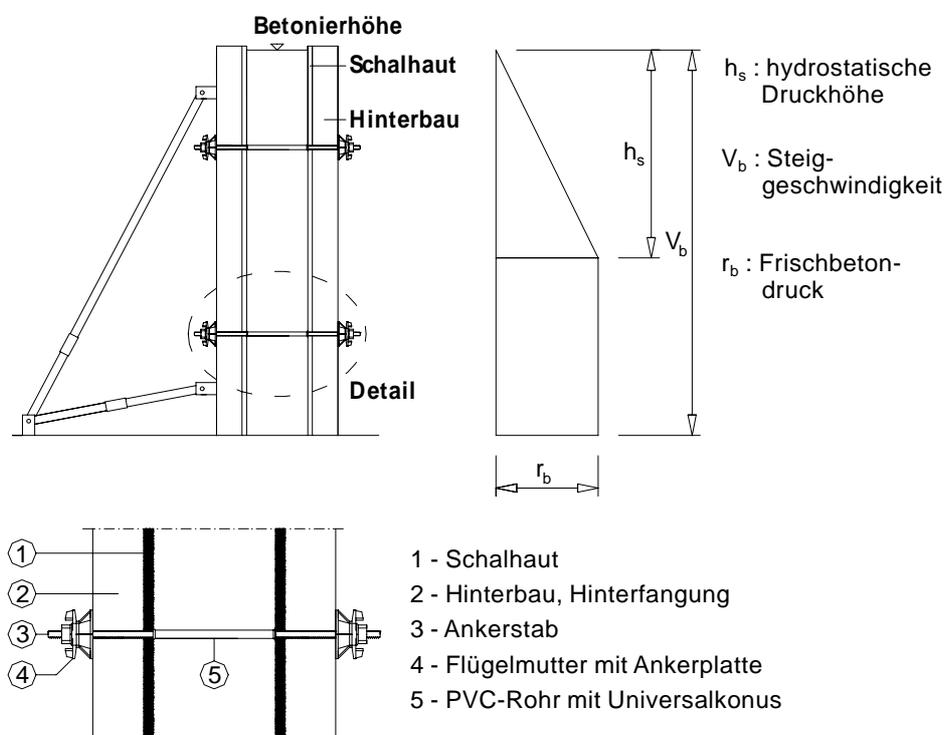
Textilbeton setzt sich aus Feinbeton sowie eingelegten technischen Textilien, die z. B. aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) oder Carbon bestehen, zusammen. Die Vorteile von textilbewehrtem Beton sind sehr vielfältig. Im Vergleich zu herkömmlichem Stahlbeton kann die Betondeckung bei Textilbeton aufgrund des geringen Korrosionsrisikos auf ein Minimum reduziert werden. Hierdurch ist es möglich, dünnwandige, filigrane Bauteile und damit leichte Konstruktionen herzustellen. Feinbeton besitzt einen hohen Mehlkornanteil bei einem Größtkorn von meist nur 1 mm. Hierdurch ist es möglich, die Betonflächen nahezu beliebig zu gestalten und mit hoher Oberflächenqualität herzustellen. Die sehr dichte Struktur des Feinbetons führt ebenfalls zu einer guten Dauerhaftigkeit. Durch die Kombination von Feinbeton und Textilien können Bauteile mit hoher Druck- und Zugfestigkeit sowie einem sehr duktilen Verhalten erzeugt werden /Bra06/.

Neben dem SFB 532 wurden am Institut für Bauforschung Aachen (ibac) auch weitere, anwendungsbezogene Projekte zum Textilbeton durchgeführt. Zum Thema „Bauteilintegrierte Schalung“ (BIS) wurden durch die zwei Forschungsvorhaben „Textilbewehrte Betonelemente als bauteilintegrierte Schalung“ (AiF-Projekt) /Bra03a, Bra03b/ sowie „Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung einer innovativen Schalungstechnologie“ /Bra04, Ban04, Ban05/ grundlegende Erkenntnisse über diesen Schalungstyp aus textilbewehrtem Beton erarbeitet.

Weiterhin wurden innerhalb des BBR-Forschungsvorhabens „Nachträgliche Abdichtung von Wohngebäuden gegen drückendes Grundwasser unter Verwendung von textilbewehrtem Beton“ (Zeichen: Z6–10.07.03-05.20) /Bra08/ sowie des AiF-Forschungsvorhabens „Serielle Einzelfertigung (Stückfertigung) von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton“ /Bra07/ die Produktionstechnik von Textilbeton weiter untersucht. Im letztgenannten Vorhaben wurden auch speziell zur seriellen Einzelfertigung von BIS-Elementen Untersuchungen durchgeführt /Bra07/. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz dargestellt.

Erste bauteilintegrierte Schalungselemente sind im Rahmen des durch die AiF geförderten Forschungsprojekts /Bra04/ unter Laborbedingungen aus Feinbeton und technischen Textilien mittels eines Injektionsverfahrens und eines Eindrückverfahrens hergestellt worden.

Bild 3 zeigt eine Prinzipskizze einer Elementwand mit bauteilintegrierter Schalung bei der Herstellung. Während der Betonage nimmt die bauteilintegrierte Schalung die infolge des Frischbetondrucks auftretenden Biegezugspannungen auf der Außenseite und die Druckspannungen auf der Innenseite auf. Im Endzustand tragen sie durch ihre dichte Porenstruktur zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit bei.



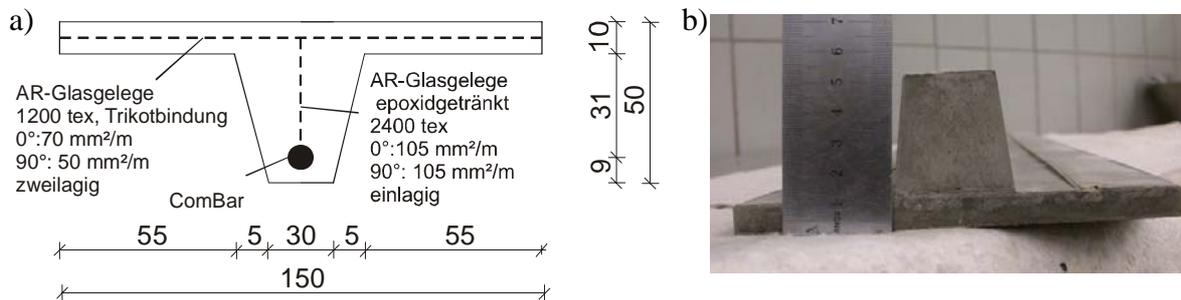
**Bild 3:** Prinzipskizze der Elementwand bei der Herstellung

Die Ergebnisse aus 4-Punkt-Biegezugversuchen an diesen BIS-Elementen belegen, dass das gewählte System aus textilbewehrtem Beton in der Lage ist, die aus der Anwendung resultierenden Anforderungen in Bezug auf Tragfähigkeit, Verarbeitbarkeit und optischer Gestaltung zu erfüllen. Gemäß DIN 1045-2:2008-08 /DIN08a/ wurde in /Bra04/ für ein BIS-Element mit einer Länge von  $l = 450$  mm bei einer Stützweite von  $l_{\text{eff}} = 396$  mm (unter Annahme einer 40 mm breiten Auflagerfläche (z. B. DOKA-Träger), einem Stegabstand  $d_{\text{Steg}} = 144$  mm, einer Plattendicke von  $h_{\text{Platte}} = 10$  mm und einer Steghöhe von  $h_{\text{Steg}} = 25$  mm der rechnerische und experimentelle Tragfähigkeitsnachweis im Rahmen eines 4-Punkt-Biegezugversuchs erbracht. In der Bemessung wurde gemäß DIN 18218:1980-09 /DIN80/ ein Frischbetondruck für einen Beton der Konsistenz F3 bei einer Betoniergeschwindigkeit von  $v_b = 2,0$  m/h angesetzt. Auch die Gebrauchstauglichkeit des BIS-Elements wurde im Rahmen der Betonage einer Säule unter Praxisbedingungen nachgewiesen.

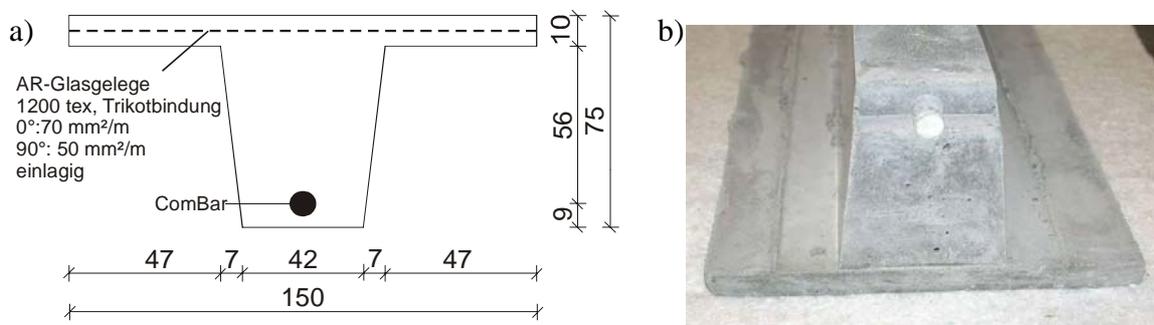
Im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens zur seriellen Einzelfertigung /Bra07/ wurden Produktionsverfahren zur stückweisen Herstellung von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton untersucht. Innerhalb des Projekts wurde auch die Fertigung von Elementen einer bauteil-integrierten Schalung aus Textilbeton in seiner Gesamtheit untersucht. Hierzu zählten die Bemessung der Bauteile sowie als Schwerpunkt die Produktionstechnik mit der Anpassung von Feinbetonmischung und Textilien an das Verfahren sowie der Entwicklung und Auswahl benötigter Abstandhalter.

Zur Untersuchung des Fertigungsablaufs wurden Stegplatten mit einer Breite von 1,05 m und einer Höhe von 2,70 m betrachtet. Das Schalungselement wird in Abständen von 0,5 m rückwärtig durch Querjoche unterstützt. Es wurden zwei Varianten des Schalungselements entwickelt, Variante 1 mit und Variante 2 ohne Querkraftbewehrung (Bilder 4 und 5).

Aufgrund der beschriebenen Randbedingungen ergibt sich als statisches System für die Bemessung des Schalungselements ein Fünffeldträger mit beidseitigem Kragarm. Als Einwirkung wird der Frischbetondruck beim Betoniervorgang angesetzt, der von der Rohdichte und der Konsistenz des Betons sowie von der Betoniergeschwindigkeit abhängt und in DIN 18218 /DIN80/ geregelt ist.



**Bild 4:** Querschnitt Variante 1, Skizze (a, Maße in mm), Bauteil (b)



**Bild 5:** Querschnitt Variante 2, Skizze (a, Maße in mm), Bauteil (b)

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte ursprünglich Variante 1 des Schalsystems zum Einsatz kommen. Die geringeren Querschnittsabmessungen im Vergleich zu Variante 2 tragen zu einer Verbesserung der wärmedämmenden Eigenschaft bei. Das Vorgehen bei der Herstellung der Elemente ist im Abschlussbericht des Vorhabens zur seriellen Einzelfertigung /Bra07/ detailliert beschrieben. Bild 6 zeigt die vorkonfektionierte Stegbewehrung bestehend aus einem vertikal angeordneten, flächigen Textil und einem aufgelegten GFK-Stab.

Die 150 mm breiten Streifen der bauteilintegrierten Schalung wurden im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens in 4-Punkt-Biegezugversuchen mit Belastung in den Drittelpunkten geprüft /Bra07/. Es stellte sich erwartungsgemäß für die Versuche mit positiver Momentenbeanspruchung (Textilbewehrung in der Zugzone) ein Biegeversagen und für die negative Momentenbeanspruchung (GFK-Bewehrung in der Zugzone) ein Querkraftversagen ein. Es zeigte sich, dass der Lastfall Frischbetondruck von den sehr schlanken Elementen bei ausreichendem Bewehrungsgehalt aufgenommen werden kann /Bra07/.

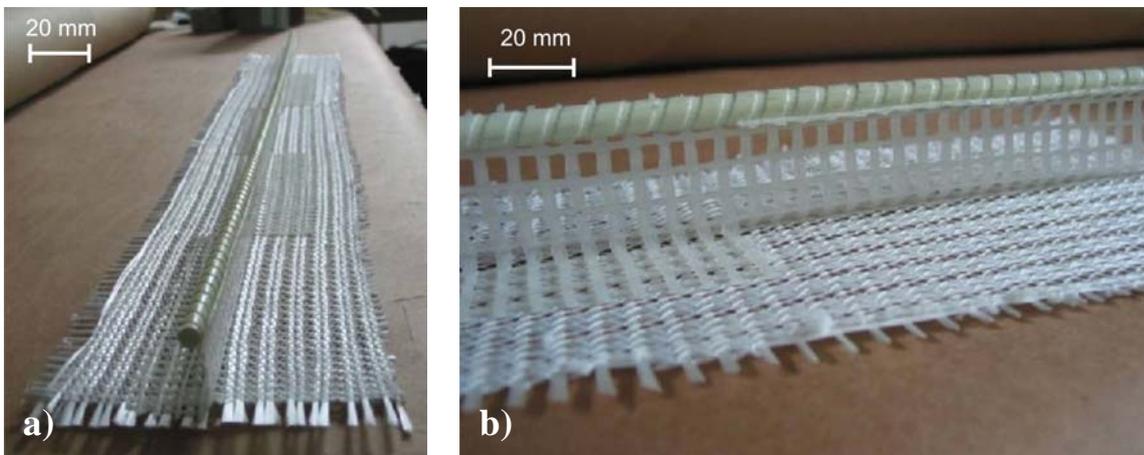


Bild 6: Vorkonfektionierter Bewehrungskorb des Schalungselements /Bra07/

## 2.4 Schaumbeton / Leichtbeton

Bei der Entwicklung eines selbstverdichtenden porosierten Leichtbetons (SVPLB) steht im Vordergrund, einen Verfüllbeton mit geringer Rohdichte durch Verwendung von leichter Gesteinskörnung sowie dem Eintrag von künstlich eingeführten Luftporen in die Matrix zu erzielen. Selbstverdichtende Betone tragen zur Beschleunigung des Betoniervorgangs bei und erzeugen eine geringere Belastung der Schalelemente durch den Wegfall des Rüttelvorgangs. Der porosierte Leichtbeton besitzt gleichzeitig eine deutlich erhöhte Wärmedämmeigenschaft im Vergleich zu Normalbeton.

Untersuchungen zum Einsatz von Schaumbildnern, die vor dem Mischen des Betons vorgeschäumt werden sind von Lohaus an Normalbeton bereits durchgeführt worden /Loh00, Loh02/. Hierbei sind positive Eigenschaften im Vergleich zu den durch Luftporenbildner eingeführten Luftporen festgestellt worden. Die Reproduzierbarkeit im Hinblick auf die Erzielung eines definierten Luftporengehaltes ist mit Schaumbildnern z. B. wesentlich höher als bei konventionellen Luftporenbildnern.

Vorteilhaft für den Einsatz von Schaumbeton im Wohnungsbau ist, dass der Baustoff nicht brennbar ist (Baustoffklasse A1), ein reduziertes Eigengewicht sowie eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt. Geschäumte Betone sind ebenfalls frostbeständig. Dies ist in diesem Zusammenhang durch die beidseitige bauteilintegrierte Schalung nicht erforderlich, zeigt allerdings weitere Anwendungsgebiete auf. Grundsätzlich stellt Schaumbeton ein sehr komplexes System dar, bei dem auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Betonzusatzmitteln auftreten können /Pot06/.

Die Entwicklung von selbstverdichtenden Leichtbetonen hat gezeigt, dass Trockenrohdichten von etwa  $1400 \text{ kg/m}^3$  problemlos erreicht werden konnten, ohne die selbstverdichtende Wirkung zu verlieren /Mül02, Mül02a, Deh01/. Ein kombinierter Einsatz von Schaum und leichter Gesteinskörnung in SVB wurde bislang noch nicht systematisch untersucht. Erste Vorversuche am ibac zeigten positive Ergebnisse. Die Kombination von Schaum und leichter Gesteinskörnung wird als viel versprechend erachtet. Neben positiven Effekten auf die Verarbeitung kann gleichzeitig die wärmedämmende Eigenschaft gesteigert werden, sofern die Trockenrohdichte des Betons ausreichend gering ist.

## **2.5 Bauphysikalische Berechnungen**

### **2.5.1 Allgemeines**

Ein wichtiges Regelwerk für eine erste bauphysikalische Bemessung der neuartigen Wandkonstruktion ist die Energieeinsparverordnung (EnEV). Sie stellt energetische Anforderungen an Gebäude und ihre Anlagentechnik in der nachzuweisenden Größe des „Jahres-Primärenergiebedarf  $Q_P$ “. Dieser erfasst neben dem Jahres-Heizwärmebedarf  $Q_H$  den Nutzwärmebedarf für die Warmwasserbereitung  $Q_W$  und die Anlagenaufwandszahl  $e_P$ . Die Kennzahl  $e_P$  umfasst die Wärmeverluste des Heizungssystems und des Systems zur Warmwasserbereitung und -verteilung sowie auch den elektrischen Energiebedarf für alle Einrichtungen, die für den Betrieb der Heizungs- und raumluftechnischen Anlagen und der Warmwasserbereitung benötigt werden.

Die Normenreihe DIN V 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“ gibt neben Berechnungsmethoden auch nutzungsbezogene Randbedingungen für eine neutrale Bewertung zur Ermittlung des generellen Energiebedarfs unabhängig von individuellem Nutzerverhalten und lokalen Klimadaten. Dabei werden auch die gegenseitige Beeinflussung von Energieströmen und die daraus resultierenden planerischen Konsequenzen berücksichtigt. Auf diese Weise kann der langfristige Energiebedarf für Gebäude ermittelt und die Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energien für Gebäude abgeschätzt werden. Die aktuelle Fassung der Energieeinsparverordnung EnEV 2009 verweist auf die DIN V 18599 als alternative Berechnungsmethode sowohl für Wohn- als auch für Nichtwohngebäude.

Weiterhin zu beachten ist die DIN 4108 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“. Bestandteil des Teils 2 „Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“ /DIN03/ sind unter anderem Mindestwerte für Wärmedurchlasswiderstände  $R$  von Bauteilen. In Teil 3

„Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung“ /DIN01/ wird ein gängiges Verfahren zur Tauwasserbildung im Querschnitt, das so genannte „Glaser-Verfahren“, beschrieben.

Gegenstand der Entwicklungen im Forschungsvorhaben ist eine neuartige Wandkonstruktion für den Wohnungsbau. Die oben genannten Verfahren der EnEV sowie der Normenreihe DIN V 18599 bieten hauptsächlich Berechnungsmethoden an, mit denen der Energiebedarf ganzer Gebäude ermittelt wird. Die Wandkonstruktion soll im Rahmen dieser Untersuchungen zunächst jedoch unabhängig von den Abmessungen des späteren Gebäudes, in dem die Wandelemente zum Einsatz kommen können, betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde das Wandsystem als einzelne Außenwand bemessen.

Nach DIN 4108-2:2003-07 /DIN03/ darf der Wärmedurchlasswiderstand  $R$  einer Außenwand einen Wert von  $1,2 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$  nicht unterschreiten, um die Anforderungen zum Mindestwärmeschutz für einzelne Bauteile zu erfüllen. Da dieser Wert nicht ausreichend ist, um den Anforderungen der EnEV /EnE07, EnE09/ im Ganzen zu entsprechen, wurde als Richtwert für die Außenwand der „Höchstwert des Wärmedurchgangskoeffizienten bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen“ angenommen. Zum Zeitpunkt der ersten Berechnungen und ersten Wandversuche dieses Projekts galt die EnEV 2007 /EnE07/. Laut diesem Regelwerk sollte der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  bei Wohngebäuden und Zonen von Nichtwohngebäuden mit Innentemperaturen  $> 19^\circ\text{C}$  einen Wert von  $0,45 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  nicht überschreiten.

Da bekannt war, dass die Anforderungen an den Wärmeschutz ab 2009 um ca. 30 Prozent verschärft werden sollten, wurde für die Berechnungen ein Maximalwert  $U$  von  $0,315 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  angesetzt. Seit 01. Oktober 2009 und somit auch zum Zeitpunkt der letzten Wandversuche gilt die EnEV 2009 /EnE09/. Nach diesem Regelwerk darf der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  bei Wohngebäuden und Zonen von Nichtwohngebäuden mit Innentemperaturen  $> 19^\circ\text{C}$  maximal  $0,24 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  betragen.

Eine erneute EnEV-Novelle wurde bereits angekündigt. Demnach sollen die energetischen Anforderungen sowohl für Neubauten als auch für Modernisierungen in der künftigen EnEV 2012 um nochmals fast 30 Prozent verschärft werden. Der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  bei Wohngebäuden und Zonen von Nichtwohngebäuden mit Innentemperaturen  $> 19^\circ\text{C}$  würde sich demnach auf einen Wert von  $0,17 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  verringern.

In Abschnitt 2.5.2 werden das bauphysikalische Berechnungsverfahren sowie die zugehörigen Mindest- bzw. Maximalwerte, die die neue Wandkonstruktion erfüllen muss, näher erläutert.

## 2.5.2 Glaser-Verfahren

Mit Hilfe des Glaser-Verfahrens wird ermittelt, ob Tauwasser in einem Bauteil anfällt und ggf. kritische Mengen an Tauwasser überschritten werden /DIN01/.

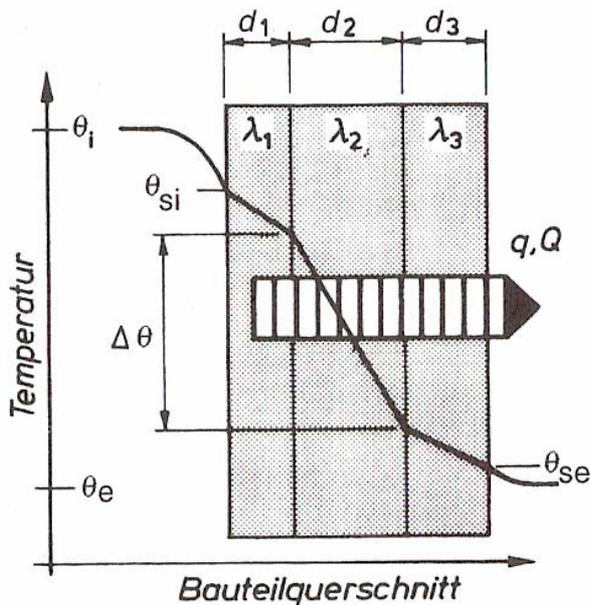
Die wesentlichen Eingangsdaten für die bauphysikalische Berechnung sind die Schichtdicke  $s_i$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_i$  und die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  eines jeden Baustoffs der Wandkonstruktion. Mit Hilfe dieser Werte können zunächst die Wärmedurchlasswiderstände  $R_i$  und daraus der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  der Wand berechnet werden.

Der Wärmedurchlasswiderstand  $R_i$  ermittelt sich aus der Division der Schichtdicke  $s_i$  durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_i$ . Die Summe dieser Werte ergibt den Wärmedurchlasswiderstand der Wand  $R_{\text{Wand}}$ . Da es an den Oberflächen von Bauteilen eine stehende Luftschicht gibt und diese wärmedämmende Eigenschaften aufweisen, kann diese zur Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes herangezogen werden. Nach DIN EN ISO 6946:2008-04 /DIN08c/ dürfen Werte von  $R_{\text{innen}} = 0,13$  und  $R_{\text{außen}} = 0,04$  für horizontal durchströmte Bauteile angenommen werden. Diese beiden Werte werden zum Wärmedurchlasswiderstand der Wand  $R_{\text{Wand}}$  addiert und es ergibt sich der Wärmedurchlasswiderstand  $R_{\text{ges}}$  des gesamten Bauteils. Der Kehrwert dieser Summe ergibt den Wärmedurchgangskoeffizient  $U$ . Er beschreibt den Wärmestromdurchgang, der bei einem Temperaturunterschied zwischen der Innen- und Außenluft pro Quadratmeter durch das Bauteil gelangt. Der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  ist ein spezifischer Kennwert, der von der Materialzusammensetzung des Bauteils abhängt. Je kleiner dieser Wert ist, desto bessere Dämmeigenschaften hat das Bauteil.

Nach der Ermittlung der Wärmedurchlasswiderstände  $R_i$  der einzelnen Schichten, kann ein Temperaturverlauf durch das Bauteil bestimmt werden. Bild 7 zeigt beispielhaft einen Temperaturverlauf durch eine Wand.

Zunächst wird für die Außenluft eine Temperatur  $\Theta_e$  und für die Innenluft eine Temperatur  $\Theta_i$  angenommen. Multipliziert man die Temperaturdifferenz mit dem Verhältnis des Wärmedurchlasswiderstandes  $R_i$  einer einzelnen Schicht bezogen auf den gesamten Wärmedurchlasswiderstand  $R_{\text{ges}}$  des Bauteils, so erhält man den Temperaturunterschied in der betref-

fenen Schicht. Addiert man die Werte der einzelnen Schichten beginnend bei der Außenlufttemperatur, so erhält man den Temperaturverlauf durch das Bauteil.



**Bild 7:** Beispielhafter Temperaturverlauf durch eine Wand /Sch06/

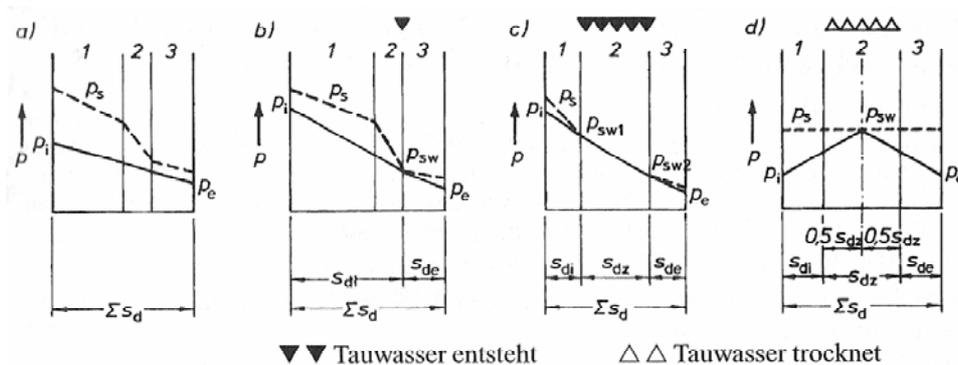
Im eigentlichen Glaser-Diagramm wird der Sättigungsdruck  $p_s$  des Wasserdampfes und der Wasserdampfpartialdruck in Abhängigkeit zur diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke  $S_d$  dargestellt.

Ist der Sättigungsdruck  $p_s$  des Wasserdampfes erreicht, so kann die Luft keinen zusätzlichen Wasserdampf mehr aufnehmen. Dieser Wert ist stark temperaturabhängig. So kann warme Luft viel mehr Wasserdampf aufnehmen als kältere Luft. Nach der Ermittlung des Temperaturverlaufs durch die Wand kann in Abhängigkeit zur Temperatur der Sättigungsdruck  $p_s$  des Wasserdampfes anhand von Tabellen oder Näherungsgleichungen bestimmt werden /DIN01/.

Zur Ermittlung der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke  $S_d$  benötigt man die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Sie beschreibt, wie groß der Wasserdampf-Diffusionswiderstand eines Baustoffs im Verhältnis zu einer gleich dicken Luftschicht ist. Multipliziert man die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  mit der jeweiligen Schichtdicke, so erhält man die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $S_d$ .

Zur Erstellung des Glaser-Diagramms trägt man als erstes den Sättigungsdruck  $p_s$  des Wasserdampfes über die aufsummierte diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $S_d$  auf und

erhält den Verlauf des Wasserdampf-sättigungsdrucks. Im nächsten Schritt werden die Wasserdampfpartialdrücke für die Außenluft bei  $-10\text{ °C}$  und  $80\%$  relativer Luftfeuchtigkeit zu  $p_a = 208\text{ Pa}$  und für die Innenluft bei  $+20\text{ °C}$  und  $50\%$  relativer Luftfeuchtigkeit zu  $p_i = 1170\text{ Pa}$  bestimmt. Diese Werte trägt man ebenso in das Diagramm ein und verbindet sie mit einer Linie und erhält den Verlauf des Wasserdampfpartialdrucks. Schneiden sich die beiden Kurven, so fällt Tauwasser in dieser Schichtgrenze an. Dort kann die Luft bei der vorhandenen Temperatur den Wasserdampf nicht mehr aufnehmen. Bild 8 zeigt verschiedene Arten des Tauwasseranfalls.



**Bild 8:** Arten des Tauwasseranfalls /Sch06/

Im Fall 1 (Bild 8, a)) ist der vorhandene Wasserdampfpartialdruck kleiner als der Wasserdampf-sättigungsdruck, so dass keine Kondensation auftritt. Im Fall 2 (Bild 8, b)) berührt die Wasserdampf-sättigungslinie die des Wasserdampfpartialdrucks in einem Punkt. In dieser Ebene fällt Tauwasser an. Beim Fall 3 (Bild 8, c)) kann die Linie des Wasserdampfpartialdrucks nur so konstruiert werden, dass die Wasserdampf-sättigungslinie in zwei Punkten berührt wird und dazwischen mit der Linie des Wasserdampfpartialdrucks übereinstimmt. Hier fällt Tauwasser sogar in dem ganzen Bereich  $s_{dz}$  an.

Eine Tauwasserbildung in Bauteilen ist unschädlich, wenn durch Erhöhung des Feuchtegehaltes der Bau- und Dämmstoffe der Wärmeschutz und die Standsicherheit der Bauteile nicht gefährdet werden. So darf die Tauwassermenge  $m_{W,T}$  den Wert von  $1\text{ kg/m}^2$  nicht überschreiten und das sich gebildete Tauwasser muss die Möglichkeit haben, in der Verdunstungsperiode aus dem Bauteil zu gelangen ( $m_{W,V} > m_{W,T}$ ; Bild 8, d)) /DIN01/.

Mit den beiden Gleichungen (1) und (2) kann die Tauwassermenge  $m_{W,T}$  und die Verdunstungsmenge  $m_{W,V}$  bestimmt werden. Die Parameter für die Formeln können aus Bild 8 entnommen werden.

$$m_{w,T} = \frac{t_T}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{P_i - P_{sw1}}{s_{di}} - \frac{P_{sw2} - P_e}{s_{de}} \right) \text{ kg/m}^2 \quad (1)$$

$$m_{w,V} = \frac{t_V}{1,5 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{P_{sw} - P_i}{s_{di} + 0,5 \cdot s_{dz}} + \frac{P_{sw} - P_e}{0,5 \cdot s_{dz} + s_{de}} \right) \text{ kg/m}^2 \quad (2)$$

### 3 ZUSAMMENFASSUNG DES ARBEITSPROGRAMMS

Das Forschungsvorhaben gliederte sich in vier Schwerpunkte: die Bemessung der BIS, die Entwicklung des SVPLB, die Wandherstellung und abschließend die Wandprüfung. Die Wände bestanden jeweils aus zwei Schalen der BIS sowie dem entwickelten SVPLB.

Im Rahmen des Vorhabens waren vier Prüfungen an geschosshohen (2,75 m), 1,0 m breiten Wandstreifen vorgesehen, wovon an zwei Wänden die zentrische Druckfestigkeit und an zwei Wänden die exzentrische Druckfestigkeit geprüft werden sollte. Die Dicke der Wand wurde mit Hilfe von bauphysikalischen Berechnungen zu 0,35 m ermittelt. Die vier Wände sollten ursprünglich im Fertigteilwerk hergestellt werden. Da allerdings bei zwei Wandbetonagen im Fertigteilwerk der SVPLB jeweils sedimentierte, wurden die weiteren Betonagen nicht mehr im Werk, sondern am ibac durchgeführt.

Auch am ibac ergaben sich bei den ersten beiden Betonagen Probleme mit dem SVPLB. In diesen beiden Fällen trat zwar kein Sedimentieren des Betons auf, allerdings war die Stabilität nicht ausreichend, so dass es zu einem Absacken des Betons während der Betonage kam. Trotz dieser Probleme konnten zwei Wände hergestellt werden, die im Alter von 28 Tagen im zentrischen Druckversuch geprüft wurden.

Es folgten Untersuchungen hinsichtlich der Fragestellung, warum der SVPLB keine ausreichende Stabilität aufwies und wie man diesem Phänomen entgegenwirken konnte. Nach einer Umstellung der Mischung (Austausch der Zementart) konnte ein stabiler SVPLB erzielt werden, so dass zwei weitere Wände hergestellt wurden. Diese zwei Wände wurden zum Abschluss des Projekts im Alter von 28 Tagen im zentrischen Druckversuch geprüft. Aufgrund der im Vorfeld aufgetretenen Probleme mit dem SVPLB wurde auf eine Durchführung von exzentrischen Druckversuchen verzichtet.

Von allen vier Wänden, die am ibac hergestellt wurden, wurden nach den Wandprüfungen, so weit möglich, Proben des SVPLB entnommen. An diesen wurden Druck- sowie Haftzugfestigkeiten bestimmt. Weitere Kennwerte wie E-Modul oder Trockenrohddichte wurden an parallel zur Wandbetonage hergestellten Probekörpern ermittelt.

## **4 BEMESSUNG DER BAUTEILINTEGRIERTEN SCHALUNG**

### **4.1 Allgemeines**

Wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, bildeten zwei bereits abgeschlossene Forschungsvorhaben die Grundlage für die Bemessung und Herstellung der BIS. Aufgabe der Elemente ist es, die während der Betonage infolge des Frischbetondrucks auftretenden Biegezugspannungen auf der Außenseite und die Druckspannungen auf der Innenseite aufzunehmen. Bild 3 (Abschnitt 2.3) zeigt eine Prinzipskizze der Elementwand bei der Herstellung.

In einem ersten Schritt wurden drei Feinbetonmischungen, eine ohne und zwei mit Kurzfasern aus AR-Glas, auf der Basis der bereits vorhandenen Erkenntnisse entwickelt. Im nächsten Arbeitsschritt erfolgte die Bemessung der BIS. Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, wurden zwei Querschnittsvarianten untersucht, die sich in der Stegbewehrung und den Querschnittsabmessungen des Stegs unterscheiden. Um einen bauphysikalisch und statisch günstigen Querschnitt der BIS-Elemente zu finden, der mit vertretbarem Aufwand bei der Herstellung zu realisieren ist, wurden zunächst Versuche zur Querkrafttragfähigkeit an Schalungselementen mit den geringeren Querschnittsabmessungen der Variante 1 ohne die flächige Stegbewehrung durchgeführt. Dieser Querschnitt wurde zunächst mit der entwickelten Feinbetonmischung ohne Kurzfasern betoniert. Anschließend wurden für die Betonagen der Stege die beiden mit Kurzfasern modifizierten Feinbetonmischungen verwendet. An diesen Probekörpern sollte geprüft werden, ob die Kurzfasern als zusätzliche Bewehrung einen Beitrag zur Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit leisten. In einer Parameterstudie wurde jeweils die maximale Schubtragfähigkeit der Plattenbalken bestimmt.

Mit den Erkenntnissen aus diesen Untersuchungen wurden im Anschluss Berechnungen zum Tragverhalten der BIS durchgeführt. Hierbei wurden sowohl die Stegabmessungen als auch der Stegabstand variiert. An zwei ausgewählten Querschnitten wurden im Anschluss Biegezugversuche im Labormaßstab durchgeführt.

Abschließend wurden die BIS-Elemente mit dem endgültigen Querschnitt im Fertigteilwerk hergestellt. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Arbeitsschritte näher erläutert.

## **4.2 Feinbeton**

### **4.2.1 Mischungsentwicklung**

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Feinbetonmischungen für die Herstellung der Schalungselemente aus Textilbeton auf der Basis der Standardmischung PZ-0899-01 des SFB 532 /SFB08/ entwickelt. Als Ausgangsstoffe wurden ein CEM II A-LL 52,5 R gemäß DIN EN 197-1:2004-08 /DIN04/ sowie eine Flugasche gemäß DIN EN 450-1:2008-05 /DIN08b/ verwendet. Als drittes Bindemittel wurde Silikastaub in Form einer Suspension hinzugefügt. Bei den verwendeten Gesteinskörnungen handelte es sich um ein Kalksteinmehl sowie eine Quarzgesteinskörnung der Fraktion 0,1 bis 1,0 mm. Der Zement sowie die beiden Gesteinskörnungen waren standardmäßig im Fertigteilwerk vorhanden. Flugasche und Silikasuspension mussten getrennt hinzugegeben werden. Beim Fließmittel handelte es sich um ein Produkt auf Polycarboxylat-Ether-Basis (PCE), das auch in der Praxis beim SVB zum Einsatz kommt.

Für die Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit der BIS-Elemente wurden auch zwei Feinbetonmischungen mit Kurzfasern aus AR-Glas entwickelt. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben wurden die Kurzfasern als zusätzliche Bewehrung im Steg eingesetzt. Zum einen wurden wasserdispersible AR-Glasfasern mit einer Länge von 3 mm und zum anderen integrale AR-Glasfasern mit einer Länge von 6 mm verwendet. Durch die Zugabe der Kurzfasern wird die Fließfähigkeit des Feinbetons deutlich herabgesetzt. Um die Betonierbarkeit der Stege mit den Kurzfasermischungen sicherzustellen, sollte ein Ausbreitmaß von ca. 170 mm (Mörtelmaßstab /DIN07/) erreicht werden. Aufgrund einer schlechteren Verarbeitbarkeit konnte von den wasserdispersiblen AR-Glasfasern nur ein Anteil von 1,5 Vol.-% der Feinbetonmischung hinzugegeben werden. Die integralen AR-Glasfasern wurden mit einem Anteil von 2,25 Vol.-% der Feinbetonmischung hinzugefügt. Trotz des höheren Kurzfasergehaltes wurde zum Erreichen einer ähnlichen Konsistenz ein niedriger Fließmittelan-spruch festgestellt. Die Zusammensetzung der drei Feinbetonmischungen ist in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1:** Zusammensetzung der drei Feinbetonmischungen

| Ausgangsstoffe                               | Einheit           | Mischung 1 | Mischung 2 | Mischung 3 |
|--|-------------------|------------|------------|------------|
| 1  | 2                 | 3          | 4          | 5          |
| CEM II A-LL 52,5 R (z)                       | kg/m <sup>3</sup> | 490        |            |            |
| Flugasche HKV (f)                            |                   | 175        |            |            |
| Silikastaub (s)                              |                   | 35         |            |            |
| Kalksteinmehl 0-0,125 mm                     |                   | 471        | 457        | 449        |
| Quarzitische Gesteinskörnung 0,1-1,0 mm      |                   | 765        | 741        | 729        |
| Wasser                                       |                   | 265        | 265        | 265        |
| Fließmittel                                  | M.-% vom Zement   | 1,57       | 1,84       | 1,62       |
| Wasserdispersible Kurzfasern (AR-Glas, 3 mm) | Vol.-%            | -          | 1,5        | -          |
| Integrale Kurzfasern (AR-Glas, 6 mm)         |                   | -          | -          | 2,25       |
| w/z  | -                 | 0,54       |            |            |
| w/z <sub>eq</sub> <sup>1)</sup>              |                   | 0,45       |            |            |

1)  $w/z_{eq} = w/(z+0,4 \cdot f+s)$

#### 4.2.2 Frischbetonkennwerte

Die Frischbetonrohddichte wurde für alle Feinbetone nach DIN EN 1015-6:2007-05 /DIN07a/ bestimmt. Die Ermittlung des Luftgehalts erfolgte nach DIN EN 1015-7:1998-12 /DIN98/. Das Setzfließmaß von Mischung 1 (Feinbeton ohne Kurzfasern) wurde im Mörtelmaßstab gemäß /Bro06/ bestimmt. Für die beiden Feinbetone mit Kurzfasern wurde das Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3:2007-05 /DIN07/ ermittelt. Die Prüfwerte sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Frischbetoneigenschaften der drei Feinbetonmischungen

| Kennwert     | Einheit           | Mischung 1 | Mischung 2 | Mischung 3 |
|--------------|-------------------|------------|------------|------------|
| 1            | 2                 | 3          | 4          | 5          |
| Rohddichte   | kg/m <sup>3</sup> | 2180       | 2198       | 2183       |
| Luftgehalt   | Vol.-%            | 2,45       | 2,9        | 2,5        |
| Setzfließmaß | mm                | 271        | -          | -          |
| Ausbreitmaß  |                   | -          | 179        | 167        |

## 4.2.3 Festbetonkennwerte

### 4.2.3.1 Allgemeines

Die Druck- und Biegezugfestigkeiten wurden für alle drei Feinbetonmischungen ermittelt. Weitere Kennwerte bzw. Festbetoneigenschaften wie der statische E-Modul, Kriechen und Schwinden wurden nur für Mischung 1 (Feinbeton ohne Kurzfasern) bestimmt, da durch den Einsatz von Kurzfasern hier keine Änderungen zu erwarten waren. Das Startalter der Schwind- und Kriechuntersuchungen betrug 7 Tage. Das frühe Prüfalter wurde gewählt, um ein möglicherweise sehr junges Einbaualter der BIS-Elemente zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

### 4.2.3.2 Druck- und Biegezugfestigkeit

Die Druck- und Biegezugfestigkeiten wurden für alle drei Feinbetonmischungen nach DIN EN 196-1:2005-05 /DIN05/ an Normprismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> geprüft. Für Mischung 1 (ohne Kurzfasern) wurden die Kennwerte im Alter von 1, 2, 3, 7 und 29 Tagen ermittelt. Das Prüfalter der Mischungen 2 und 3 betrug 7 Tage. Die Kennwerte der Feinbetone können Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Festigkeiten und Rohdichten der drei Feinbetonmischungen

| Kennwert           |      | Einheit           | Mischung 1 | Mischung 2 | Mischung 3 |
|--------------------|------|-------------------|------------|------------|------------|
| 1                  | 2    | 3                 | 4          | 5          | 6          |
| Druckfestigkeit    | 1 d  | N/mm <sup>2</sup> | 26,0       | -          | -          |
|                    | 2 d  |                   | 39,1       |            |            |
|                    | 3 d  |                   | 38,0       |            |            |
|                    | 7 d  |                   | 52,1       | 64,6       | 63,0       |
|                    | 29 d |                   | 62,5       |            |            |
| Biegezugfestigkeit | 1 d  | N/mm <sup>2</sup> | 5,8        | -          | -          |
|                    | 2 d  |                   | 4,9        |            |            |
|                    | 3 d  |                   | 6,3        |            |            |
|                    | 7 d  |                   | 8,2        | 10,9       | 14,8       |
|                    | 29 d |                   | 9,9        | -          | -          |
| Rohdichte          | 7 d  | kg/m <sup>3</sup> | 2133       | 2224       | 2228       |
|                    | 29 d |                   | 2129       | -          | -          |

Die Druckfestigkeiten sowie die Biegezugfestigkeiten der Mischung 1 liegen im Bereich üblicher Feinbetone. Die Zugabe der Kurzfasern aus AR-Glas führt zu einer erhöhten Biegezugfestigkeit im Vergleich zur Feinbetonmischung ohne Kurzfasern. Ob die Fasern auch einen Beitrag zur Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit leisten können, wird in Abschnitt 4.3 näher betrachtet.

#### 4.2.3.3 Statischer E-Modul

Für die Prüfung des statischen E-Moduls nach DIN 1048-5:1991-06 /DIN91/ wurden Zylinder mit einem Durchmesser  $d = 50$  mm und einer Höhe  $h = 100$  mm verwendet. Die obere Prüfspannung betrug rd.  $1/3$  der Druckfestigkeit. Der Versuch wurde gemäß Belastungsdiagramm nach DIN 1048-5 /DIN91/ durchgeführt. Die Dehnungen wurden über 3 Induktivaufnehmer (Messlänge 50 mm), die im Winkelabstand von  $120^\circ$  angebracht wurden, erfasst. Der statische E-Modul betrug nach 7 Tagen im Mittel  $28.700$  N/mm<sup>2</sup>, nach 29 Tagen im Mittel  $31.300$  N/mm<sup>2</sup>. Diese Werte liegen im Bereich üblicher Feinbetone.

#### 4.2.3.4 Schwinden und Kriechen

Das Schwindmaß wurde an Zylindern ( $d = 50$  mm,  $h = 100$  mm) bis zum Alter von 365 Tagen in Anlehnung an das DAfStb-Heft 422 /Bun91/ bestimmt. Die Nullmessung erfolgte im Alter von 7 Tagen nach einer Lagerung von 6 Tagen im Normklima ( $20$  °C/65 % rel. F.).

Die Längenänderung wurde mit drei Messuhren (Genauigkeit:  $1/1000$  mm) erfasst. Die Ablesungen erfolgten nach 1, 2, 3, 4, 7, 15, 28, 57, 91, 191 und 365 Tagen. Das Schwindmaß  $\varepsilon_{s,t}$  errechnet sich zu:

$$\varepsilon_{s,t} = (l_t - l_0)/l_0 \quad (3)$$

mit:

- $l_t$ : Länge der Messstrecke zum Zeitpunkt  $t$
- $l_0$ : Länge der Messstrecke zu Beginn der Prüfung

Der zeitliche Verlauf des Schwindmaßes ist in Tabelle 4 enthalten. Die graphische Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Schwindmaßes zeigt Bild 9.

Zur Abschätzung der Endkriechzahl wurden Kriechversuche in Anlehnung an das DAfStb-Heft 422 /Bun91/ ebenfalls an Zylindern ( $d = 50 \text{ mm}$ ,  $h = 100 \text{ mm}$ ) durchgeführt. Analog zu den Schwindversuchen wurden die Prüfkörper im Alter von 7 Tagen in die Prüfeinrichtung eingebaut.

Die Nullmessung erfolgte im unbelasteten Zustand. Die Kriechspannung wurde zu  $1/3$  der Druckfestigkeit nach 7 Tagen festgelegt. Nach dem Einbau des Probekörpers in die Prüfeinrichtung wurden ca. 20 % der Kriechspannung aufgebracht. Die Längenänderung wurde mit drei Messuhren (Genauigkeit:  $1/1000 \text{ mm}$ ), die im Winkelabstand von  $120^\circ$  angebracht wurden, erfasst. Da die Abweichungen der einzelnen Längenänderungen vom Mittelwert weniger als 25 % betragen, wurde anschließend innerhalb von 2 Minuten die endgültige Kriechspannung aufgebracht. Die Ablesungen der Kriechverformung erfolgten nach 1, 2, 3, 4, 7, 15, 28, 57, 91, 191 und 365 Tagen.

Das Kriechmaß  $\varepsilon_{cc}$  ergibt sich nach Gleichung (4) aus der Gesamtverformung  $\varepsilon_c$ , dem Schwindmaß  $\varepsilon_{cs}$  und der elastischen Verformung  $\varepsilon_{ci}$ :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c - (\varepsilon_{cs} + \varepsilon_{ci}) \quad (4)$$

mit:

$\varepsilon_c$ : Gesamtverformung im Kriechversuch unter konstanter Kriechspannung  
 $\sigma_{creep} = f_d/3$  zum Zeitpunkt  $t$  nach Belastungsbeginn

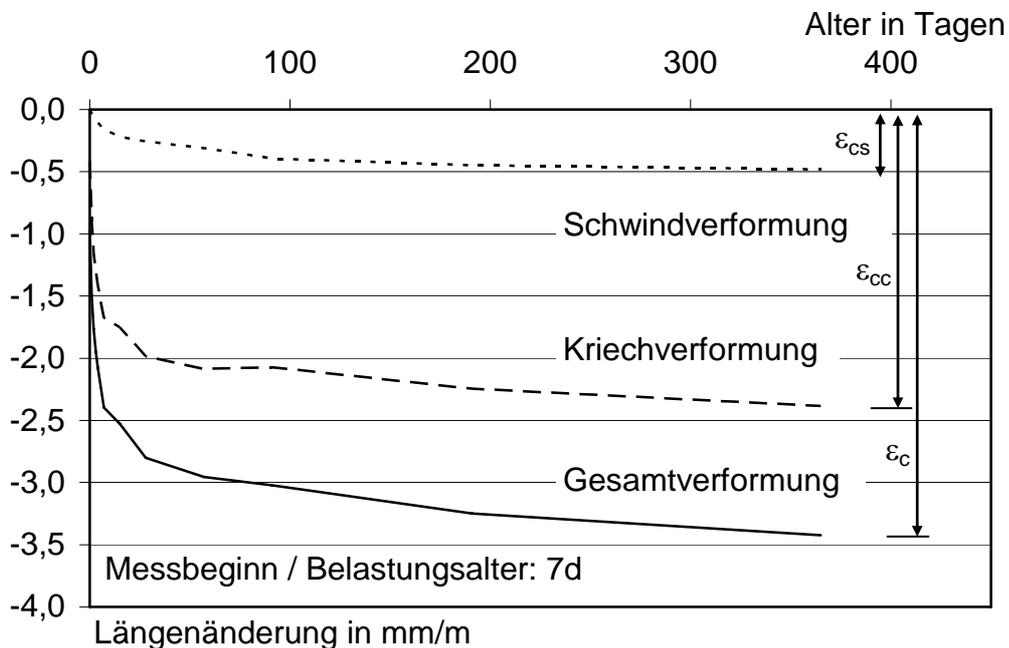
$\varepsilon_{cs}$ : Schwindmaß, das während des Kriechversuches an Schwindkörpern nachgemessen wurde

$\varepsilon_{ci}$ : Elastische Verformung, die sich aus der Kriechspannung ( $f_d/3$ ) und dem E-Modul zu Beginn des Kriechversuches ergibt

Die Kriechzahl  $\varphi$  berechnet sich zu:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{ci}} \quad (5)$$

Die Kriechverformung sowie die Kriechzahl sind ebenfalls in Tabelle 4 angegeben. Der graphische Verlauf der Kriechverformung ist in Bild 9 dargestellt.



**Bild 9:** Formänderung infolge Kriechen und Schwinden

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Schwind- und Kriechmessungen an Zylindern (Ø 50 mm, h = 100 mm) in Anlehnung an das DAfStb-Heft 422 /Bun91/

| Prüfalter <sup>1)</sup> | Gesamtverformung<br>ε <sub>c</sub> | Schwindverformung<br>ε <sub>cs</sub> | Kriechverformung <sup>2)</sup><br>ε <sub>cc</sub> | Kriechzahl <sup>3)</sup><br>φ |
|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------|
| d                       | mm/m                               |                                      |   | -                             |
| 1                       | 2                                  | 3                                    | 4   | 5                             |
| 1                       | 1,494                              | 0,035                                | 0,903   | 1,62                          |
| 2                       | 1,763                              | 0,052                                | 1,155   | 2,08                          |
| 3                       | 1,949                              | 0,087                                | 1,305   | 2,35                          |
| 4                       | 2,077                              | 0,106                                | 1,415   | 2,54                          |
| 7                       | 2,398                              | 0,163                                | 1,678   | 3,02                          |
| 28                      | 2,800                              | 0,258                                | 1,986   | 3,57                          |
| 57                      | 2,956                              | 0,312                                | 2,087   | 3,75                          |
| 91                      | 3,023                              | 0,393                                | 2,074   | 3,73                          |
| 191                     | 3,249                              | 0,446                                | 2,246   | 4,04                          |
| 365                     | 3,424                              | 0,482                                | 2,386   | 4,29                          |

- 1) Kriechdauer nach Belastungsbeginn (7 d)
- 2)  $\epsilon_{cc} = \epsilon_c - (\epsilon_{cs} + \epsilon_{ci})$ , Kriechspannung  $\sigma_c = 16,0 \text{ N/mm}^2$ , elast. Verformung  $\epsilon_{ci} = 0,556 \text{ mm/m}$
- 3)  $\phi = \epsilon_{cc} / \epsilon_{ci}$

Die Schwindverformung ist im Vergleich zu anderen Feinbetonen gering. Im Gegensatz dazu ist die Kriechzahl mit einem Wert von 4,29 vergleichsweise hoch. Dies ist auf das Belastungsalter von 7 Tagen zurückzuführen.

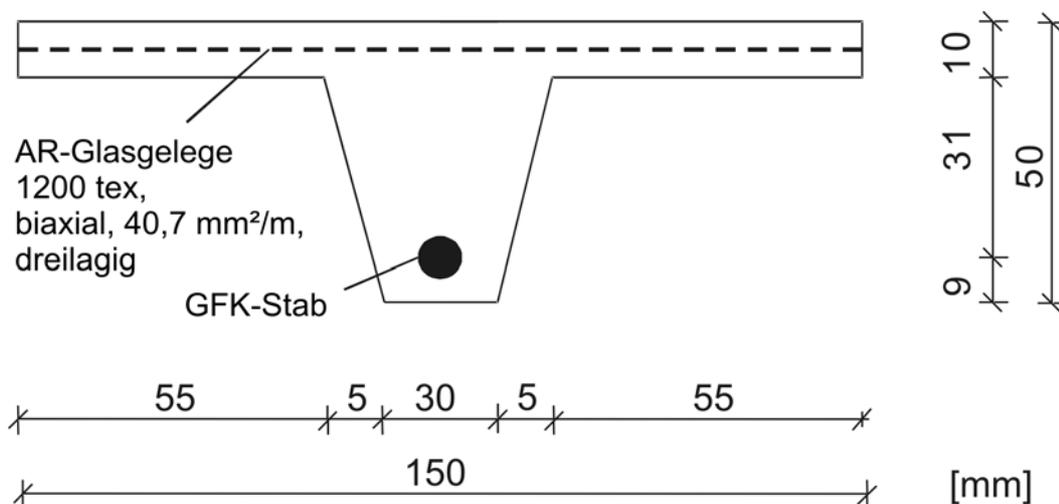
#### 4.2.3.5 Wärmeleitfähigkeit

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte gemäß DIN 52612-1:1979-09 /DIN79/ mit dem Plattengerät. Dazu wurden 2 Platten aus einem Würfel mit 200 mm Kantenlänge herausgesägt und vor dem Versuch bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Die Untersuchungen ergaben eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 1,397 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  bei einer Trockenrohdichte des Betons von  $2062 \text{ kg/m}^3$ .

### 4.3 Vorversuche zum Querkrafttragverhalten

Im Rahmen der Vorversuche wurde die Querkrafttragfähigkeit von Stegplatten geprüft. Der Querschnitt der Platten ist in Bild 10 dargestellt. Die Abmessungen entsprechen der Variante 1 aus dem AiF-Vorhaben zur seriellen Einzelfertigung /Bra07/. Da die Herstellung der flächigen Stegbewehrung (Bild 6, Seite 8) sehr aufwändig ist, wurde diese nicht ausgeführt. Daher wurde zunächst an 4 Probekörpern die vorhandene Querkrafttragfähigkeit des Stegs ohne flächige Stegbewehrung geprüft.

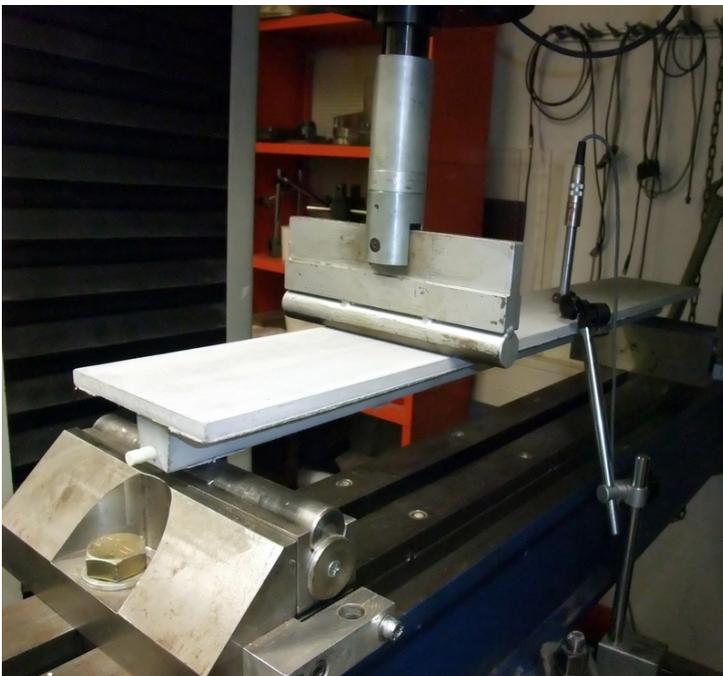


**Bild 10:** Querschnitt der Probekörper für die Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit

Für die Betonage des Stegs wurden bei jeweils 4 weiteren Probekörpern die beiden mit Kurzfasern modifizierten Feinbetonmischungen verwendet. An diesen Probekörpern wurde der Beitrag der Kurzfasern zur Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit des Stegs getestet.

Die Stegplatten mit dem in Bild 10 dargestellten Querschnitt wurden mit einer Länge von  $l = 1000$  mm hergestellt. In Tabelle 1 sind die drei verwendeten Feinbetonmischungen dargestellt. Die Platten wurden mit 3 Lagen eines bidirektionalen 2D-AR-Glastextils (1200 tex,  $40,7 \text{ mm}^2/\text{m}$ ) bewehrt. Der verwendete GFK-Stab weist einen Querschnitt von  $50,3 \text{ mm}^2$  auf. Die Vorgehensweise bei der Herstellung entspricht der in Abschnitt 2.3 beschriebenen. Die Probekörper wurden bis zur Prüfung im Alter von 7 Tagen im Feuchtraum bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und 65 % r. F. gelagert.

Der Prüfaufbau zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit (Bild 11) gleicht dem eines 3-Punkt-Biegezugversuchs, mit dem Unterschied, dass die Lasteinleitung so nah an eines der beiden Auflager verlegt wird, dass es zur Ausbildung eines eindeutigen Schubrisses kommt.



**Bild 11:** Prüfaufbau der Versuche zur Querkrafttragfähigkeit

Die Stützweite betrug bei allen Versuchen 900 mm. Die Prüfungen wurden weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von  $0,2 \text{ mm}/\text{min}$  durchgeführt.

Bei allen Versuchen kam es erst zu einer deutlichen Ausbildung eines Schubrisses, wenn die Last 25 mm vom Auflager entfernt eingeleitet wurde. Bild 12 zeigt 2 Probekörper, an denen ein Schubriss deutlich zu erkennen ist.

Sobald ein Schubriss entstanden war, konnte bei einer weiteren Laststeigerung eine Verlängerung in Richtung Lasteinleitung sowie eine Öffnung dieses Risses im Steg beobachtet werden, bis der Steg auf Schub versagte. Die Erstrisslasten (Schubriss) sowie die Höchstlasten der Prüfungen sind in Tabelle 5 dargestellt.



a)



b)

Bild 12: Schubrisse in 2 Stegplatten

Die Erstrisslasten sowie die Höchstlasten je Prüfserie unterliegen einer breiten Streuung. Abgesehen von dieser Streuung kann festgestellt werden, dass eine Zugabe von integralen AR-Glasfasern keine Verbesserung des Querkrafttragverhaltens im Vergleich zur Prüfserie, die ohne Kurzfasern hergestellt wurde, bewirkt. Die Zugabe von wasserdispersiblen AR-Glasfasern führt zu einer deutlichen Steigerung sowohl der Erstrisslasten als auch der Höchstlasten im Vergleich zu den beiden anderen Prüfserien.

Mit Kenntnis der Querkrafttragfähigkeit eines Stegstreifens wurden die im Folgenden beschriebenen statischen Berechnungen mit Querschnittsvariationen durchgeführt.

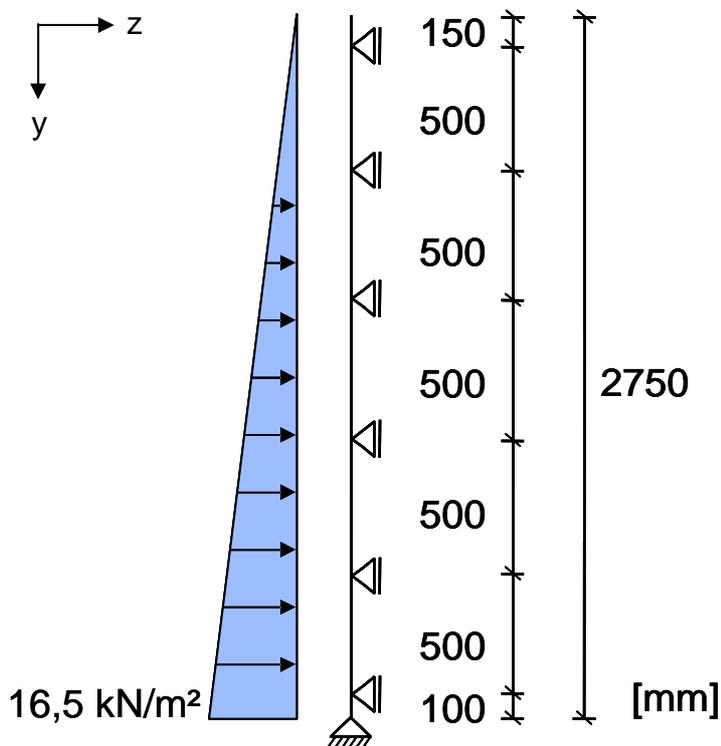
**Tabelle 5:** Erstriss- und Höchstlasten der Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an Stegplatten

| Probekörper  |   | Erstrisslast | Höchstlast |
|--|---|--------------|------------|
| -  |   | kN           |            |
| 1  | 2 | 3            | 4          |
| Feinbeton ohne Kurzfasern                            | 1 | 8,3          | 10,3       |
|  | 2 | 8,8          | 15,5       |
|  | 3 | 10,5         | 13,5       |
|  | 4 | 11,8         | 17,1       |
| Feinbeton mit wasserdispersiblen AR-Glasfasern, 3 mm | 1 | 14,8         | 16,4       |
|  | 2 | 13,8         | 21,4       |
|  | 3 | 14,5         | 19,1       |
|  | 4 | 9,1          | 21,8       |
| Feinbeton mit integralen AR-Glasfasern, 6 mm         | 1 | 5,0          | 9,1        |
|  | 2 | 10,5         | 12,6       |
|  | 3 | 8,0          | 12,2       |
|  | 4 | 7,5          | 9,4        |

#### 4.4 Berechnungen der BIS

Die Berechnungen zur Konzeption der BIS wurden auf zweierlei Weise geführt. Zum einen wurde, basierend auf den Erkenntnissen aus dem AiF-Vorhaben zur seriellen Einzelfertigung /Bra07/, ein Element unter Anwendung der Plattenbalkentheorie statisch berechnet. Aus diesem Vorhaben wurde ebenfalls das statische System eines BIS-Elements übernommen. Zum anderen wurde mit Hilfe des FEM-Programms „InfoGraph“ eine FEM-Berechnung eines Elements durchgeführt. Diese Berechnungen wurden ausgeführt, um zu prüfen, ob die textilbewehrte Schalung auf diese Weise abgebildet und eine mögliche Plattentragwirkung festgestellt werden kann. Weiterhin sollte die Anzahl der im Anschluss durchzuführenden Versuche möglichst gering gehalten werden. Die beiden Berechnungsarten werden im Folgenden für jede Querschnittsvariation parallel betrachtet.

Es wurden BIS-Elemente in Form von Stegplatten mit einer Breite von 1,00 m und einer Höhe von 2,75 m betrachtet. Die Bewehrung der Platte besteht aus 3 Lagen eines 2D-AR-Glastextils (1200 tex, 40,7 mm<sup>2</sup>/m) mit einem Bewehrungsgehalt von insgesamt 122 mm<sup>2</sup>/m. Die mit jeweils einem GFK-Stab bewehrten Stege verlaufen innen in vertikaler Richtung. Der Querschnitt eines GFK-Stabs beträgt 50,3 mm<sup>2</sup>. Das Schalelement wird in Abständen von 0,5 m rückwärtig durch Querjoche unterstützt.



**Bild 13:** Statisches System des BIS-Elements mit Belastung aus Frischbetondruck

Aufgrund dieser Randbedingungen ergibt sich als statisches System für die Bemessung des Schalelements ein Sechsfeldträger mit einseitigem Kragarm (s. Bild 13). Als Einwirkung wird der Frischbetondruck beim Betoniervorgang angesetzt. Im vorliegenden Fall ergibt sich für den SVPLB unter Annahme eines hydrostatischen Frischbetondrucks ein Maximalwert von 16,5 kN/m<sup>2</sup>.

**Tabelle 6:** Querschnittsvarianten für die statischen Berechnungen

| Querschnitt | Stegbreite | Stegabstand | Anzahl der Stege |
|-------------|------------|-------------|------------------|
| -           | mm         |             | -                |
| 1           | 2          | 3           | 4                |
| 1           | 50         | 150         | 7                |
| 2           |            | 250         | 4                |
| 3           |            | 300         | 4                |
| 4           | 34         | 150         | 7                |

Im Vorfeld der statischen Untersuchungen wurden vier verschiedene Querschnittsvarianten gefunden, die für eine nähere statische Betrachtung in Frage kamen. In Tabelle 6 sind alle vier Querschnitte im Überblick und in Bild 14 ist Querschnitt 2 beispielhaft dargestellt.

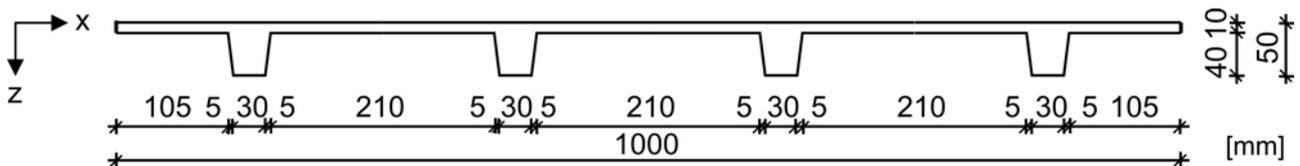


Bild 14: Querschnitt 2

Die Berechnungen nach Plattenbalkentheorie wurden nach DIN 1045-1:2008-08 /DIN08/ durchgeführt. Das BIS-Element wurde als 1 Stab mit einer Länge von 2,75 m und den Abmessungen des jeweiligen Querschnitts abgebildet. Für die Berechnungen mit InfoGraph konnten direkt die vollständigen BIS-Elemente mit dem jeweiligen Querschnitt als Platte abgebildet werden. Um die Platten- und Stegbewehrung richtig ansetzen zu können, mussten die Platte und der Steg zunächst als getrennte Querschnitte eingegeben werden. Um das BIS-Element als einen Querschnitt berechnen zu können, wurden Platte und Steg dann gekoppelt. So konnte eine Plattentragwirkung erzeugt werden, die das Gesamtsystem berücksichtigt. Als Teilsicherheitsbeiwert wurde generell  $\gamma = 1,5$  angesetzt.

In den folgenden Tabellen 7 und 8 werden die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Da bei der Verfüllung der Schalelemente sowohl Stütz- als auch Feldmomente auftreten, wurden Berechnungen zur Ermittlung des aufnehmbaren negativen (Steg in der Zugzone) als auch des aufnehmbaren positiven (Platte in der Zugzone) Moments durchgeführt. Aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben ist bekannt, dass die Platte infolge Biegung und der Steg infolge Querkraft versagt. Aus diesem Grund zeigt Tabelle 7 die berechneten Werte für die Biegebemessung der Platte; Tabelle 8 gibt die entsprechenden Werte für die Querkraftbemessung des Stegs wieder.

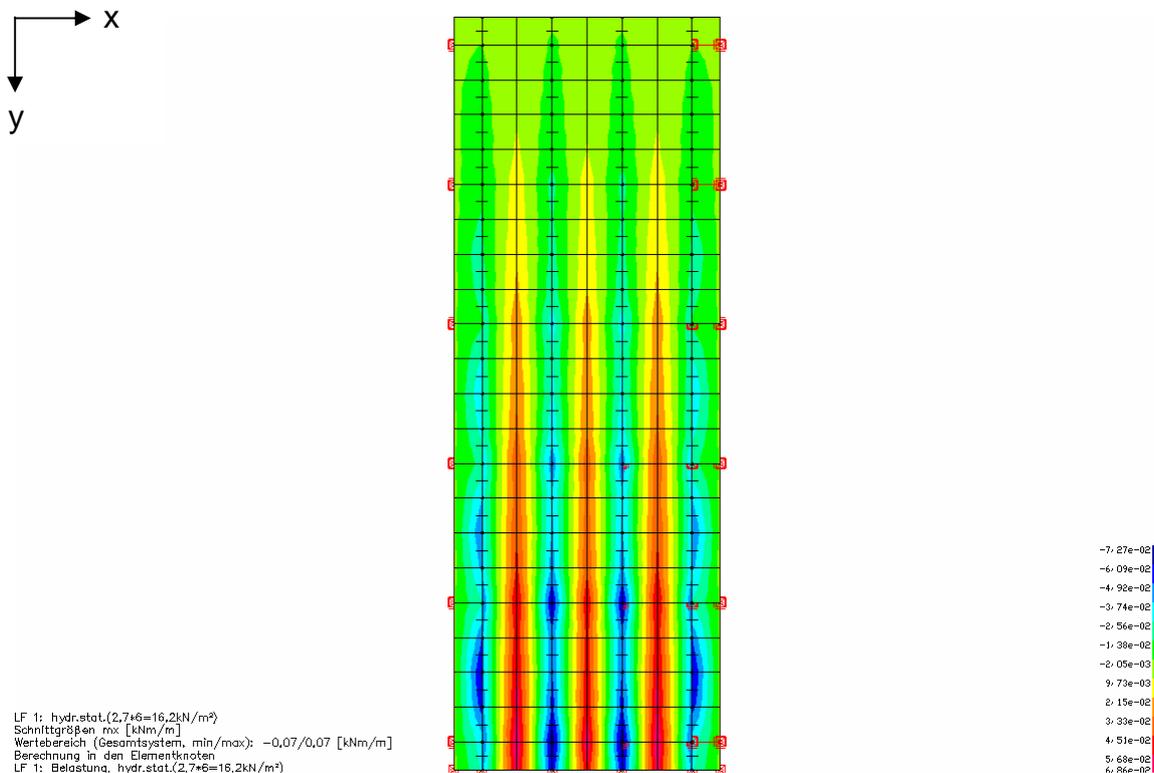
**Tabelle 7:** Ergebnisse der Biegebemessung der Platte (nur FE-Berechnung)

| Querschnitt   | Plattenrichtung | Einwirkung aus FE-Berechnung | berechneter Widerstand des Querschnitts | Ausnutzungsgrad bezogen auf FE-Berechnung |  |
|---------------|-----------------|------------------------------|---|---|--|
| -             | -               | kNm/m                        |   | %   |  |
| 1             | 2               | 3                            | 4                                       | 5   |  |
| 1<br>(50/150) | x               | $M_{Ed, Stütz} = -0,045$     | $M_{Rd} = 0,126$                        | 36  |  |
|               | y               | $M_{Ed, Stütz} = -0,030$     |   | 24  |  |
|               | x               | $M_{Ed, Feld} = 0,030$       |   | 24  |  |
|               | y               | $M_{Ed, Feld} = 0,015$       |   | 12  |  |
| 2<br>(50/250) | x               | $M_{Ed, Stütz} = -0,096$     | $M_{Rd} = 0,126$                        | 76  |  |
|               | y               | $M_{Ed, Stütz} = -0,057$     |   | 45  |  |
|               | x               | $M_{Ed, Feld} = 0,105$       |   | 83  |  |
|               | y               | $M_{Ed, Feld} = 0,030$       |   | 24  |  |
| 3<br>(50/300) | x               | $M_{Ed, Stütz} = -0,138$     | $M_{Rd} = 0,126$                        | 109                                       |  |
|               | y               | $M_{Ed, Stütz} = -0,129$     |   | 102                                       |  |
|               | x               | $M_{Ed, Feld} = 0,090$       |   | 71  |  |
|               | y               | $M_{Ed, Feld} = 0,045$       |   | 36  |  |
| 4<br>(34/150) | x               | $M_{Ed, Stütz} = -0,060$     | $M_{Rd} = 0,126$                        | 48  |  |
|               | y               | $M_{Ed, Stütz} = -0,075$     |   | 60  |  |
|               | x               | $M_{Ed, Feld} = 0,045$       |   | 36  |  |
|               | y               | $M_{Ed, Feld} = 0,030$       |   | 24  |  |

**Tabelle 8:** Ergebnisse der Querkraftbemessung des Stags

| Querschnitt   | Einwirkung nach Plattenbalkentheorie | Einwirkung aus FE-Berechnung | berechneter Widerstand des Querschnitts | Ausnutzungsgrad bezogen auf |    |
|---------------|--------------------------------------|------------------------------|---|-----------------------------|----|
|               |                                      |                              |   | Plattenbalkentheorie        | FE |
| -             | kNm                                  |                              |   | %                           |    |
| 1             | 2                                    | 3                            | 4                                       | 5                           | 6  |
| 1<br>(50/150) | $V_{Ed} = 0,81$                      | $V_{Ed} = 0,77$              | $V_{Rd, ct} = 1,35$                     | 60                          | 57 |
| 2<br>(50/250) | $V_{Ed} = 1,35$                      | $V_{Ed} = 0,45$              | $V_{Rd, ct} = 1,35$                     | 100                         | 33 |
| 3<br>(50/300) | $V_{Ed} = 1,62$                      | $V_{Ed} = 1,31$              | $V_{Rd, ct} = 1,35$                     | 120                         | 97 |
| 4<br>(34/150) | $V_{Ed} = 0,81$                      | $V_{Ed} = 0,60$              | $V_{Rd, ct} = 0,823$                    | 98                          | 73 |

Exemplarisch ist in Bild 15 die Momentenverteilung der Biegebemessung für Querschnitt 2 in x-Richtung dargestellt.



**Bild 15:** Momentenverteilung der Biegebemessung für Querschnitt 2 in x-Richtung

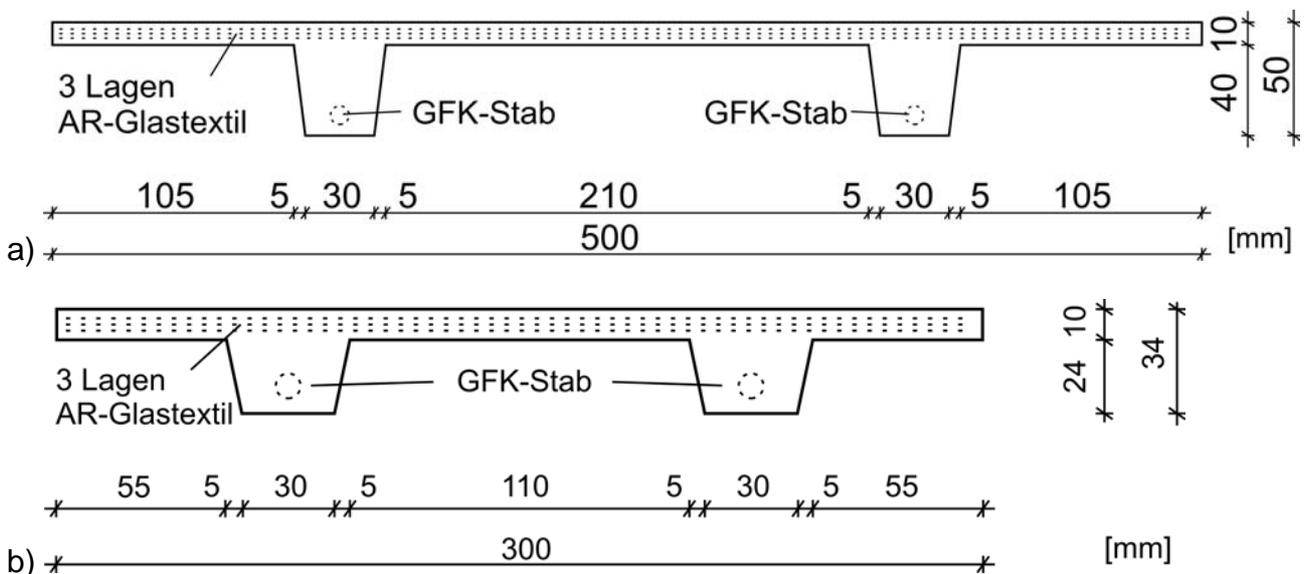
Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass Querschnitt 3 die Lasten infolge Querkraft im Bereich des Steges nicht aufnehmen kann (s. Tabelle 8). Der Ausnutzungsgrad liegt nach Plattenbalkentheorie bei 120 % und nach FE-Berechnung bei 97 %. Daher schied dieser Querschnitt für die weitere Betrachtung aus.

Die drei weiteren Querschnitte erfüllen die Anforderungen, wenn auch der Ausnutzungsgrad nach Plattenbalkentheorie der Querschnitte 2 und 4 im Rahmen der Querkraftbemessung des Steges bei 100 % bzw. 98 % liegt. Die Ausnutzung nach FE-Berechnung liegt allerdings nur bei 33 % bzw. 73 %. Die große Diskrepanz der beiden Berechnungsarten ist vermutlich darin begründet, dass nach Plattenbalkentheorie die Plattenwirkung der BIS-Elemente nicht berücksichtigt wird.

Die Berechnungen zeigen, dass die Ausnutzung der beiden Querschnitte infolge der Belastung aus dem Frischbetondruck sehr hoch und somit wirtschaftlich ist. Querschnitt 1 scheint überdimensioniert zu sein, da der Ausnutzungsgrad geringer ist. Aus diesem Grund wurden die nachfolgenden Plattenversuche unter Verwendung der Querschnitte 2 und 4 durchgeführt.

#### 4.5 Versuche zum Tragverhalten von $\pi$ -Platten

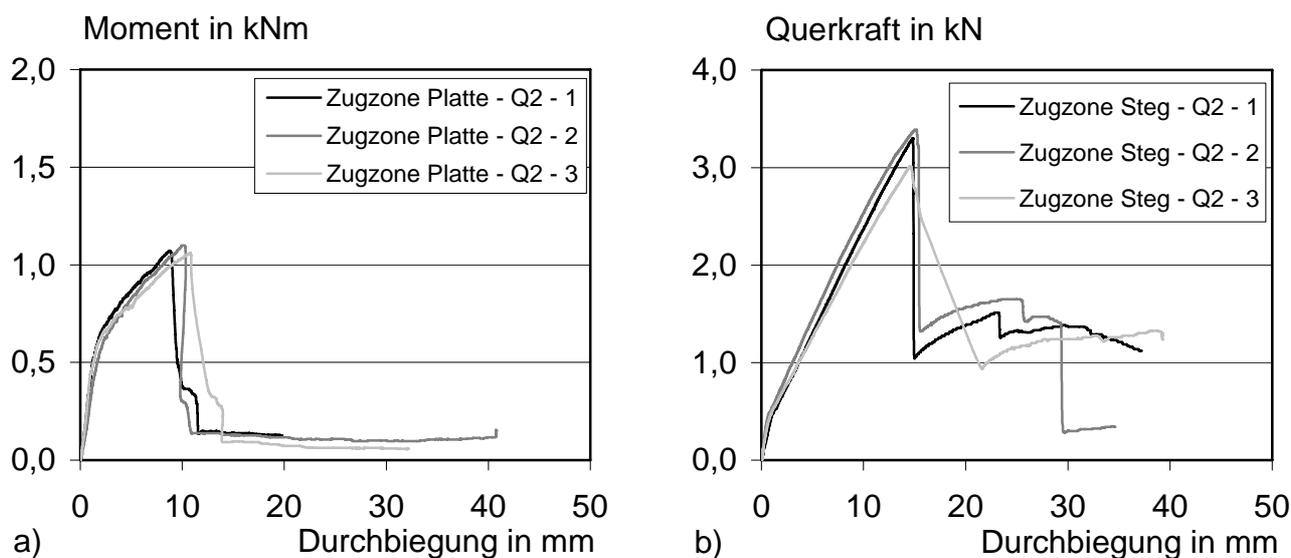
Im Rahmen der Versuche wurden  $\pi$ -Platten mit den Querschnitten 2 und 4 gemäß Tabelle 6 im 3-Punkt-Biegezugversuch geprüft. Da bei der Verfüllung der Schalelemente Feld- und Stützmente auftreten, wurden sowohl Versuche zur Ermittlung des aufnehmbaren positiven (Platte in der Zugzone) als auch des aufnehmbaren negativen (Steg in der Zugzone) Moments durchgeführt. Bei der Prüfung des negativen Moments sollte weiterhin festgestellt werden, ob die Platten infolge Biegung oder infolge Querkraft versagen würden. Den Berechnungen zur Folge müsste ein Querkraftversagen am Steg auftreten. Es wurden insgesamt 12 Platten hergestellt, jeweils 6 pro Querschnitt. Die Querschnitte der Platten sind in Bild 16 dargestellt.



**Bild 16:** Querschnitte der  $\pi$ -Platten, a) Querschnitt 2, b) Querschnitt 4

Die  $\pi$ -Platten wurden mit einer Länge von 1,00 m hergestellt. Die Bewehrung der Platten bestand aus 3 Lagen eines biaxialen 2-D-Textils (1200 tex, 40,7 mm<sup>2</sup>/m), die im Abstand von 3, 5 und 7 mm zur Außenseite angeordnet waren. Die Stege waren mit einem GFK-Stab (Durchmesser 8 mm, 50,3 mm<sup>2</sup>) bewehrt, um die auftretenden Stützmente aufnehmen zu können. Die Stützlänge betrug 0,90 m mit mittiger Lasteinleitung. Die Prüfung erfolgte traversengesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,2 mm/min. Die Probekörper wurden bis zur Prüfung im Alter von 7 Tagen im Feuchtraum bei 20 °C und 65 % r. F. gelagert.

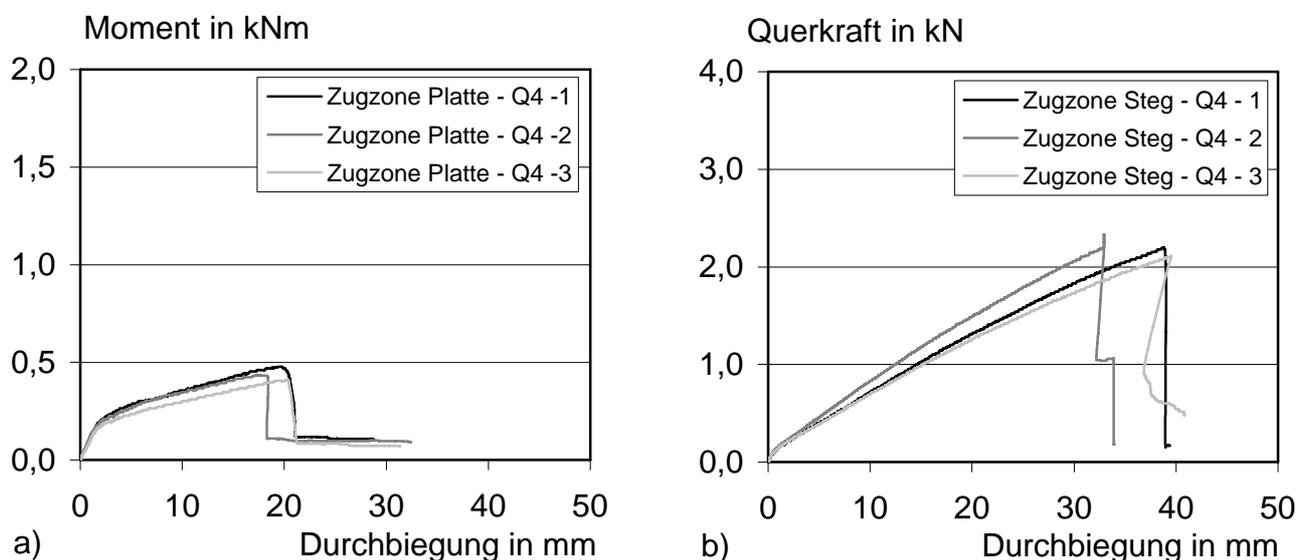
Bild 17 zeigt die Momenten- bzw. Querkraft-Durchbiegungslinien der  $\pi$ -Platten des Querschnitts 2, wobei in Diagramm a) die Platte und in Diagramm b) der Steg in der Zugzone angeordnet war. Die Versuche haben gezeigt, dass im Fall eines positiven Moments (Bild 17 a)) ein Biegeversagen und im Fall eines negativen Moments (Bild 17 b)) ein Querkraftversagen durch Abplatzen des Betons am Steg eintritt. Zur Übersichtlichkeit sind für den Fall des Biegeversagens nur die Momenten-Durchbiegungslinien und für den Fall des Querkraftversagens nur die Querkraft-Durchbiegungslinien dargestellt. Um die experimentell bestimmten Messwerte mit den Einwirkungen jeweils pro Stegabschnitt vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse pro Stegabschnitt umgerechnet. So konnte aus den Versuchen an den  $\pi$ -Platten für das maximal aufnehmbare Moment pro Stegabschnitt ein Wert von  $M_{\max} = 0,538$  kNm (Bild 17 a)) sowie eine maximal aufnehmbare Querkraft eines Stegabschnitts in Höhe von  $V_{\max} = 1,617$  kN (Bild 17 b)) ermittelt werden.



**Bild 17:** a) Momenten-Durchbiegungslinie der  $\pi$ -Platten des Querschnitts 2, Zugzone: Platte; b) Querkraft-Durchbiegungslinien der  $\pi$ -Platten des Querschnitts 2, Zugzone: Steg

Unter Verwendung des in Abschnitt 4.4 beschriebenen statischen Systems der BIS konnte für den SVPLB unter Annahme eines hydrostatischen Frischbetondrucks von  $16,5 \text{ kN/m}^2$  ein maximal einwirkendes Moment pro Stegabschnitt in Höhe von  $M_{\text{Einwirkung}} = 0,070 \text{ kN}$  (s. Tabelle 7, Biegebemessung der Platte ohne Teilsicherheitsbeiwert) und eine maximal einwirkende Querkraft pro Stegabschnitt in Höhe von  $V_{\text{Einwirkung}} = 0,90 \text{ kN}$  (s. Tabelle 8, Querkraftbemessung des Stegs ohne Teilsicherheitsbeiwert) berechnet werden. Hier wurde je nach Bemessungsfall die größte, berechnete Einwirkung angesetzt. Somit ergibt sich als maßgebende Bemessungsgröße die Einwirkung infolge Querkraft, da hierbei die Gesamtsicherheit bei 1,8 liegt. Im Vergleich dazu ergibt sich bei Biegebeanspruchung ein Sicherheitsfaktor von 7,7.

Bild 18 zeigt die Momenten- bzw. Querkraft-Durchbiegungslinien der  $\pi$ -Platten des Querschnitts 4. Auch hier war in Diagramm a) die Platte und in Diagramm b) der Steg in der Zugzone angeordnet. Wie bei den zuvor beschriebenen Versuchen des Querschnitts 2 traten im Fall eines positiven Moments (Bild 18 a)) ein Biegeversagen und im Fall eines negativen Moments (Bild 18 b)) ein Querkraftversagen durch Abplatzen des Betons am Steg ein.



**Bild 18:** a) Momenten-Durchbiegungslinie der  $\pi$ -Platten des Querschnitts 4, Zugzone: Platte; b) Querkraft-Durchbiegungslinien der  $\pi$ -Platten des Querschnitts 4, Zugzone: Steg

Zur Übersichtlichkeit sind wiederum für den Fall des Biegeversagens nur die Momenten-Durchbiegungslinien und für den Fall des Querkraftversagens nur die Querkraft-Durchbiegungslinien dargestellt. Bei der Umrechnung der experimentell bestimmten Messwerte jeweils pro Stegabschnitt konnte aus den Versuchen an den  $\pi$ -Platten für das maximal aufnehmbare Moment pro Stegabschnitt ein Wert von  $M_{\max} = 0,221 \text{ kNm}$  (Bild 18 a)) sowie eine maximal aufnehmbare Querkraft eines Stegabschnitts in Höhe von  $V_{\max} = 1,108 \text{ kN}$  (Bild 18 b)) ermittelt werden.

Für dieses System konnte für den SVPLB unter Annahme eines hydrostatischen Frischbetondrucks von  $16,5 \text{ kN/m}^2$  ein maximal einwirkendes Moment pro Stegabschnitt in Höhe von  $M_{\text{Einwirkung}} = 0,030 \text{ kN}$  (s. Tabelle 7, Biegebemessung der Platte abzüglich des Teilsicherheitsbeiwertes) und eine maximal einwirkende Querkraft pro Stegabschnitt in Höhe von  $V_{\text{Einwirkung}} = 0,54 \text{ kN}$  (s. Tabelle 8, Querkraftbemessung des Stegs abzüglich des Teilsicherheitsbeiwertes) berechnet werden. Somit ergibt sich als maßgebende Bemessungsgröße die Einwirkung infolge Querkraft, da hierbei die Gesamtsicherheit bei 2,0 liegt. Im Vergleich dazu ergibt sich bei Biegebeanspruchung ein Sicherheitsfaktor von 7,4.

Da die Tragfähigkeiten von beiden Querschnitten in etwa gleich sind, wurde aufgrund der Momenten- und Querkraft-Durchbiegungslinien Querschnitt 2 ausgewählt. Dieser Querschnitt verformt sich deutlich weniger bei Belastung, was für einen Einsatz als bauteilintegrierte Schalung von Vorteil ist.

Aufgrund der zum Teil deutlichen Diskrepanzen zwischen der Berechnung nach Plattenbalkentheorie und mit Hilfe des FE-Programms bleibt die Frage offen, wie die Tragwirkung der Textilbetonelemente in Zukunft am besten berechnet werden kann. Generell dürfte die Methode der FEM hier zielführender sein, da das nichtlineare Verhalten, welches bislang keine Berücksichtigung fand, weitere Steigerungen der Tragfähigkeit ermöglichen wird und so zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit führt.

#### **4.6 Herstellung der BIS-Elemente im Fertigteilwerk**

Die Herstellung der BIS-Elemente erfolgte im Fertigteilwerk. Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, wurde Querschnitt 2 mit einer Stegbreite von 50 mm bei einem Stegabstand von 250 mm verwendet (s. Bild 14). Die Breite der BIS-Elemente betrug 1,00 m bei einer Länge von 2,75 m. Die Platten wurden mit 3 Lagen eines biaxialen 2-D-Textils (1200 tex,  $40,7 \text{ mm}^2/\text{m}$ ), die im Abstand von 3, 5 und 7 mm zur Außenseite angeordnet waren, bewehrt. Die Bewehrung der Stege bestand aus jeweils einem GFK-Stab (Durchmesser 8 mm,  $50,3 \text{ mm}^2$ ). Das Prinzip des Bewehrungsaufbaus ist in Bild 16 dargestellt.

Ursprünglich sollte die Platte eines BIS-Elements laminiert werden, wobei der Feinbeton in die Schalung gegossen wird. Da sich das Gießen als Herstellverfahren allerdings nicht bewährte, wurde bei allen weiteren Platten der Feinbeton im Spritzverfahren in die Schalung eingebracht. Es zeigte sich, dass dies ein geeignetes Verfahren zur Herstellung der Platten war. Im Folgenden wird der Herstellvorgang kurz erläutert.



**Bild 19:** Schalung eines BIS-Elemente

Bild 19 zeigt die Schalung eines BIS-Elements. An den Kopfseiten der Rahmenschalung aus Stahl waren für die Betonage der Stege bereits deren Stirnschalungen angebracht. Die Stirnschalungen waren mit Bohrungen versehen, in die die Stegbewehrung (GFK-Stäbe) eingeschoben und so in ihrer Lage fixiert werden konnte. Die in Bild 19 sichtbaren Aussparungen in der Platte der BIS waren für die Durchführung der Verankerungsstäbe für die spätere Wandbetonage vorgesehen.

Bild 20 a) zeigt das Einbringen des Feinbetons im Spritzverfahren. Die Textilien wurden nach Erreichen der entsprechenden Feinbetonschichtdicke in den frischen Beton eingelegt (s. Bild 20 b)).



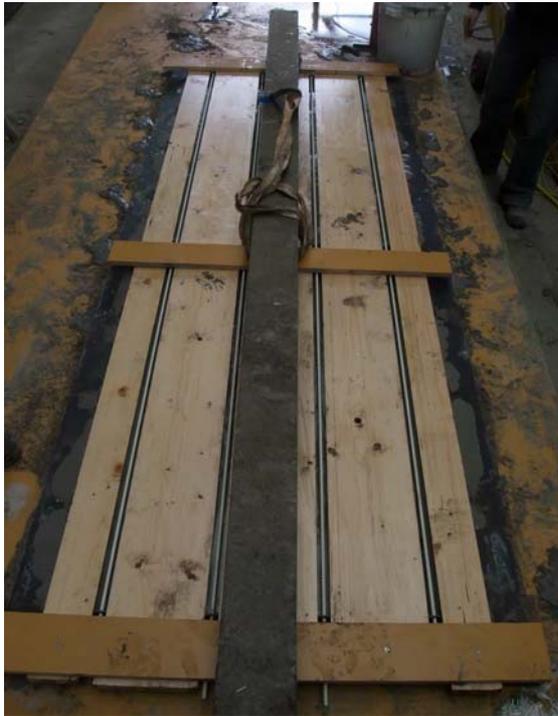
a)



b)

**Bild 20:** a) Einbringen des Feinbetons im Spritzverfahren; b) Eingelegtes Textil in der Platte der BIS

Nach Abschluss der Plattenherstellung wurden die GFK-Stäbe in die vorgesehenen Bohrungen der Stirnschalung der Stege eingeschoben. Da sich die Stäbe aufgrund ihres Eigengewichts durchbogen, wurden sie etwa in der Mitte durch Abstandhalter in ihrer Lage fixiert. An den beiden mittleren GFK-Stäben waren an einer Seite Ankerstäbe angebracht, um das BIS-Element später aus der Schalung heben zu können. Danach wurden Bohlen auf die Rahmenschalung in die Zwischenräume der Stirnschalung der Stege gelegt und fixiert (s. Bild 21 a)). Anschließend konnten die Stege mit Feinbeton befüllt werden (s. Bild 21 b)).



a)



b)

**Bild 21:** a) BIS-Schalung zur Herstellung der Stege; b) Befüllen eines Stegs

Nach zwei Tagen wurden die Stegplatten ausgeschalt und konnten aus der Schalung gehoben werden (s. Bild 22).



**Bild 22:** Heben eines BIS-Elements

Wie bereits erwähnt, konnte der Feinbeton nicht wie ursprünglich geplant in die Schalung gegossen werden. Durch die große, zu betonierende Oberfläche und fehlende Ausrüstung, wie beispielsweise bei einer Fertigungsstraße, dauerte der Herstellprozess zu lange. Der Feinbeton war stellenweise nicht mehr ausreichend fließfähig. Durch das Einbringen des Feinbetons im Spritzverfahren konnte der Herstellvorgang wesentlich verbessert und beschleunigt werden. Ein weiterer, sehr positiver Effekt war die sehr gute Sichtbetonoberfläche, die durch das Spritzen erzeugt werden konnte. In Bild 23 wird der Unterschied der Oberflächenqualität deutlich. Die linke Platte wurde gespritzt, bei der rechten handelt es sich um eine gegossene.



Bild 23: Vergleich zwischen gespritzter (links) und gegossener (rechts) Platte

## **5 ENTWICKLUNG DES SELBSTVERDICHTENDEN POROSIERTEN LEICHTBETONS (SVPLB)**

### **5.1 Allgemeines**

Bei der Entwicklung des SVPLB stehen zum einen die Reduzierung der Rohdichte durch die Verwendung von leichter Gesteinskörnung sowie der Eintrag von vorgeschäumten Luftporen in die Matrix im Vordergrund. Zum anderen soll der Sedimentationsstabilität bei einer guten Fließfähigkeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Bei einem SVB unter Verwendung von normaler Gesteinskörnung ist mit einem Absinken der Gesteinskörnung zu rechnen. Im Gegensatz hierzu wird es bei einem SVPLB durch die Verwendung von leichter Gesteinskörnung zu einem Aufschwimmen der leichten Gesteinskörnung kommen. Die Gefahr des Aufschwimmens soll beim SVPLB reduziert werden, indem vorgeschäumter Schaumbildner in die Matrix eingetragen wird und so die Rohdichte des Leims an die der leichten Gesteinskörnung angeglichen wird. Durch den Lufteintrag soll zudem die Matrixfestigkeit des Festbetons der der leichten Gesteinskörnung angeglichen werden, was zu einer homogenen Spannungsverteilung bei Druckbelastung im Vergleich zum Normalbeton oder konventionellem Leichtbeton führt. Die selbstverdichtenden Eigenschaften beziehen sich hier auf die Verdichtungsporen. Im Beton verbleiben lediglich die künstlich eingeführten Luftporen. Ebenfalls stellt der Lufteintrag einen ökologischen und ökonomischen Vorteil dar. Der erhöhte Luftgehalt des SVPLB zur Reduzierung der Rohdichte führt zu einer zur gewünschten Erhöhung der Wärmedämmeigenschaft im Vergleich zum Normalbeton. Zum anderen kann der Anteil der leichten Gesteinskörnung verringert werden, wodurch die Menge sowie die Stoffkosten reduziert werden.

### **5.2 Tastversuche**

Zunächst wurden Tastversuche zum selbstverdichtenden Leichtbeton mit porosierter Matrix durchgeführt. Als Ausgangsstoffe wurden ein Portlandzement CEM I 42,5 N gemäß DIN EN 197-1 /DIN04/ sowie zur Sicherstellung der erforderlichen Mehlkorngelände eine Flugasche gemäß DIN EN 450-1 /DIN08b/ verwendet. Bei dem Fließmittel handelte es sich um ein Fließmittel auf Polycarboxylat-Ether-Basis (PCE), das auch in der Praxis beim SVB zum Einsatz kommt. Mit Hilfe eines Stabilisierers wird die Viskosität der wässrigen Phase erhöht, wodurch der Sedimentationsneigung eines selbstverdichtenden Betons entgegen gewirkt werden kann.

Im Rahmen der Mischungsoptimierung wurden als leichte Gesteinskörnung ein Blähglasgranulat (0,5 bis 1,0 mm) und ein Blähton (1,0 bis 4,0 mm und 4,0 bis 8,0 mm) verwendet. Dabei wurden Mischungen aller drei Korngrößen und der beiden größeren Korngrößen erprobt. Um die Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung zu berücksichtigen, wurde dem Zugabewasser zusätzlich Wasser zugegeben.

Bei der Herstellung des Betons wurde die Gesteinskörnung zunächst 30 Minuten vorgehäst. Anschließend wurden Zement und Flugasche zugegeben, danach der vorgefertigte Schaum. Da dem ibac zu diesem Zeitpunkt noch kein Schaumgenerator zur Verfügung stand, wurde der Schaumbildner im Verhältnis 1 : 6 mit Wasser verdünnt und mit einem herkömmlichen Mixer bis zur Bildung eines sehr festen Schaums aufgeschlagen. Schaum und Feststoffe wurden mit der Kelle durchmischt, um eine Homogenität der Mischung zu erzeugen. Anschließend wurden Wasser, Stabilisierer und Fließmittel zugegeben. Bei Zugabe des Wassers und anschließend des Schaums kam es beim Setzfließmaß zur Sedimentation und einem starken Bluten des Betons, weshalb der Schaum bei den Versuchen in der oben beschriebenen Reihenfolge in die trockene Mischung gegeben wurde.

Ausgehend von einer Basismischung wurden verschiedene Betonzusammensetzungen untersucht, um den Beton hinsichtlich der Frisch- und Festbetoneigenschaften zu optimieren. Die Frischbetoneigenschaften der jeweiligen Betone wurden über das Setzfließmaß bestimmt. Die Ergebnisse lagen im üblichen Bereich selbstverdichtender Betone (700 bis 820 mm). Die Frischbetonrohddichte wurde ermittelt, wobei der LP-Topf über eine Rutsche befüllt wurde, damit der Beton sich selbst entlüften konnte. Die Betone wiesen Frischbetonrohddichten zwischen 960 und 1013 kg/m<sup>3</sup> auf (s. Tabelle 9).

Die Druckfestigkeiten lagen zwischen 2,8 und 6,7 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen (s. Tabelle 9). Nach den Vorversuchen wurde eine endgültige Mischung für die Prüfung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen gewählt. Die optimierte Mischung wies dabei eine Frischbetonrohddichte von 960 kg/m<sup>3</sup> auf. Die hergestellten Probekörper lagerten bis zum Ausschalen im Alter von 24 Stunden in einem Feuchtraum bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 95 %. Anschließend wurden sie entsprechend DIN EN 12390-2:2009-08 /DIN09/ bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und anschließend bei 20 °C/65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Es ergaben sich Druckfestigkeiten von 7,7 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen bei einer Festbetonrohddichte von 884 kg/m<sup>3</sup> (Tabelle 9).

**Tabelle 9:** Frisch- und Festbetoneigenschaften

| Nr.             | Setzfließmaß | Frischbeton-<br>rohddichte | Festbeton-<br>rohddichte | Druckfestigkeit nach |      |
|-----------------|--------------|----------------------------|--------------------------|----------------------|------|
|                 |              |                            |                          | 7 d                  | 28 d |
| -               | mm           | kg/m <sup>3</sup>          |                          | N/mm <sup>2</sup>    |      |
| 1               | 2            | 3                          | 4                        | 5                    | 6    |
| 1               | 770          | 1013                       | 999                      | 2,8                  | -    |
| 2               | 710          | 996                        | 983                      | 4,9                  | -    |
| 3               | 740          | 996                        | 964                      | 4,0                  | -    |
| 4               | 760          | 966                        | 950                      | 6,7                  | -    |
| 5               | 660          | 973                        | 980                      | 2,8                  | -    |
| 6               | 590          | 973                        | 957                      | 5,4                  | -    |
| 7               | 655          | 973                        | 973                      | 5,4                  | -    |
| 8 <sup>1)</sup> | 745          | 960                        | 884                      | 6,4                  | 7,7  |

1) Festbetonrohddichte nach 7 d 949 kg/m<sup>3</sup>  
 - nicht ermittelt

Auf diesen Tastversuchen basiert die Mischungsoptimierung im vorliegenden Forschungsvorhaben. Zunächst erfolgte die Umstellung auf die vorhandenen Ausgangsstoffe des Fertigteilwerks, in dem zu einem späteren Zeitpunkt Wände hergestellt werden sollten. Das Hauptaugenmerk lag bei der Mischungsoptimierung auf der Verringerung der Rohddichte, da mit der in den Tastversuchen erreichten Rohddichte die geforderten Wärmedämmeigenschaften mit einer praktikablen Bauteildicke nicht eingehalten werden konnten.

## 5.3 Hauptversuche

### 5.3.1 Mörtelversuche

Die Auswahl der Ausgangsstoffe erfolgte zunächst anhand von Mörteluntersuchungen. Dabei wurden verschiedene Zemente und Flugaschen getestet. Das Größtkorn des Blähglasgranulats bzw. des Blähtons betrug 2 mm. Der Schaum wurde zunächst wie bei den Tastversuchen mittels eines herkömmlichen Mixers hergestellt und unter den Mörtel gemischt. Das Verhältnis von Schaumbildner zu Wasser betrug 1 : 6. Die Mörtel wurden hinsichtlich ihres Fließverhaltens und ihrer Entlüftungsneigung optimiert. Es stellte sich heraus, dass sich mit den im Fertigteilwerk vorhandenen Produkten die fließfähigste Mischung ergab. Bild 24 zeigt das Setzfließmaß des optimierten Mörtels.



Bild 24: Setzfließmaß der optimierten Mörtelmischung (280 mm)

### 5.3.2 Ausgewählte Ausgangsstoffe

Als Zement wurde ein CEM I 52,5 R gemäß DIN EN 197-1 /DIN04/ verwendet. Die chemische Zusammensetzung sowie die physikalischen Eigenschaften sind den Tabellen A1 und A2, Anhang A, zu entnehmen. Die Korngrößenverteilung des Zements ist in Bild B1, Anhang B, dargestellt.

Bei der Flugasche handelte es sich um eine feinkörnige Flugasche. Die Flugasche ist eine Trockenfeuerungsasche, die die Anforderungen der DIN EN 450-1:2008-05 /DIN08b/ erfüllt. Die chemische Zusammensetzung dieser Flugasche ist ebenfalls in Tabelle A1 dargestellt, die physikalischen Eigenschaften in Tabelle A2. Die Korngrößenverteilung ist in Bild B1 abgebildet.

Bei dem Fließmittel handelt es sich wie bei den Tastversuchen um ein synthetisches Fließmittel auf Polycarboxylat-Ether-Basis (PCE), welches laut Herstellerangaben auf den Schaumbildner abgestimmt ist. Der Schaumbildner, bestehend aus einem synthetischen Tensid, ist für die Herstellung eines Leichtbetons geeignet und verspricht laut Herstellerangaben eine zielsichere Rohdichteeinstellung sowie eine hohe Stabilität der Poren.

Als Gesteinskörnung entsprechend DIN EN 13055-1:2002-08 /DIN02/ wurde das Blähglasgranulat der Körnungen 1 bis 2 mm und 4 bis 8 mm verwendet, da es eine geringere Rohdichte aufweist als der Blähton. Die Kornrohichte sowie die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung sind in Tabelle A3 dargestellt. Die Bestimmung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung der Korngröße 1 bis 2 mm erfolgte nach DIN V 18004:2004-04 /DIN04a/, die der Korngröße 4 bis 8 mm nach DIN-EN 1097-6:2005-12 im Anhang C /DIN05a/.

### 5.3.3 Mischungsoptimierung des SVPLB

Nach der Auswahl der Ausgangsstoffe erfolgte die Mischungsoptimierung des SVPLB. Zur optimierten Mörtelmischung wurde Blähglasgranulat der Körnung 4 bis 8 mm zugegeben. Um die Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung zu berücksichtigen und ein Aufschwimmen zu verhindern, wurde diese zunächst für 2 Stunden im gesamten Zugabewasser, d. h. inkl. der berücksichtigten Wasseraufnahme vorgegärt. Danach wurde die Gesteinskörnung inkl. Zugabewasser mit den Feststoffen Zement und Flugasche 2 Minuten vermischt. Das Fließmittel wurde zugegeben und für 2 weitere Minuten untergemischt. Anschließend wurde der Schaum so lange untergemischt, bis der Beton gleichmäßig durchmischt war (ca. 10 Minuten). Ein Bluten des Betons wie bei den Tastversuchen war nicht festzustellen. Die Frischbetonrohichte des Betons ließ sich nun über die Zugabe der Schaummenge variieren. Der Schaum wurde abgefüllt, gewogen und der Mischung zugegeben (s. Bild 25 a)). Ziel war eine Frischbetonrohichte von  $500 \text{ kg/m}^3$ , denn zahlreiche Versuche ergaben, dass sich bei einer weiteren Verringerung der Rohdichte keine stabile Mischung einstellte und der Beton in sich zusammenfiel oder eine so geringe Festigkeit aufwies, dass er nicht ausgeschalt werden konnte.

Bei der Mischungsoptimierung wurden Frischbetonrohichte, Luftgehalt und Setzfließmaß ermittelt, wobei die Bestimmung des Luftgehalts eines Leichtbetons mittels eines Luftporentopfes nicht normgemäß ist und die Ergebnisse als unzuverlässig einzustufen sind. Aus diesem Grund wurde zur Beurteilung des Betons lediglich die Frischbetonrohichte herangezogen. Dazu wurde der Luftporentopf per Rutsche gefüllt, damit der SVPLB entlüften konnte. Die Frischbetonrohichte wurde über die Schaumzugabe auf  $500 \text{ kg/m}^3$  eingestellt. Das Setzfließmaß betrug etwa 680 mm, ohne dass es zum Bluten des Betons kam. Bild 25 b) zeigt das Setzfließmaß der optimierten Mischung.



**Bild 25:** a) Schaumzugabe, b) Setzfließmaß der optimierten Betonmischung (680 mm)

Die Herstellung und das anschließende Durchsägen eines Würfels gaben neben der visuellen Betrachtung des Frischbetons ebenfalls Aufschluss über die Sedimentationsneigung der verschiedenen Mischungen. Die Zusammensetzung der optimierten Mischung ist in Tabelle 10 gegeben. Aus der Festbetonrohddichte wurde ein Luftgehalt des SVPLB von 40 Vol.-% berechnet.

**Tabelle 10:** Zusammensetzung der optimierten Mischung

| Ausgangsstoff                                    | Einheit           | Gehalt |
|--|-------------------|--------|
| 1  | 2                 | 3      |
| CEM I 52,5 R (z)                                 | kg/m <sup>3</sup> | 200    |
| Flugasche (f)                                    |                   | 100    |
| Gesteinskörnung 1 bis 8 mm<br>(Blähglasgranulat) |                   | 126    |
| Fließmittel (PCE)                                | M.-% vom Zement   | 0,48   |
| Schaumbildner                                    |                   | 1,00   |
| w/z  | –                 | 0,73   |
| $w/z_{eq} = w / (z + 0,4 \cdot f)$               | –                 | 0,64   |

### **5.3.4 Schwierigkeiten bei der Betonherstellung**

Bei den Hauptversuchen stand dem ibac für die Herstellung des Schaums ein Schaumgenerator zur Verfügung. Aus konzentriertem Schaumbildner, Wasser und Druckluft wurde der Schaum erzeugt. Verzögerungen der Versuche ergaben sich zunächst dadurch, dass es zum einen sehr schwierig war, einen Schaum mit gleicher Rohdichte reproduzierbar herzustellen, obwohl an den Einstellungen des Schaumgenerators keine Änderungen vorgenommen wurden. Zum anderen handelte es sich bei einer zweiten Lieferung des Schaumbildners um ein anderes Produkt als bei der ersten, weshalb sich grundsätzlich andere Schaumdichten einstellten. Untersuchungen zur Schaumstabilität ergaben schließlich, dass der Schaum bei einer Dichte von 20 g/l und einem Verhältnis von Schaumbildner zu Wasser von  $\sim 1 : 7$  die geringsten Drainageerscheinungen aufwies, d. h. am wenigsten Wasser absonderte und am stabilsten war.

Eine weitere Problematik zu Beginn der Versuche war das Absetzen des Zements am Mischerboden. Teilweise war bereits vor Zugabe des Schaums trotz längerer Mischzeiten ein Absetzen des Zements vorhanden. Es wurde eine Wechselwirkung der Zusatzmittel mit dem Stabilisierer vermutet, der zu Beginn der Betonversuche noch verwendet wurde. Ohne den Stabilisierer traten diese Effekte nicht mehr auf. Da sich durch das Weglassen des Stabilisierers keine negativen Eigenschaften hinsichtlich Sedimentation und Stabilität des Betons einstellten, wurde er bei der Mischungsoptimierung nicht weiter verwendet.

Beim Ausschalen der Probekörper waren anfangs Fehlstellen an den Probekörpern vorhanden, da ein Teil des Betons an der Schalung haften blieb. Diese Problematik wurde nach Rücksprache mit dem Zusatzmittelhersteller durch ein geeignetes Trennmittel und eine Ausschallfrist von 2 Tagen behoben.

### **5.3.5 Festbetoneigenschaften des SVPLB**

#### **5.3.5.1 Allgemeines**

Da für die Prüfverfahren von Schaumbeton keine eigenen Normen existieren, wurden teilweise die Vorgaben für haufwerksporige Leichtbetone herangezogen. Die übrigen Prüfungen wurden Normalbetonen entsprechend durchgeführt. Die Lagerungsart wurde abweichend von /DIN09/ gewählt: Nach 2 Tagen wurden die Probekörper ausgeschalt, bis zur Prüfung in Folie versiegelt und im Klima 20 °C/65 % rel. Luftfeuchte gelagert. Diese Lagerungsart sollte den Einbau des SVPLB in die BIS simulieren. Sie wurde bei allen Probekörpern angewendet.

### 5.3.5.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde im Alter von 2, 7, 28, 56, 90, 180 und 365 Tagen an jeweils 3 Würfeln mit 150 mm Kantenlänge in Anlehnung an DIN EN 1354:2005-09 /DIN05b/ geprüft.

Die Entwicklung der Betondruckfestigkeit ist Bild 26 zu entnehmen. Nach 28 Tagen wies die optimierte Betonmischung eine Druckfestigkeit von 2,2 N/mm<sup>2</sup> auf. Damit erreichte der SVPLB die für Leichtbetone mit haufwerksporigem Gefüge geltende Mindestfestigkeit der Festigkeitsklasse 2 (2 N/mm<sup>2</sup>) gemäß DIN EN 1520:2003-07 /DIN03a/.

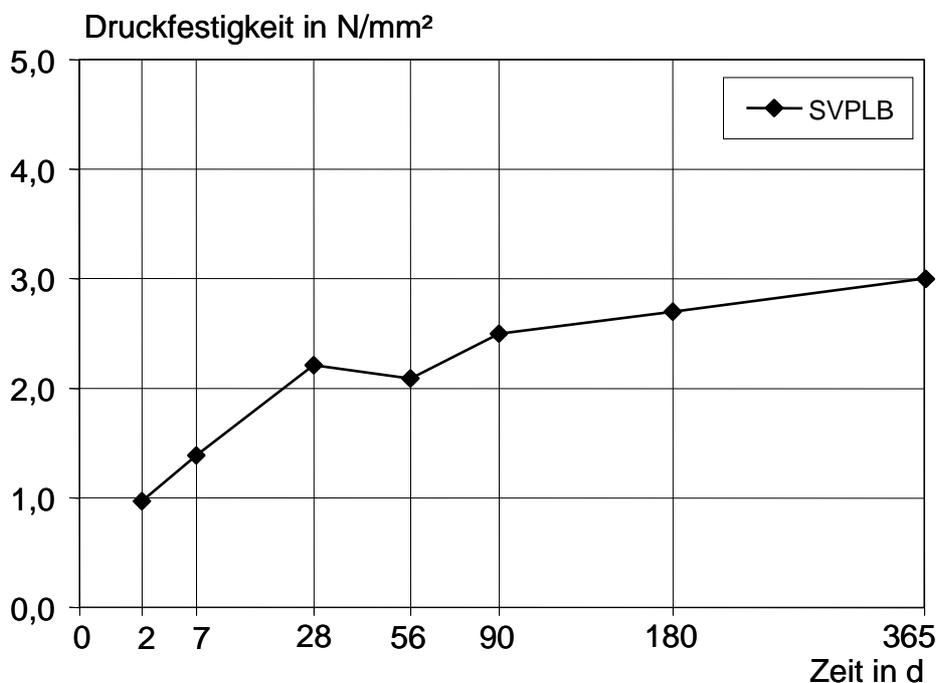


Bild 26: Druckfestigkeitsentwicklung des SVPLB

### 5.3.5.3 Spaltzugfestigkeit

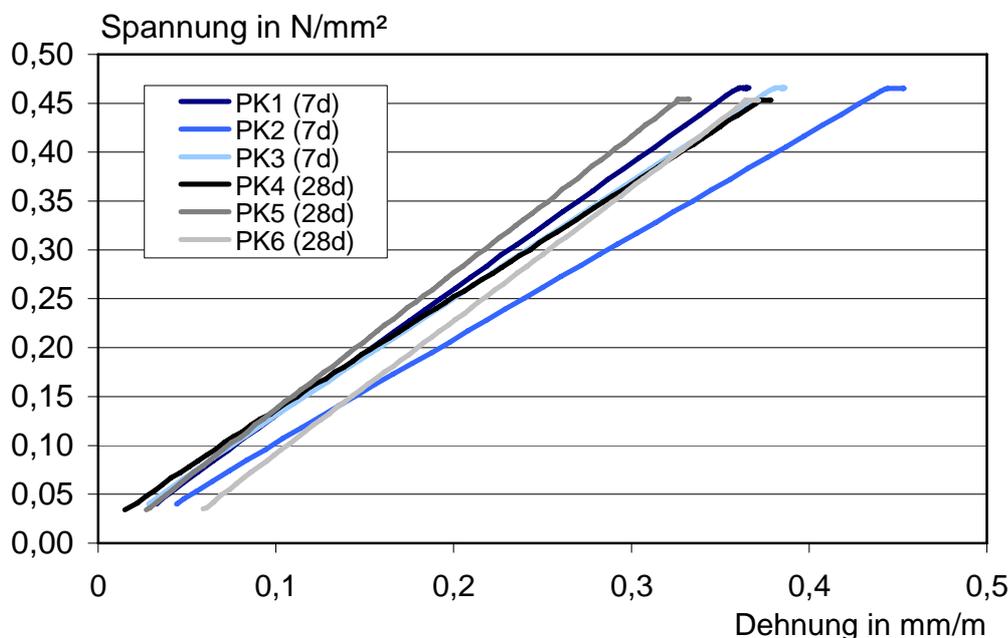
Die Spaltzugfestigkeit wurde nach 7 und 28 Tagen nach DIN 1048-5 /DIN91/ geprüft. Dabei wird die Last über Lastverteilungsstreifen, die auf Zylinder ( $\varnothing = 150$  mm,  $h = 300$  mm) aufgebracht werden, aufgebracht und bis zum Spalten der Probekörper gesteigert.

Die Spaltzugfestigkeit des SVPLB konnte weder nach 7 noch nach 28 Tagen bestimmt werden, da die Lastverteilungstreifen bei Belastung sofort in den Beton gedrückt wurden und sich so keine Spaltwirkung einstellen konnte. Aus diesem Grund liegen zur Spaltzugfestigkeit keine Ergebnisse vor.

#### 5.3.5.4 E-Modul und Spannungs-Dehnungslinien

Der statische E-Modul wurde ebenfalls nach 7 und 28 Tagen geprüft. Die Verfahrensbeschreibung ist Kapitel 4.2.3.3 zu entnehmen. Abweichend davon handelte es sich beim SVPLB allerdings um Zylinder mit  $\varnothing = 150 \text{ mm}$  und  $h = 300 \text{ mm}$ . Die Verformungen wurden während der Prüfung zur Ermittlung der Spannungs-Dehnungslinien aufgezeichnet.

Der E-Modul ergab sich im Mittel nach 7 Tagen zu  $1200 \text{ N/mm}^2$ , nach 28 Tagen zu  $1300 \text{ N/mm}^2$  und ist somit geringer als der Wert von  $1400 \text{ N/mm}^2$ , der sich mit der vorhandenen Trockenrohddichte von  $380 \text{ kg/m}^3$  (s. Kapitel 5.3.5.7) aus der Abschätzung aus /DIN03a/ ergibt. In Bild 27 sind die Spannungs-Dehnungslinien der Probekörper nach 7 und 28 Tagen abgebildet.



**Bild 27:** Spannungs-Dehnungslinien der Probekörper nach 7 und 28 Tagen

### 5.3.5.5 Schwinden und Kriechen

Die Ermittlung des Schwindens und des Kriechens der Probekörper erfolgte in Anlehnung an das DAfStb-Heft 422 /Bun91/ an Zylindern ( $\varnothing = 150 \text{ mm}$ ,  $h = 300 \text{ mm}$ ). Die Gleichungen zur Berechnung des Schwind- und Kriechmaßes sowie der Kriechzahl sind Kapitel 4.2.3.4 zu entnehmen. Die Nullmessung zur Ermittlung des Schwindens der Probekörper erfolgte bereits nach 2 Tagen. Die Belastung zur Ermittlung des Kriechens der Probekörper wurde nach 28 Tagen aufgebracht. Der zeitliche Verlauf der Gesamtverformungen, des Schwind- und Kriechmaßes sowie der Kriechzahl ist in Tabelle 11 enthalten.

**Tabelle 11:** Ergebnisse der Schwind- und Kriechmessungen an Zylindern ( $\varnothing = 150 \text{ mm}$ ,  $h = 300 \text{ mm}$ ) in Anlehnung an das DAfStb-Heft 422 /Bun91/

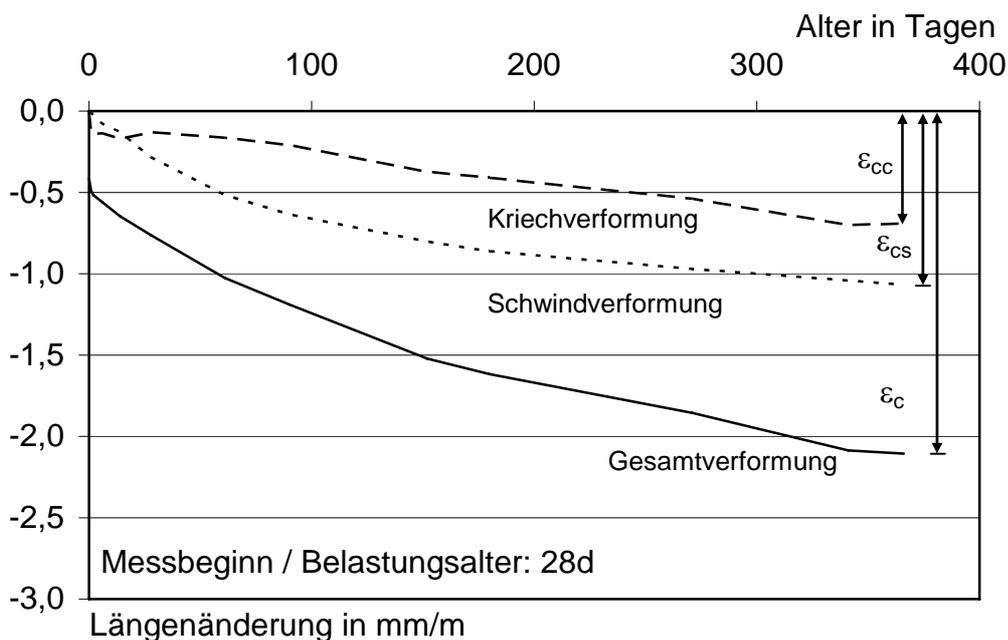
| Prüfalter <sup>1)</sup> | Gesamtverformung<br>$\varepsilon_c$ | Schwindverformung<br>$\varepsilon_{cs}$ | Kriechverformung <sup>2)</sup><br>$\varepsilon_{cc}$ | Kriechzahl <sup>3)</sup><br>$\varphi$ |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--|---------------------------------------|
| d                       | mm/m                                |   | -  |                                       |
| 1                       | 2                                   | 3                                       | 4  | 5                                     |
| 1                       | 0,490                               | 0,108                                   | 0,134  | 0,39                                  |
| 2                       | 0,516                               | 0,127                                   | 0,141  | 0,41                                  |
| 6                       | 0,560                               | 0,176                                   | 0,136  | 0,39                                  |
| 14                      | 0,647                               | 0,230                                   | 0,169  | 0,49                                  |
| 28                      | 0,763                               | 0,384                                   | 0,131  | 0,38                                  |
| 61                      | 1,024                               | 0,613                                   | 0,163  | 0,47                                  |
| 90                      | 1,190                               | 0,734                                   | 0,209  | 0,60                                  |
| 152                     | 1,522                               | 0,901                                   | 0,374  | 1,08                                  |
| 180                     | 1,616                               | 0,959                                   | 0,409  | 1,18                                  |
| 271                     | 1,856                               | 1,070                                   | 0,539  | 1,56                                  |
| 341                     | 2,087                               | 1,140                                   | 0,699  | 2,02                                  |
| 366                     | 2,105                               | 1,166                                   | 0,692  | 2,00                                  |

1) Kriechdauer nach Belastungsbeginn (28 d)

2)  $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c - (\varepsilon_{cs} + \varepsilon_{ci})$ , Kriechspannung  $\sigma_c = 0,45 \text{ N/mm}^2$ , elast. Verformung  $\varepsilon_{ci} = 0,346 \text{ mm/m}$

3)  $\varphi = \varepsilon_{cc}/\varepsilon_{ci}$

In Bild 28 ist die graphische Darstellung aus den Schwind- und Kriechversuchen enthalten. Im Vergleich zu Normalbeton sind die Schwindverformungen des SVPLB größer. Aus /Grü01/ ist zu entnehmen, dass Schaumbeton mit einer Trockenrohdichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  schon etwa 4 bis 6mal so stark schwindet wie Normalbeton. Hier liegt nur etwa der Faktor 2 vor. Demnach ist das Schwindverhalten des SVPLB noch relativ gering und entspricht dem Wert von  $1,2 \text{ mm/m}$ , der sich aus der Abschätzung nach /DIN03a/ für haufwerksporigen Leichtbeton mit der entsprechenden Trockenrohdichte von  $380 \text{ kg/m}^3$  ergibt. Berechnet man die Kriechzahl in Anlehnung an haufwerksporigen Leichtbeton /DIN03a/ mit der hier vorhandenen Trockenrohdichte, ergibt sich ein Wert von  $0,55$ . Beim SVPLB wird jedoch nach 365 Tagen schon eine Kriechzahl von  $2,0$  erreicht. Da das Kriechen jedoch überwiegend vom Volumen des kriechenden Zementsteins abhängt, kann der SVPLB hier nicht mit dem haufwerksporigen Leichtbeton verglichen werden, da er ein deutlich höheres Zementsteinvolumen besitzt. Die Kriechzahl ist geringer als bei Normalbeton.



**Bild 28:** Formänderung infolge Schwinden und Kriechen

### 5.3.5.6 Karbonatisierung

Zur Prüfung der Karbonatisierungstiefe nach Heft 422 des DAfStb /Bun91/ wurden zu jedem Prüftermin von drei Betonprismen ( $100 \cdot 100 \cdot 500 \text{ mm}^3$ ) ca. 30 mm dicke Stücke abgespalten und die frische Bruchfläche mit 1%iger Phenolphthaleinlösung besprüht. Die Karbonatisierungstiefe wurde 24 Stunden später gemessen. Es wurde die mittlere Karbonatisierungstiefe jeder Seite der Bruchfläche und die sich daraus ergebende mittlere Karbonatisierungstiefe zu den Prüfzeitpunkten (7, 14, 28, 90, 180 und 365 Tage) ermittelt.

In Bild 29 sind die Karbonatisierungstiefen des SVPLB abgebildet. Gegenüber Normalbeton tritt aufgrund des poröseren Gefüges eine erhöhte Karbonatisierung des SVPLB auf. Da er jedoch durch die bauteilintegrierte Schalung geschützt wird, wird eine Karbonatisierung des SVPLB in diesem Maße nicht auftreten.

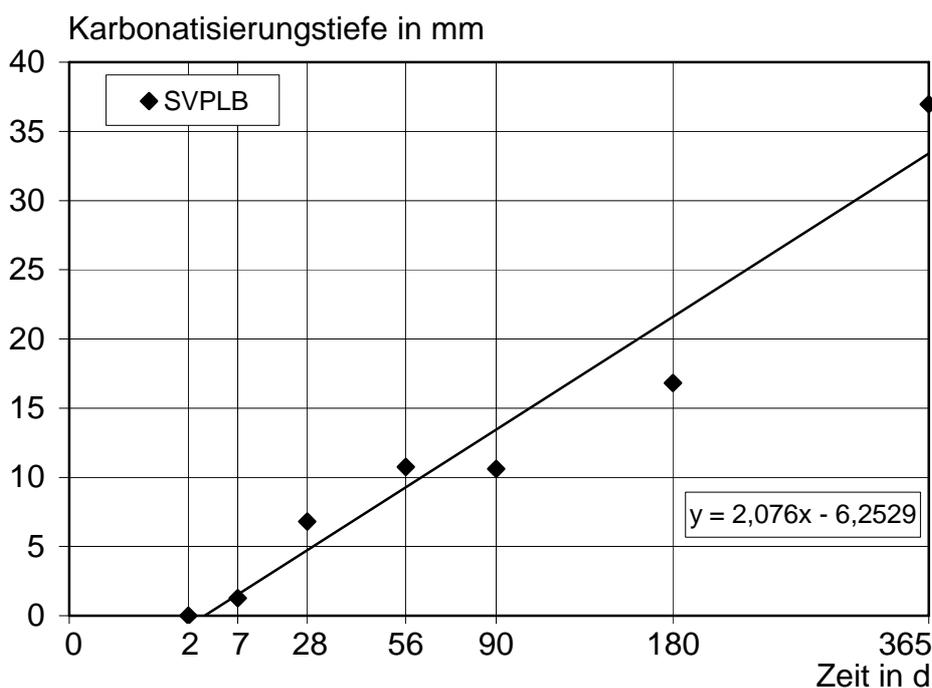


Bild 30: Karbonatisierungstiefe des SVPLB

### 5.3.5.7 Trockenrohichte

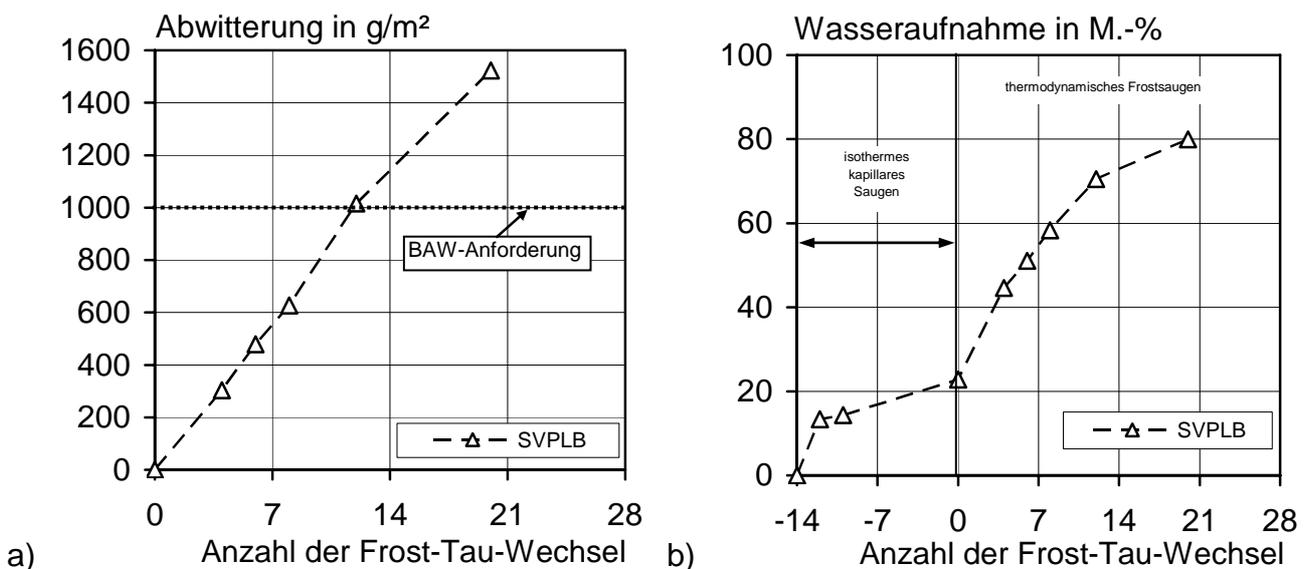
Die Trockenrohichte wurde in Anlehnung an DIN EN 992:1995-09 /DIN95/ bestimmt. Würfel mit 100 mm Kantenlänge wurden im Alter von 7 und 28 Tagen in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Massenkonstanz gelagert.

Die Trockenrohichte ergab sich sowohl nach 7 als auch nach 28 Tagen zu 380 kg/m<sup>3</sup> und liegt somit im Vergleich zu haufwerksporigem Leichtbeton /DIN03a/ unter der geringsten Rohdichteklasse von 0,5 (400 bis 500 kg/m<sup>3</sup>).

### 5.3.5.8 Frost-Widerstand

Zur Überprüfung des Frost-Widerstandes mit dem CIF-Test nach BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ /BAW04/ wurden fünf Platten mit den Abmessungen 150 · 110 · 70 mm<sup>3</sup> hergestellt. Als Prüffläche wurde die Seitenfläche genutzt, die der in der Schalung angeordneten Teflonscheibe zugewandt war. Die Probekörper wurden nach 7-tägiger Lagerung in Folie im Klima 20 °C/65 % rel. Luftfeuchte gelagert. Im Alter von 27 Tagen wurden die Seitenflächen der Probekörper zur Verhinderung der Seitenabwitterungen mit einem Butyl-Aluminiumband abgedichtet und bis zur Prüfung weiterhin bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % gelagert. Im Alter von 28 Tagen begann das 7-tägige kapillare Saugen (100 % demineralisiertes Wasser) mit der anschließenden Frost-Prüfung in einer CIF-Klimatrühe. Für den CIF-Test wird die innere Schädigung der Probekörper durch Prüfung des dynamischen E-Moduls als maßgebendes Abnahmekriterium mittels Ultraschalllaufzeit-Verfahren ermittelt. Der Beton gilt als geschädigt, wenn ein relativer dynamischer E-Modul von 75 % nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) unterschritten wird. Die Schalllaufzeit wurde über den Querschnitt der Probekörper in zwei Richtungen gemessen. Aus den Schalllaufzeiten und der Probekörpergeometrie kann die Änderung des dynamischen E-Moduls bestimmt werden. Zusätzliches Abnahmekriterium ist die Abwitterung der Prüffläche. Die Abwitterung der Probekörper wurde durch Filtration der Prüflösung, Trocknung des Filtrerrückstandes bei 105 °C und nachfolgender Wägung nach 4, 6, 8, 12, 20 und 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) ermittelt. Um lose anhaftendes Material mit zu erfassen, wurden die Prüfbehälter vorher für 3 Minuten im Ultraschallbad beschallt. Weiterhin wurde auch die Wasseraufnahme der Probekörper während der Frost-Tau-Wechsel ermittelt.

In Bild 31 sind die Abwitterung (Bild 31 a)) und die Wasseraufnahme (Bild 31 b)) des SVPLB dargestellt. Eine Schwierigkeit bei Herstellung der Probekörper bestand bereits beim Ausschalen, da die Teflonseite nicht mit dem speziellen Trennmittel versehen werden durfte. Dadurch blieb hier Zementleim an der Schalung haften, so dass die Probekörper keine glatten Oberflächen aufwiesen. Im Bild (rechts) ist die Wasseraufnahme der Probekörper zu erkennen. Bereits beim kapillaren Saugen liegt diese über 20 M.-%. Nach 20 FTW ist sie auf knapp 80 M.-% angestiegen. Ein Normalbeton hat etwa eine Wasseraufnahme von 2 M.-%. Das zusätzliche Abnahmekriterium beim CIF-Test liegt bei einer Abwitterung von  $1000 \text{ g/m}^2$  nach 28 FTW. Diesen Grenzwert überschreitet der SVPLB bereits nach 12 FTW. Als Abnahmekriterium gilt jedoch die innere Schädigung. Nach 4 FTW lagen geringere Laufzeiten und somit ein deutlich höherer E-Modul vor. Dies entsteht durch die Wasseraufnahme und dem damit verbundenen Anstieg der Rohdichte. Nach bereits 8 FTW traten allerdings Risse im Beton auf. Der Anstieg der Rohdichte kompensierte im vorliegenden Fall die Zunahme der Schalllaufzeit infolge Rissbildung, womit eine Beurteilung der Frostbeständigkeit mit dem CIF-Verfahren unmöglich wird. Die Ergebnisse stimmen nicht mit /Loh00, Loh02/ überein, wo von einer ausreichenden Frostbeständigkeit gesprochen wird. Da der SVPLB jedoch wie bei der Karbonatisierung durch die bauteilintegrierte Schalung geschützt ist, wird die Wasseraufnahme sehr gering sein und daher keine Schädigung durch Frost auftreten.



**Bild 31:** Abwitterung und Wasseraufnahme des SVPLB

### 5.3.5.9 Wärmeleitfähigkeit

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte gemäß DIN 52612-1 /DIN79/ mit dem Plattengerät. Dazu wurden 2 Platten aus einem Würfel mit 200 mm Kantenlänge herausgesägt und vor dem Versuch bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Die Untersuchungen ergaben eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,101 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  bei einer Trockenrohddichte des Betons von  $365 \text{ kg/m}^3$ .

## 6 WANDHERSTELLUNG

### 6.1 Allgemeines

Die Herstellung aller vier Wandelemente bestehend aus der bauteilintegrierten Schalung sowie dem Schaumbeton sollte ursprünglich im Fertigteilwerk durchgeführt werden. Da allerdings bei den ersten zwei Wandbetonagen der Schaumbeton jeweils sedimentierte, wurden die weiteren Betonagen nicht mehr im Werk, sondern am ibac durchgeführt. In den nächsten Abschnitten werden zunächst Details zu den Wandabmessungen beschrieben und die Wandbetonagen näher erläutert.

### 6.2 Bauphysikalische Berechnung und Abmessungen der Wand

Für die Herstellung der Wandelemente waren die Breite und die Höhe bereits im Vorfeld vorgegeben. Als ein gängiges Maß für eine geschosshohe Wand wurde die Höhe mit  $h = 2,75 \text{ m}$  gewählt. Die Breite wurde so gewählt, dass sie mit  $1,0 \text{ m}$  der eines üblichen Schalelements entsprach. Diese Abmessungen lagen der Bemessung der BIS (s. Abschnitt 4.4) zugrunde.

In Kapitel 2.5 wurden die Grundlagen, das Vorgehen sowie die Grenzwerte einer bauphysikalischen Berechnung bereits erläutert. Da die Herstellung und Prüfung der vier Wände sowohl vor als auch nach der Einführung der EnEV 09 erfolgten, ist den nachfolgenden Berechnungen der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  in Höhe von  $0,315 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  zugrunde gelegt worden. Dieser ergab sich aus der Annahme, dass der  $U$ -Wert der EnEV 07 in der nächsten, geltenden Fassung um 30 % verschärft wird. Tatsächlich fand eine Verschärfung um 53 % statt. Um eine Vergleichbarkeit der Wandversuche zu erhalten, wurde diese Verschärfung des Grenzwerts nicht umgesetzt. Hier hätte eigentlich eine Erhöhung der Schichtdicke des SVPLB und somit der Wanddicke erfolgen müssen. Im Folgenden werden die Berechnung und das Ergebnis vorgestellt.

Die wesentlichen Eingangsdaten für das Glaser-Diagramm zur Bestimmung von Tauwasseranfall sind die Schichtdicke  $s$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Die Schichtdicken  $s_i$  entsprechen den Abmessungen des Bauteils. Für die Berechnung der Wand werden die Stege nicht einzeln berücksichtigt, sondern es wird eine mittlere Wanddicke betrachtet. Für die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  wird der Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  benötigt. Der Wärmedurchlasswiderstand  $R$  ermittelt sich aus der Division der Schichtdicke  $s$  durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ .

**Tabelle 12:** Berechnungsablauf für die Erstellung des Glaser-Diagramms

| Schicht        | s     | $\lambda$ | R                     | $\Delta T$                       | T           | $\rho_s$ | $\mu$ | $S_d$         |
|----------------|-------|-----------|-----------------------|----------------------------------|-------------|----------|-------|---------------|
|                |       |           | $s/\lambda$           | $R_i/R_{ges} \cdot 30 \text{ K}$ | Summe $T_i$ |          |       | $s \cdot \mu$ |
| -              | m     | W/(m·K)   | (m <sup>2</sup> ·K)/W | K                                | °C          | Pa       | -     | m             |
| 1              | 2     | 3         | 4                     | 5                                | 6           | 7        | 8     | 9             |
| Außenluft      | -     | -         | -                     | -                                | -10,0       | 260      | -     | -             |
| Übergang Außen | -     | -         | 0,04                  | 0,36                             |             |          | -     | -             |
| Platte BIS     | 0,010 | 1,397     | 0,01                  | 0,06                             | -9,6        | 268      | 130   | 1,30          |
| Steg + SVPLB   | 0,005 | 1,397     | 0,00                  | 0,03                             | -9,6        | 270      |       |               |
| SVPLB          | 0,320 | 0,101     | 3,17                  | 28,29                            | -9,5        | 271      | 5     | 1,65          |
| Steg + SVPLB   | 0,005 | 1,397     | 0,00                  | 0,03                             | 18,7        | 2163     | -     | -             |
| Platte BIS     | 0,010 | 1,397     | 0,01                  | 0,06                             | 18,8        | 2167     | 80    | 0,80          |
| Übergang Innen | -     | -         | 0,13                  | 1,16                             | 18,8        | 2176     |       |               |
| Innenluft      | -     | -         | -                     | -                                | 20,0        | 2338     | -     | -             |
| Summe          | 0,35  |           | 3,36                  | 30,0                             |             | -        |       | 3,75          |

Für die Berechnung beider Werte, der Bestimmung des Tauwasseranfalls sowie des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$ , wird die Dicke des Bauteils bzw. werden die Schichtdicken  $s_i$  benötigt. Um parallel einen möglichen Tauwasseranfall und den Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  in Abhängigkeit der Schichtdicken  $s_i$  zu ermitteln, wurde der in Tabelle 12 dargestellte Berechnungsablauf erstellt. Die unbekannte Größe, die Schichtdicke  $s_{SVPLB}$  des Schaumbetons, wurde iterativ verändert, bis die Anforderungen erfüllt waren. Tabelle 12 gibt die

abschließende Berechnung der Kennwerte mit einer Schichtdicke  $s_{SVPLB}$  des Schaumbetons von 0,32 m und somit einer Bauteildicke von 0,35 m wieder. Der Querschnitt der Wand ist in Bild 32 dargestellt.

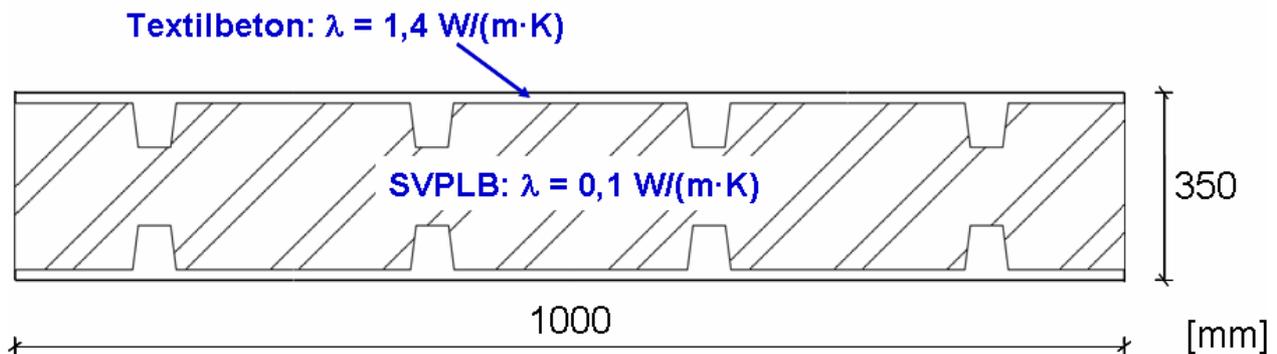


Bild 32: Querschnitt der Wand

Mit den einzelnen Schichtdicken  $s_i$  und den Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_i$  konnten durch Division der Schichtdicken  $s_i$  durch die Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_i$  zunächst die Wärmedurchlasswiderstände  $R_i$  ermittelt werden (Tabelle 12, Spalte 4). Die Wärmeübergangskoeffizienten für Innen und Außen können nach DIN EN ISO 6946 /DIN08c/ für horizontal durchströmte Bauteile in Höhe von  $R_i = 0,13$  (innen) und  $R_a = 0,04$  (außen) angenommen werden. Aufsummiert ergibt sich der Wärmedurchlasswiderstand  $R_{ges}$  zu 3,36. Durch Bildung des Kehrwerts dieser Summe ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  zu  $0,298 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ . Dieser Wert ist kleiner als die zugrunde gelegten  $0,315 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ .

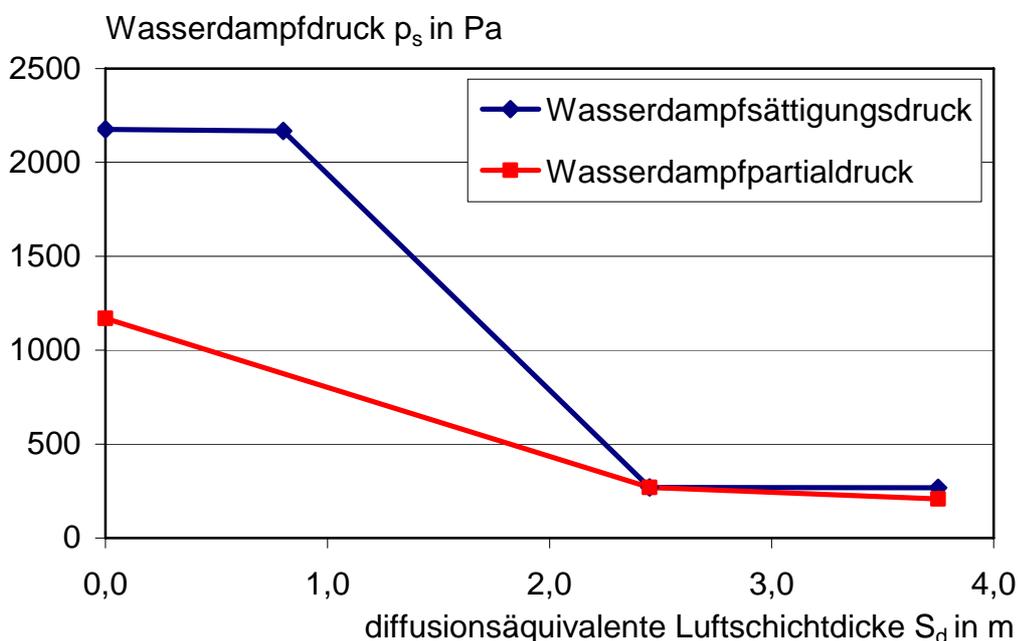
Nach der Ermittlung der Wärmedurchlasswiderstände  $R_i$  der einzelnen Schichten konnte ein Temperaturverlauf durch das Bauteil bestimmt werden. Bei der vorliegenden Berechnung wurde in der Tauperiode für die Außenluft eine Temperatur von  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\Theta_e$ ) und für die Innenluft eine Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\Theta_i$ ) angenommen. Multipliziert man die Temperaturdifferenz von 30 K mit dem Verhältnis des Wärmedurchlasswiderstandes einer einzelnen Schicht bezogen auf den gesamten Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils, so erhält man den Temperaturunterschied in der betroffenen Schicht (Tabelle 12, Spalte 5). Addiert man die Werte der einzelnen Schichten beginnend bei  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  Außenlufttemperatur auf, so erhält man den Temperaturverlauf durch das Bauteil (Tabelle 12, Spalte 6).

Nach der Ermittlung des Temperaturverlaufs durch die Wand konnte in Abhängigkeit dazu der Sättigungsdruck  $p_s$  des Wasserdampfes anhand von Tabellen /Sch06/ bestimmt werden (Tabelle 12, Spalte 7).

Zur Ermittlung der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke  $S_d$  wird die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  benötigt. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  der einzelnen Schichten wurde anhand von Angaben der Literatur abgeschätzt, da diese Werte im Rahmen des Vorhabens nicht bestimmt wurden. In der Literatur werden immer ein oberer und ein unterer Grenzwert eines Baustoffs angegeben. Damit der ungünstigste Zustand abgebildet wird, wurde für die Schichten von innen nach außen der kleinere Wert bis zu der Schicht angesetzt, wo der größte Temperaturunterschied zu verzeichnen ist. Für die äußeren Schichten wurde dann der größere Wert angenommen, so dass möglichst viel Wasserdampf in das Bauteil gelangt, dann jedoch schlecht austreten kann.

Multipliziert man die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  mit der jeweiligen Schichtdicke, so erhält man die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $S_d$  (Tabelle 12, Spalte 9). Dabei werden die Stege der bauteilintegrierten Schalung vernachlässigt, indem die Schichtdicken der Übergangsbereiche der Schicht des SVPLB angerechnet werden /Sch06/.

Zur Erstellung des Glaser-Diagramms trägt man als erstes die aufsummierte diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $S_d$  (Tabelle 12, Spalte 9) über den Sättigungsdruck  $p_s$  des Wasserdampfes (Tabelle 12, Spalte 7) auf und erhält den Verlauf des Wasserdampfsättigungsdrucks (s. Bild 33). Im nächsten Schritt werden die Wasserdampfpartialdrücke für die Außenluft bei  $-10\text{ °C}$  und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit zu  $p_a = 208\text{ Pa}$  und für die Innenluft bei  $+20\text{ °C}$  und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit zu  $p_i = 1170\text{ Pa}$  bestimmt. Diese Werte trägt man ebenso in das Diagramm ein, verbindet sie mit einer Linie und erhält den Verlauf des Wasserdampfpartialdrucks (s. Bild 33). Aus dem Diagramm geht hervor, dass im vorliegenden Fall Tauwasser in der Schichtgrenze anfällt (vergleiche Bild 8 Fall b)) /Sch06/.



**Bild 33:** Glaser-Diagramm der Wand

Mit den beiden Gleichungen 1 und 2 kann die Tauwassermenge  $m_{W,T}$  und die Verdunstungsmenge  $m_{W,V}$  bestimmt werden. Die Parameter für die Gleichungen sind dem Fall b) aus Bild 8 zu entnehmen. Die Werte entstammen der Berechnung aus Tabelle 12. Da sich bei diesem Wandaufbau Tauwasser nur in einer Schichtgrenze bildet, fällt der Parameter  $s_{dz}$  weg. Für die Dauer der Tauperiode werden  $t_T = 1440$  Stunden (entspricht 60 Tagen) sowie  $t_V = 2160$  Stunden (entspricht 90 Tagen) für die Verdunstungsperiode angesetzt.

Eine Tauwasserbildung in Bauteilen ist unschädlich, wenn durch Erhöhung des Feuchtegehaltes der Bau- und Dämmstoffe der Wärmeschutz und die Standsicherheit der Bauteile nicht gefährdet werden. So darf die Tauwassermenge  $m_{W,T}$  den Wert von  $1 \text{ kg/m}^2$  nicht überschreiten und das sich gebildete Tauwasser muss die Möglichkeit haben, in der Verdunstungsperiode aus dem Bauteil zu gelangen ( $m_{W,V} > m_{W,T}$ ) /Sch06/.

Für das vorliegende Beispiel wurden die Tauwassermenge sowie die Verdunstungsmenge berechnet. Die Ergebnisse können Tabelle 13 entnommen werden. Die vorhandenen Werte sind deutlich kleiner als die Grenzwerte.

**Tabelle 13:** Tauwassermenge  $m_{W,T}$ , Verdunstungsmenge  $m_{W,V}$  und Grenzwerte für die Tauwasserbildung

| Bestimmungsgröße            | Einheit           | Wert  | Grenzwert   |
|-----------------------------|-------------------|-------|-------------|
| 1                           | 2                 | 3     | 4           |
| Tauwassermenge $m_{W,T}$    | kg/m <sup>2</sup> | 0,307 | < 1,0       |
| Verdunstungsmenge $m_{W,V}$ |                   | 0,714 | > $m_{W,T}$ |

### 6.3 Herstellung der Wände im Fertigteilwerk

Die Herstellung der BIS-Platten wurde bereits in Kapitel 4.6 erläutert. Für die Verfüllung der Wände mit dem SVPLB wurden zunächst zwei unterschiedliche Systeme aufgebaut. Die Wände sollten vertikal und horizontal betoniert werden. In Bild 34 sind die Schalungen inkl. BIS dargestellt. Für die horizontale Betonage (Bild 34 a)) war das Auflegen der zweiten BIS auf den SVPLB vorgesehen. Zum Vermeiden des Absinkens der BIS wurden Abstandhalter in die Schalung eingelegt. Bei der vertikalen Schalung (Bild 34 b)) wurde die BIS gemäß der Berechnung aus Kapitel 4.4 durch sechs horizontale Träger unterstützt. Die Seitenschalung wurde durch eine übliche Schalhaut, die ebenfalls durch horizontale Träger unterstützt wurde, gebildet.



a)



b)

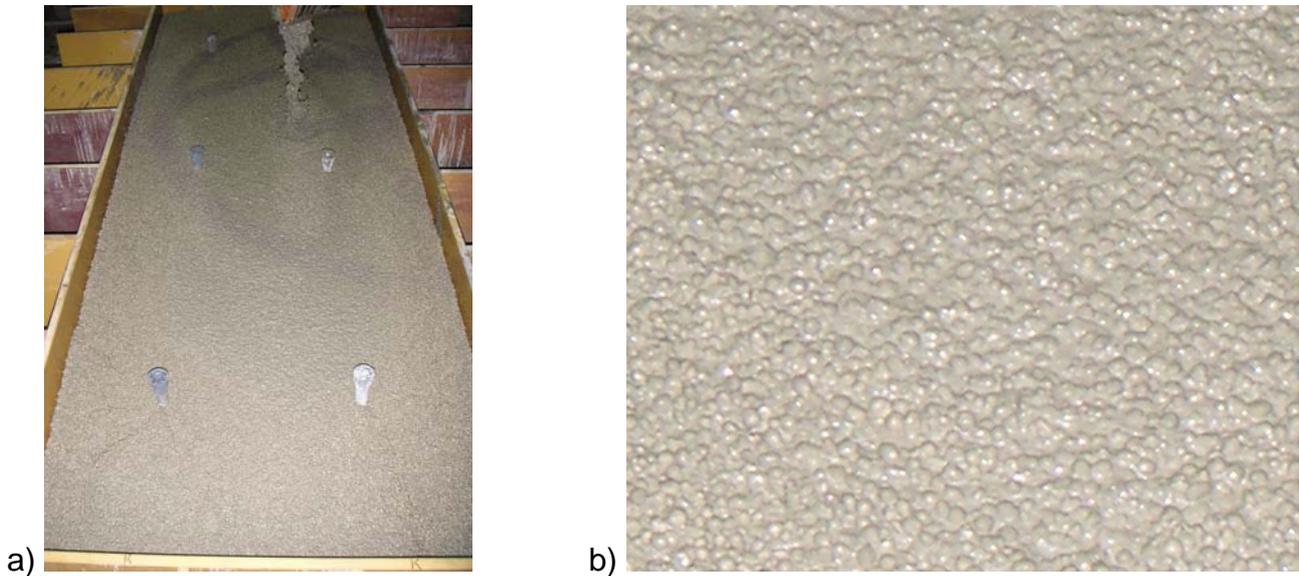
**Bild 34:** Schalung a) für die horizontale und b) für die vertikale Betonage

Der SVPLB wurde in einem Planetenmischer gemischt. Für die Betonage der zwei Wände wurden 2 m<sup>3</sup> Beton benötigt. Im Gegensatz zu den Laborversuchen konnte die leichte Gesteinskörnung im Werk nicht vorgeweicht werden. So wurde das gesamte Zugabewasser unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme den Feststoffen zugegeben und anschließend das Fließmittel untergerührt. Der Schaum wurde mit dem Schaumgenerator hergestellt, wobei der Schlauch im Gegensatz zu den Laborversuchen direkt in den Mischer gehalten wurde. Die Schaummenge wurde über die Zeit ermittelt. Zur Überprüfung der Eigenschaften wurden die Rohdichte und das Setzfließmaß bestimmt. Die Rohdichte betrug 520 kg/m<sup>3</sup> und das Setzfließmaß 670 mm (Bild 35).



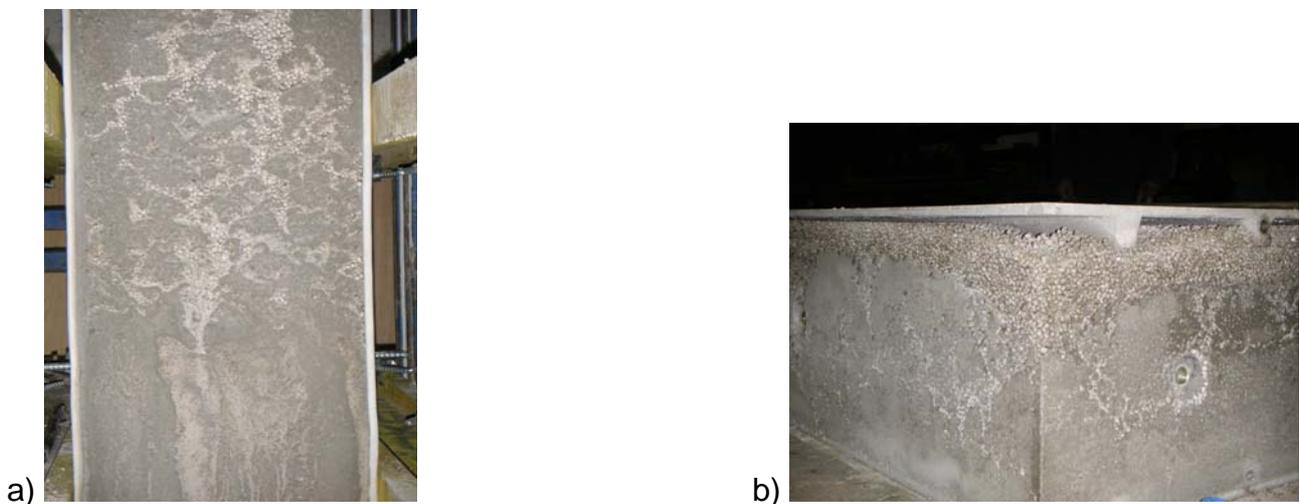
Bild 35: Setzfließmaß (670 mm) des im Werk hergestellten SVPLB

Nach optischem Eindruck entsprach der Beton dem im Labor hergestellten Beton (Bild 36 a)). Er wurde in einen Kübel gefüllt und zur Schalung transportiert. Schon während des Transports flossen einige Liter Zementleim aus dem Kübel heraus. Bei der Betonage der Wände war der Beton sehr flüssig und wies schon nicht mehr die typische schaumige Konsistenz auf. Die Gesteinskörnung schwamm auf und war nicht vollständig mit Zementleim umhüllt (Bild 36 b)).



**Bild 36:** a) Verfüllung der horizontalen Schalung mit dem SVPLB, b) aufschwimmende Gesteinskörnung

Beim Ausschalen nach einem Tag wurde das Ausmaß der Sedimentation des Zements bzw. des Aufschwimmens der leichten Gesteinskörnung deutlich (Bilder 37 a) und b)). Der Zementleim hatte sich unten abgesetzt, während sich in der Mitte die Gesteinskörnung der Korngrößen 1 bis 2 mm und oben die größere Gesteinskörnung (4 bis 8 mm) befindet. Bei der horizontal betonierte Wand stellte sich zudem kein richtiger Verbund nach Auflegen der BIS auf den SVPLB ein, da an der Oberseite keinerlei Zementleim mehr vorhanden war (Bild 37b).



**Bild 37:** a) und b) Aufschwimmen der leichten Gesteinskörnung

Nach diesen Ergebnissen schien es nicht sinnvoll, weitere Wände im Fertigteilwerk herzustellen. Das vor dem Mischen wichtige Vornässen der Gesteinskörnung war im Fertigteilwerk nicht durchzuführen. Aber nur so waren stabile Mischungen reproduzierbar herzustellen.

## **6.4 Herstellung am ibac**

### **6.4.1 Allgemeines**

Dem ibac steht lediglich ein 150-l-Mischer zur Verfügung, weshalb zum Verfüllen der Wände 10 Chargen á 100 l vorgesehen waren.

### **6.4.2 Wand 1**

Zur Betonage der ersten Wand wurde die Wandschalung vertikal aufgebaut. Der Beton wurde aus dem Mischer in einen Betonkübel gefüllt. Anschließend wurde er über einen langen Schlauch an der Kopfseite entlang in die Schalung eingefüllt. Zunächst war kein Entlüften oder Absacken des Betons zu erkennen. Die Betonierhöhe einer Mischerladung betrug ca. 30 cm. Nach der fünften Betonage waren allerdings eine deutliche Entlüftung und ein Absacken des Betons zu erkennen. Anfangs sackte der Beton um etwa 2 cm ab, nach der neunten Betonage konnten ca. 20 cm gemessen werden (s. Bild 38).



**Bild 38:** Entlüften und Absacken des SVPLB bei der Herstellung von Wand 1

Durch das Absacken des SVPLB mussten schließlich anstelle von 10 Betonmischungen 13 Mischungen in die Wandschalung gefüllt werden. Das Absacken des Betons, welches zuvor bei der Mischungsoptimierung lediglich bei Frischbetonrohddichten um  $400 \text{ kg/m}^3$  beobachtet werden konnte, stellte sich auch bei den Zylindern ein, die während der Wandbetonage zusätzlich hergestellt wurden. Als mögliche Ursache für das Zusammensacken des Betons wurde zunächst die Frischbetontemperatur angesehen, die zwischen  $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $26,5 \text{ }^\circ\text{C}$  lag. Bei der Mischungsoptimierung lag sie bei maximal  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 6.4.3 Wand 2

Vor der Betonage der zweiten Wand wurde das Verhalten des Betons ohne die Zugabe von Fließmittel untersucht, da bei den hohen Frischbetontemperaturen ein negativer Einfluss des Fließmittels auf den Schaum vermutet wurde. Der Beton musste nun allerdings verdichtet werden, da er ohne Fließmittel keine ausreichenden selbstverdichtenden Eigenschaften mehr aufwies. Das Setzfließmaß betrug noch etwa  $520 \text{ mm}$  bei einer Frischbetonrohddichte von  $500 \text{ kg/m}^3$ . Der Einfluss des Rüttelns auf den Beton wurde bei Verwendung eines Innenrüttlers und mittels einer Rüttelplatte untersucht. Die Verdichtungszeit betrug  $5$  und  $10$  Sekunden. An der Rohddichte des Betons änderte sich dabei jeweils nichts. Die hergestellten Probezylinder wiesen kein Absacken des Betons und auch keine Sedimentationserscheinungen auf. Daher wurde der Beton bei der 2. Wandbetonage ohne Fließmittel hergestellt.

Die Schalung wurde auch hierbei wieder vertikal errichtet. Zur Erfassung der Hydratationswärme wurden 2 Temperatursensoren in  $1 \text{ m}$  und  $2 \text{ m}$  Höhe einbetoniert. Der Beton wurde wie zuvor bei Wand 1 durch einen Schlauch in die Schalung eingebracht und mit Hilfe des Innenrüttlers verdichtet. Die Betonierabschnitte betragen wieder knapp  $30 \text{ cm}$ . Bis zur fünften Mischung traten keine Entlüftungserscheinungen auf. Vor Einfüllen der sechsten Mischung war jedoch auch bei Wand 2 wieder ein Absacken des Betons um  $3 \text{ cm}$  festzustellen. Die weiteren Mischungen sackten jeweils um weitere max.  $5 \text{ cm}$  ab. Wie zuvor bei Wand 1 wurden daher 13 Mischungen anstelle von 10 Mischungen zum Befüllen der Wandschalung benötigt. Bei den während der Wandbetonage hergestellten Zylindern trat ein Absacken von max.  $1 \text{ cm}$  auf.

#### 6.4.4 Wand 3 und Wand 4

Vor der Herstellung weiterer Wände wurden Versuche an unterschiedlich eingestellten Schäumen durchgeführt, da das Zusammensacken des Betons mit der Stabilität des Schaums in Verbindung gebracht wurde. Bei Temperaturen von 20, 25 und 30 °C wurde das Drainageverhalten des Schaums untersucht. Es waren jedoch keine großen Unterschiede im Wasserabsonderungsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur feststellbar. Weitere Versuche mit unterschiedlichen Einstellungen des Schaumgenerators hinsichtlich Variation des Wasserdrucks oder des Verhältnisses von Schaumbildner zu Wasser brachten ebenfalls keinerlei Aufschluss. Vermutlich war das Eigengewicht des Betons bei den Wandherstellungen zu groß, so dass der Beton entlüftete. Um dennoch im Rahmen des Projekts Wände herstellen zu können, wurden schließlich Betonversuche unter Verwendung von Schnellzement durchgeführt, da durch das schnelle Erstarren ein Absacken des Betons verhindert werden sollte. Nach mehreren erfolgreichen Versuchen wurde beschlossen, 2 weitere Wände unter Verwendung von Schnellzement herzustellen. Die Dichte und die spezifische Oberfläche des Schnellzements sind in Tabelle A4 enthalten. Sie sind mit denen des CEM I 52,5 R vergleichbar.

Um zudem die gesamte Betonierhöhe zu verringern und so den hydrostatischen Druck zu reduzieren, wurde die Schalung für die Wände 3 und 4 schließlich seitlich aufgestellt (s. Bild 39).



Bild 39: Seitliches Aufstellen der Schalung für die Wände 3 und 4

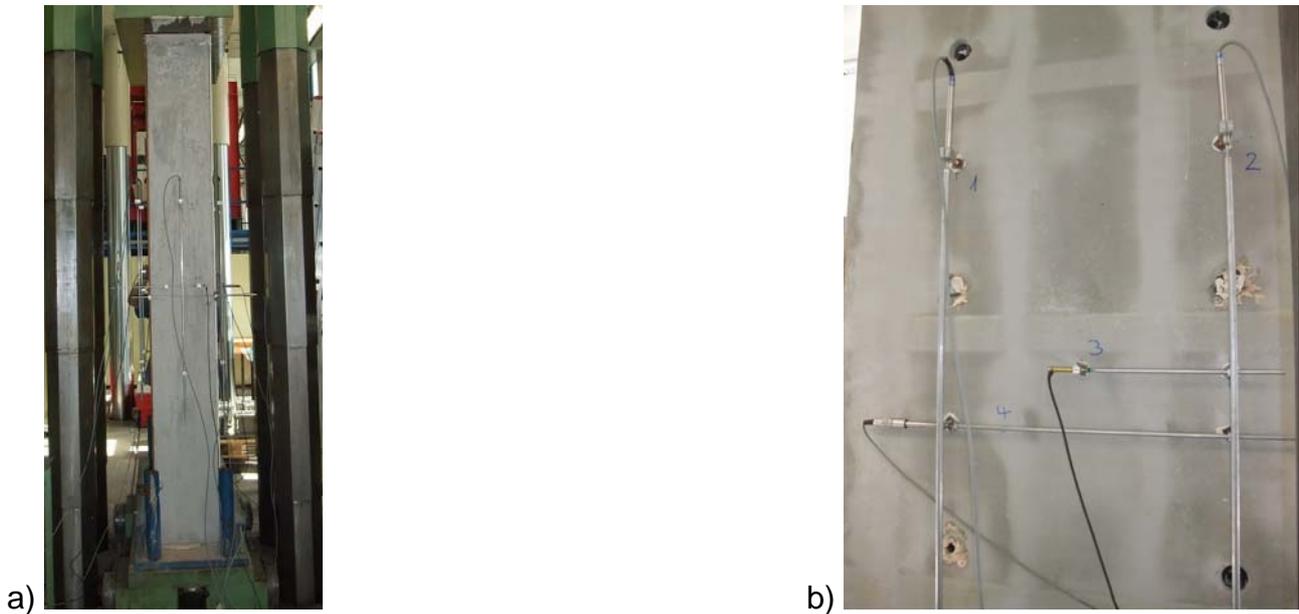
Die Arbeitsabläufe bei der Herstellung des SVPLB mit dem Schnellzement mussten sehr koordiniert ablaufen, da der Beton bereits nach 25 Minuten anstifte, das Mischen aber bis zu 15 Minuten dauern konnte. Das Setzfließmaß des Betons lag bei Verwendung des Schnellzements bei 550 bis 600 mm bei einer Frischbetonrohichte von  $500 \text{ kg/m}^3$ . Bei diesem Setzfließmaß wird i. A. nicht von selbstverdichtenden Eigenschaften gesprochen, jedoch floss der Beton nach optischem Eindruck sehr gut, weshalb nicht noch mehr Fließmittel hinzugegeben wurde. Das Befüllen der Wände erfolgte über eine Rutsche. Unter den Stegen wurde bei Wand 4 etwas nachverdichtet, da bei der Betonage von Wand 3 festgestellt wurde, dass der Beton sich nicht vollständig ausnivellierte. Die Füllhöhe einer Charge betrug etwa 8 cm. Vor Befüllen mit der nächsten Mischung war die zuvor betonierte Mischung bereits fest, so dass der Beton nicht absacken konnte. Von jeder Mischung wurden Probekörper zur Überprüfung der Festbetoneigenschaften hergestellt. So wurden insgesamt jeweils 11 Mischungen zum Befüllen der Wände 3 und 4 benötigt. Bei Wand 4 wurde zudem die Entwicklung der Hydratationswärme in 40 und 60 cm Höhe aufgezeichnet.

## **7 WANDPRÜFUNG**

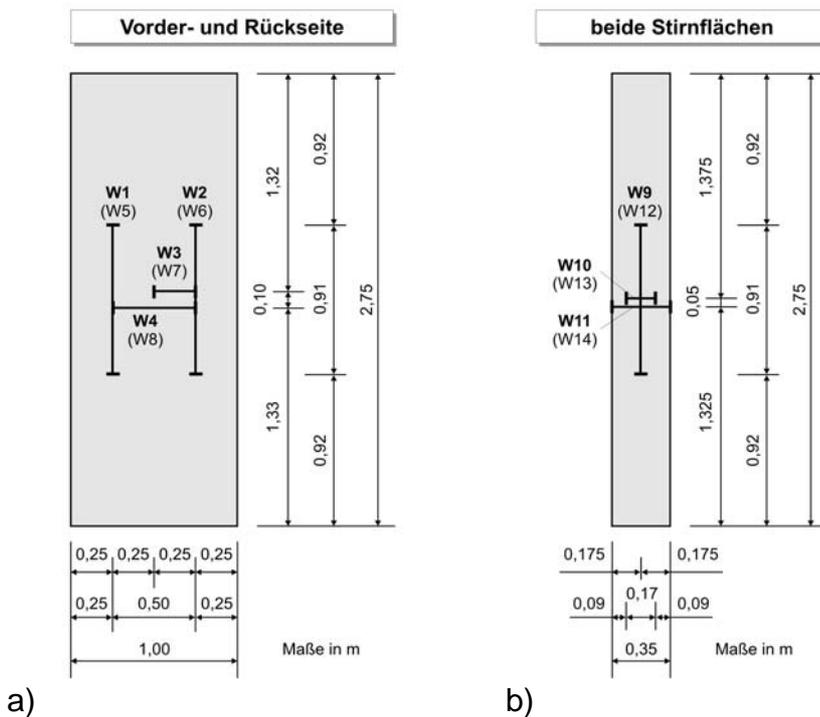
### **7.1 Allgemeines**

Alle Wände wurden in einer 5 MN-Prüfmaschine hinsichtlich ihrer zentrischen Druckfestigkeit geprüft. Die exzentrische Prüfung wurde aufgrund der Probleme mit dem SVPLB bei der Wandherstellung verworfen, um zumindest jeweils 2 Wände mit ähnlichen Eigenschaften des SVPLB miteinander vergleichen zu können. Beim Einbau in den Prüfraumen wurden die Wände jeweils oben und unten mit Gips abgeglichen, um eine gleichmäßige Lasteinleitung sicherzustellen.

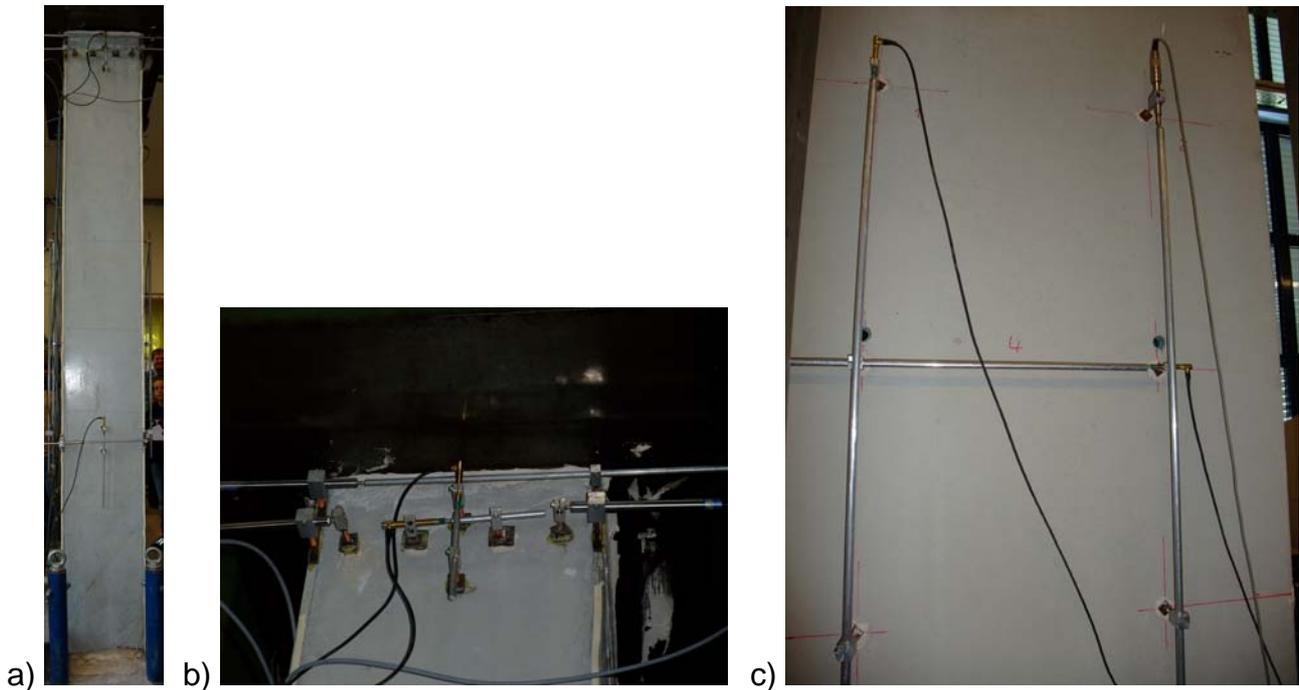
Zur Aufzeichnung der Verformungen der Wände während der Prüfung wurden induktive Wegaufnehmer zum einen auf beiden BIS-Seiten und zum anderen an den Stirnseiten auf dem SVPLB angebracht. Der Prüfaufbau und die Anordnung der Wegaufnehmer sind für die Wände 1 bis 3 identisch und können exemplarisch den Bildern 40 und 41 entnommen werden. Bei Wand 4 wurde die bei den Prüfungen festgestellte Ablösung der BIS-Elemente im Lasteinleitungsbereich besonderes betrachtet. Hier wurden allein im oberen Bereich fünf Wegaufnehmer angeordnet (s. Bilder 42 und 43). Die Wände wurden jeweils 28 Tage nach Verfüllung mit dem SVPLB geprüft. Die BIS-Platten hatten bei den Wänden 1 und 2 ein Alter von ca. 4 Monaten, bei den Wänden 3 und 4 bereits ein Alter von 12 Monaten.



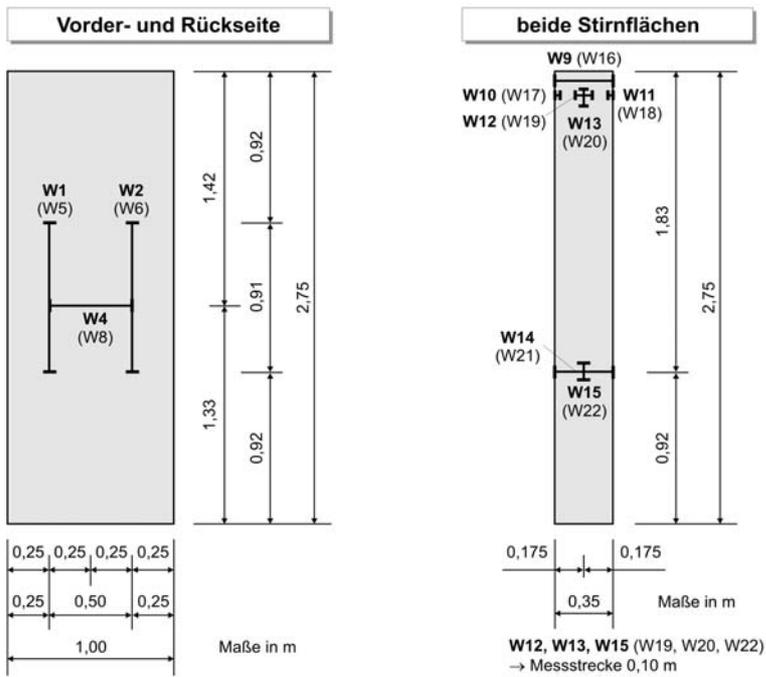
**Bild 40:** a) Prüfaufbau der Wände 1 bis 3 zur Bestimmung der zentrischen Druckfestigkeit, b) Anordnung der Wegaufnehmer der Wände 1 bis 3 auf der BIS



**Bild 41:** Anordnung der Wegaufnehmer bei den Wänden 1 bis 3; a) auf den BIS-Flächen, b) auf den Stirnflächen



**Bild 42:** a) Prüfaufbau der Wand 4 zur Bestimmung der zentrischen Druckfestigkeit, Anordnung der Wegaufnehmer der Wand 4 im oberen Stirnbereich b) und auf der BIS c)



a) b)

**Bild 43:** Anordnung der Wegaufnehmer bei Wand 4; a) auf den BIS-Flächen, b) auf den Stirnflächen

## 7.2 Wand 1

### 7.2.1 Allgemeines

Das Gewicht von Wand 1 betrug beim Einbau in den Prüfstand 873 kg. Die Stirnseiten wiesen eine dünne Zementleimschicht auf, die leicht einzudrücken war. Darunter war jedoch ein relativ festes Gefüge vorhanden. Vereinzelt waren Schwindrisse im SVPLB zu beobachten.

### 7.2.2 Zentrische Druckfestigkeit

Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. Nach etwa 4 Minuten traten bei einer Last von 1160 kN und einer Dehnung von 1,5 mm/m aufgrund des Ablösens der BIS vom SVPLB und des Ausbeulens der BIS vermehrt geringe Lastabfälle um ca. 100 kN auf (s. Bild 44). Anschließend konnte die Last jedoch noch auf 1180 kN bei einer Dehnung von 3,3 mm/m gesteigert werden. Diese Höchstlast entspricht einer Druckfestigkeit von 3,4 N/mm<sup>2</sup> bezogen auf den gesamten Wandquerschnitt. In Bild 44 ist die Last über die Verformung aufgetragen.

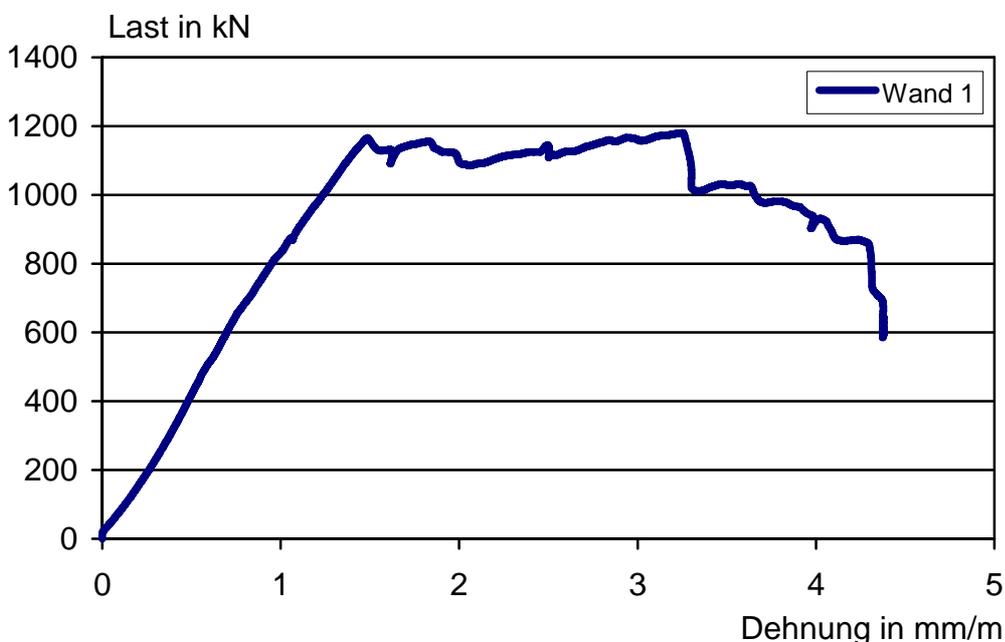
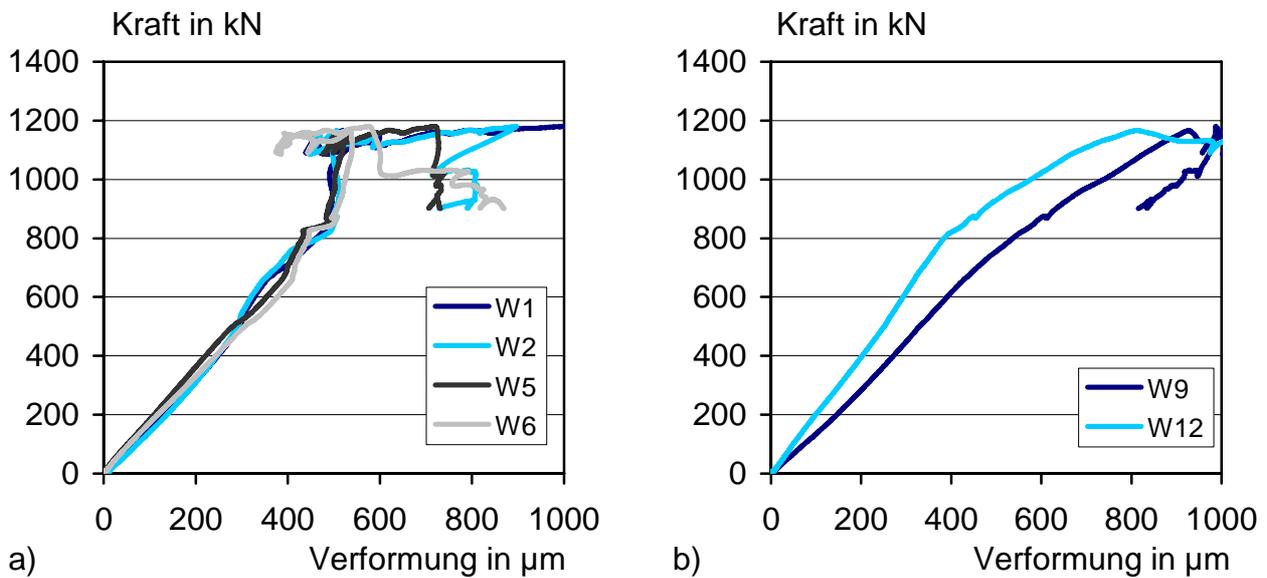


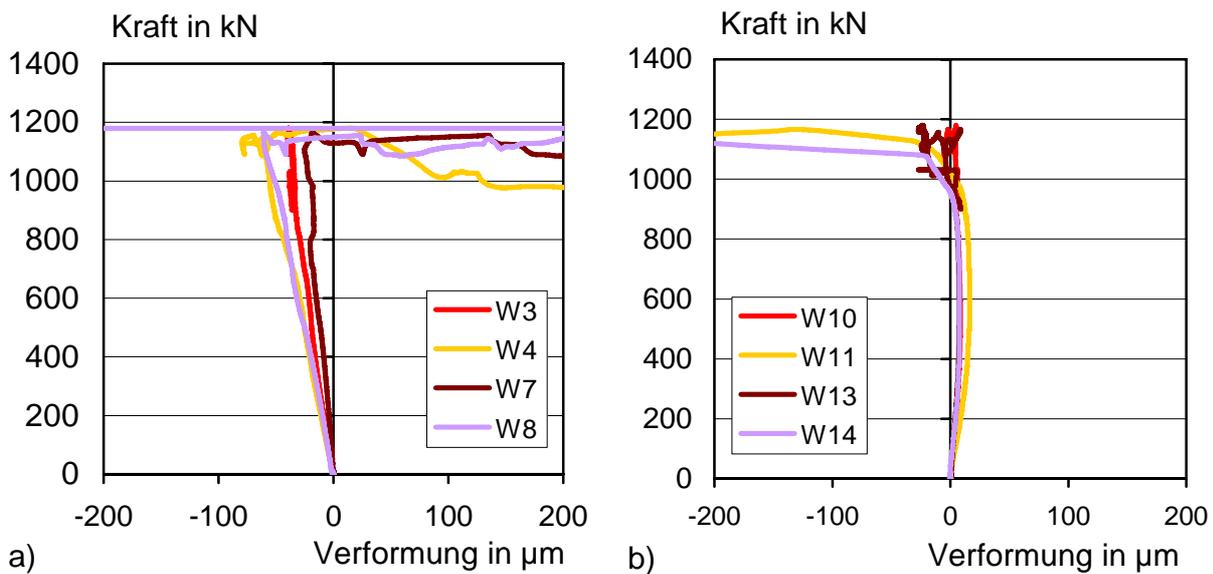
Bild 44: Last-Verformungskurve Wand 1

### 7.2.3 Versagensverhalten

In den Bildern 45 und 46 sind die Längs- und Querverformungen getrennt nach Vorder- und Rückseite sowie den Stirnflächen dargestellt. Es fällt auf, dass bei dieser Wand die Längsverformungen aller Seiten bis zu einer Last von 800 kN nahezu gleich zunehmen. Damit kann zumindest bis zu dieser Laststufe von einer Tragwirkung im Verbund ausgegangen werden.



**Bild 45:** a) Längsverformung der Vorder- und Rückseite, b) Längsverformung der Stirnseiten



**Bild 46:** a) Querverformung der Vorder- und Rückseite, b) Querverformung der Stirnseiten

Während der weiteren Laststeigerung lösten sich zunächst BIS und SVPLB langsam von oben nach unten voneinander ab. Im weiteren Verlauf beulte die BIS im oberen Teil der Wand aus, während im SVPLB Risse auftraten, die schließlich zum Abplatzen des Betons führten (s. Bild 47 a)). Das Beulen der BIS führte ebenfalls zu Rissen im Textilbeton (s. Bild 47 b)).



a)



b)

**Bild 47:** a) Beulen der BIS und Abplatzen des SVPLB, b) Riss in der BIS

Das Beulen der BIS-Elemente ist im Längsverformungsverlauf (s. Bild 45 a)) erkennbar. Durch das Beulen im oberen Bereich der Elemente stagnieren die Längsverformungen in Wandmitte. Der Schaumbeton wird weiter gestaucht, so dass dessen Verformungen weiter zunehmen (s. Bild 45 b)).

Die Querverformungen (s. Bild 46) sowohl der BIS-Elemente als auch des Schaumbetons nehmen bis zum Erreichen der Höchstlast relativ geringe Werte an.

Zwischen BIS und SVPLB war im Bereich der Stege zum Teil ein guter Verbund vorhanden. Der Haftverbund lag über der Haftzugfestigkeit des Schaumbetons. Durch das Ausbeulen der BIS wurde der GFK-Stab eines Steges freigelegt (s. Bild 48 a)). Die Struktur des SVPLB ist mit Riss in Bild 48 b) vergrößert dargestellt.

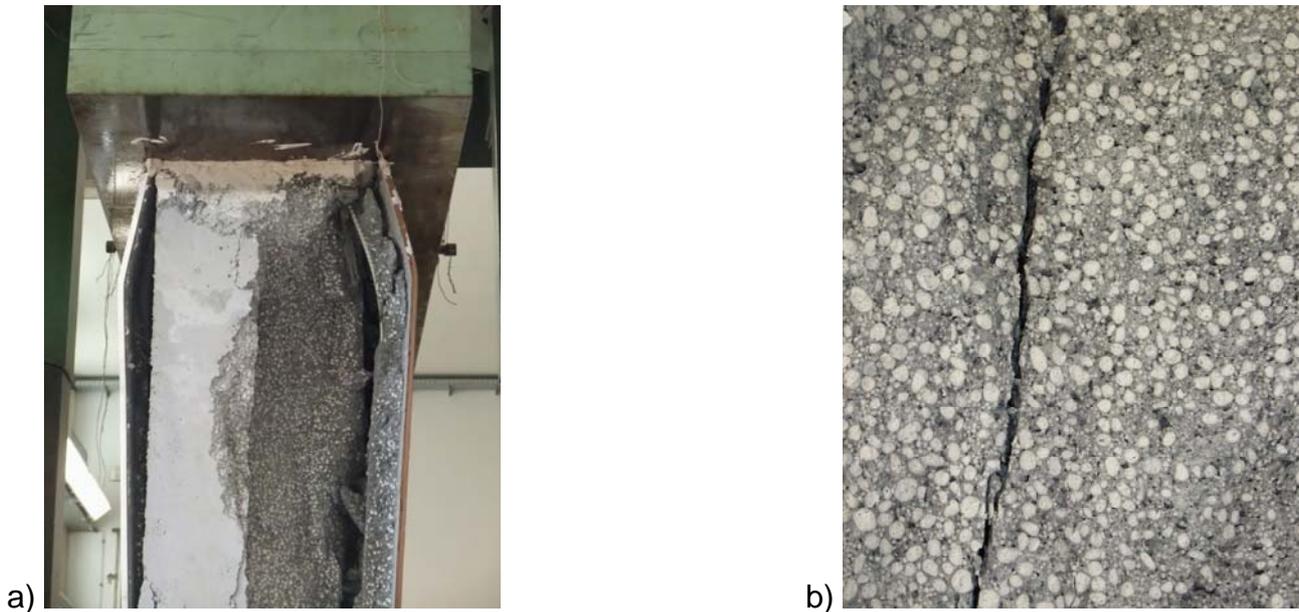


Bild 48: a) Freilegen des GFK-Stabes, b) Struktur des SVPLB

## 7.2.4 Kennwerte des SVPLB

### 7.2.4.1 Allgemeines

Aus der Wand wurden Bohrkerne zur Bestimmung der Druckfestigkeit entnommen sowie die Haftzugfestigkeit zwischen BIS und SVPLB überprüft. Aufgrund des Zusammensackens der Wand und dem mehrmaligen Nachfüllen wurde eine deutlich höhere Rohdichte des SVPLB erwartet.

### 7.2.4.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der entnommenen Bohrkerne ( $\varnothing = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 100 \text{ mm}$ ) ergab sich nach 28 Tagen zu  $7,5 \text{ N/mm}^2$  bei einer Festbetonrohichte von  $820 \text{ kg/m}^3$ .

### 7.2.4.3 Haftzugprüfung

Die vier Prüfstellen für die Haftzugprüfungen von Wand 1 befanden sich in 0,35 m bzw. 0,84 m Höhe der Wand, jeweils 0,25 m vom Rand entfernt. Der obere Teil der Wand war durch die Prüfung zu sehr geschädigt. Zunächst wurde durch die BIS etwa 1 cm in den SVPLB gebohrt und ein Stempel ( $\varnothing = 45$  mm) auf die BIS geklebt. Anschließend wurde mit dem Haftzuggerät mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 20 N/s gleichmäßig bis zum Versagen gezogen. An 2 Stellen versagte der SVPLB, an den anderen beiden Stellen trat ein partielles Versagen der Fuge BIS/SVPLB ein. Das Hauptversagen fand jedoch auch hier innerhalb des SVPLB statt. In Tabelle 14 sind die Haftzugfestigkeiten der vier Messstellen aufgelistet.

Tabelle 14: Haftzugfestigkeiten von Wand 1

| Messstelle | $\beta_{Hz}$      | Bemerkung  |
|------------|-------------------|--|
| -          | N/mm <sup>2</sup> | -  |
| 1          | 2                 | 3  |
| 1          | 0,17              | ca. zu 35 % Versagen der Fuge, Restversagen im SVPLB |
| 2          | 0,66              | Versagen im SVPLB                                    |
| 3          | 0,51              | ca. zu 15 % Versagen der Fuge, Restversagen im SVPLB |
| 4          | 0,70              | Versagen im SVPLB                                    |

In Bild 49 ist ein Probekörper nach der Haftzugprüfung mit Versagen im SVPLB dargestellt.



Bild 49: Versagensbild eines Prüfkörpers von Wand 1 nach der Haftzugprüfung

## 7.3 Wand 2

### 7.3.1 Allgemeines

Wand 2 hatte ein Gewicht von 826 kg. Die äußerste Zementleimschicht war teilweise bereits beim Entschalen der Stirnseiten an der Schalung haften geblieben, weshalb das poröse Gefüge erkennbar war. Zum Zeitpunkt der Wandprüfung waren bereits deutliche Schwindrisse vorhanden.

### 7.3.2 Zentrische Druckfestigkeit

Die Prüfgeschwindigkeit betrug wiederum 1 mm/min. In Bild 50 ist die Last über die Verformung aufgetragen. Nach einer Belastung von etwa 450 kN trat nach 2 Minuten ein geringer Steifigkeitsabfall auf, die Last konnte nach 4 Minuten jedoch bis auf 846 kN bei einer Dehnung von 1,6 mm/m gesteigert werden. Diese Höchstlast entspricht einer Druckfestigkeit von 2,4 N/mm<sup>2</sup>.

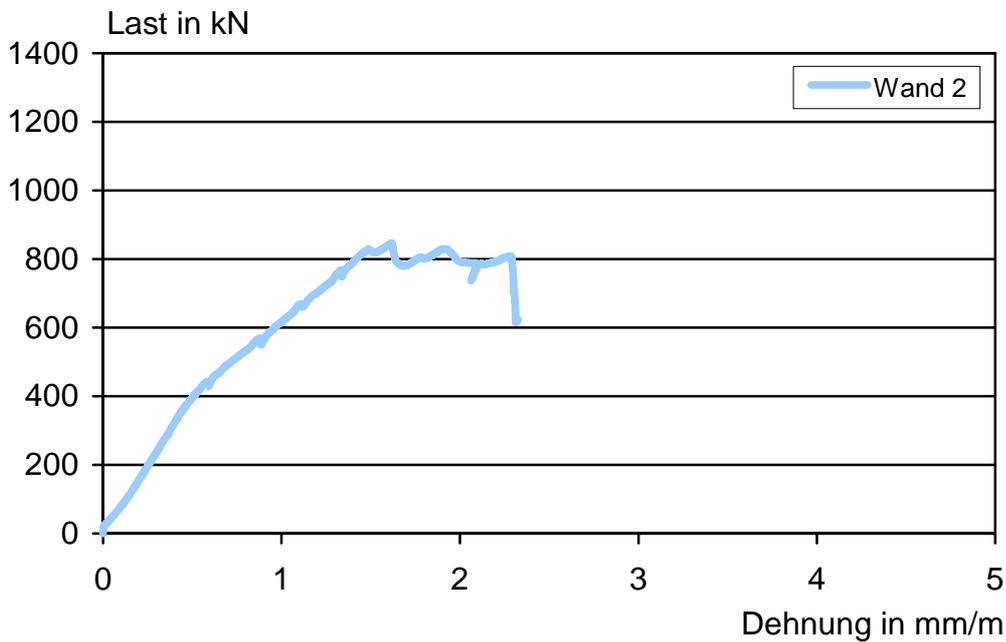


Bild 50: Last-Verformungskurve Wand 2

### 7.3.3 Versagensverhalten

Die Längs- und Querverformungen der Vorder- und Rückseite sowie der Stirnflächen der Wand 2 sind in den Bildern 51 und 52 dargestellt.

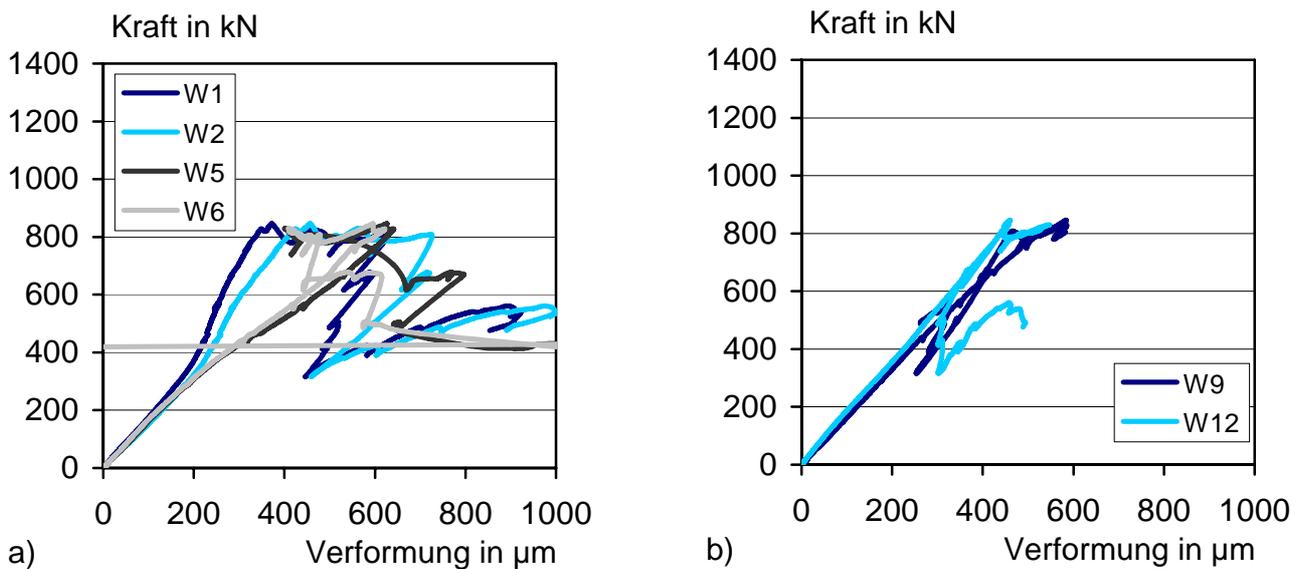
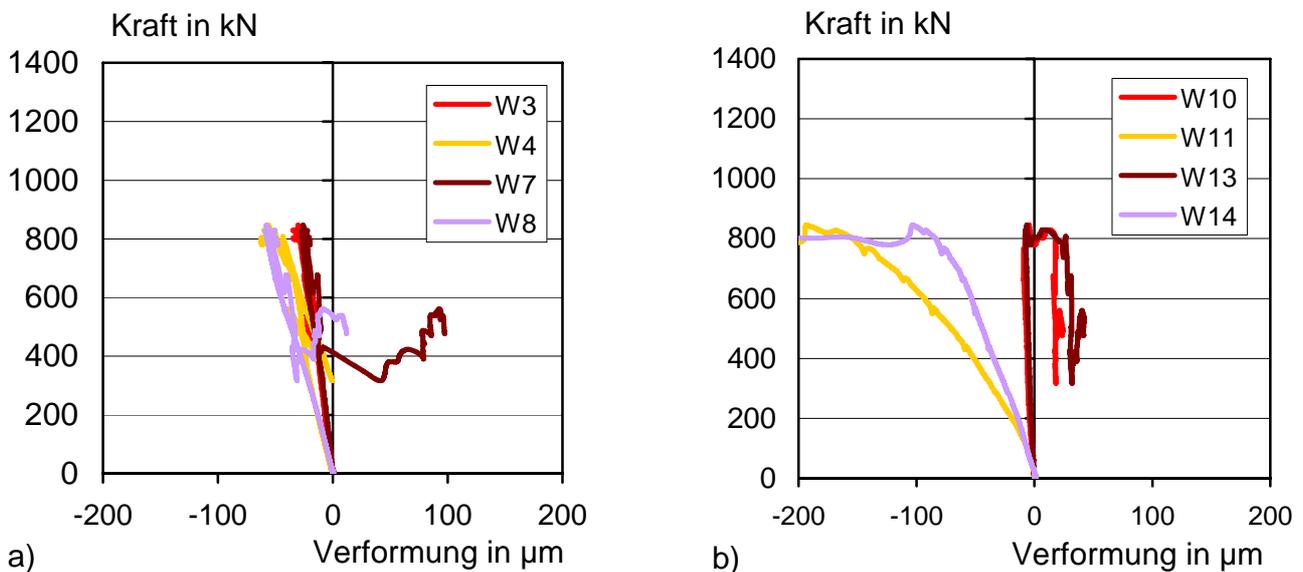


Bild 51: a) Längsverformung der Vorder- und Rückseite, b) Längsverformung der Stirnseiten



**Bild 52:** a) Querverformung der Vorder- und Rückseite, b) Querverformung der Stirnseiten

Auch bei dieser Wand entwickelten sich zunächst Risse in den beiden Fugen zwischen BIS und SVPLB von oben nach unten. Die Längsverformungen (s. Bild 51) nahmen bis zu einer Last von 400 kN kontinuierlich zu. Im Gegensatz zu Wand 1 beulte die BIS jedoch nicht aus, sondern knickte auf einer Seite in ca. 1,8 m Höhe seitlich aus. Dieses Ausknicken wird in Bild 51 deutlich. Die Verformungen, die von den Wegaufnehmern W1 und W2, die auf der ausgeknickten Seite angeordnet waren, aufgezeichnet wurden, stagnieren, während die Verformungen der anderen Seite (W5 und W6) weiter zunehmen. Der SVPLB wird während der gesamten Prüfung gestaucht (s. Bild 52).

Die nicht ausgeknickte Seite der BIS blieb trotz eines sichtbaren Risses zunächst vollständig am SVPLB haften (Bild 53 a)). Im SVPLB bildeten sich ein größerer Riss und wenige kleine Risse. Es traten nur leichte Abplatzungen im Bereich der Druckeinleitung auf. Nachdem die Höchstlast erreicht war und die Wand dennoch weiter belastet wurde, löste sich schließlich auch die zweite BIS in einer Höhe von ca. 1,30 m seitlich vom SVPLB. Die Stege wurden von der BIS-Platte abgerissen und die GFK-Stäbe freigelegt (Bild 53 b)).



Bild 53: a) Seitliches Ablösen der BIS, b) Freilegen des GFK-Stabs

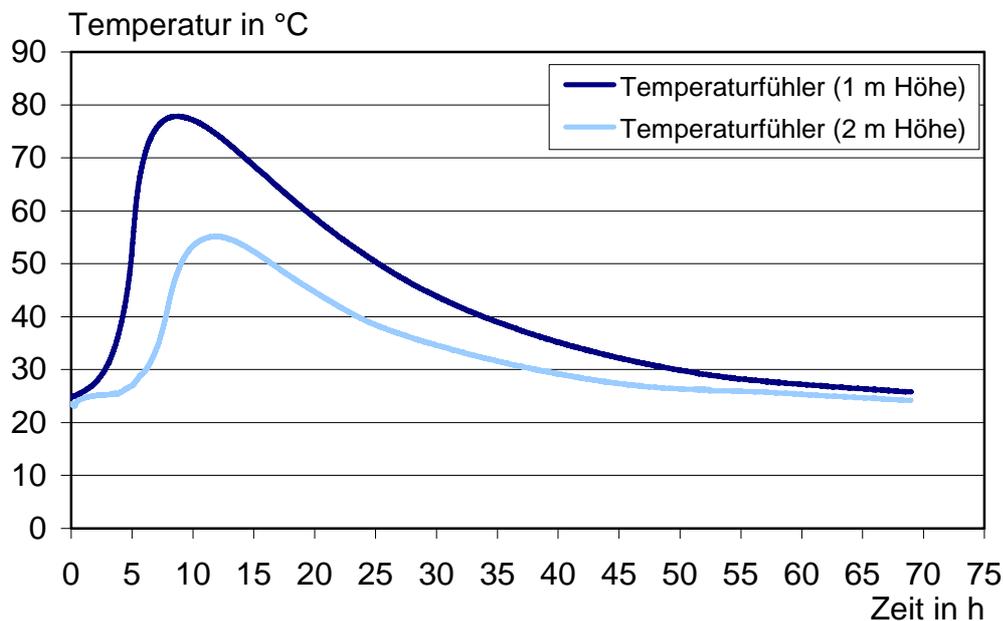
### 7.3.4 Kennwerte des SVPLB

#### 7.3.4.1 Allgemeines

Bei Wand 2 wurden während der Betonage Sensoren zur Erfassung der Hydratationswärmeeentwicklung einbetoniert. Des Weiteren wurden Probekörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit des SVPLB hergestellt. Nach der Wandprüfung wurden Bohrkern zur Bestimmung der Druckfestigkeit entnommen sowie die Haftzugfestigkeit zwischen BIS und SVPLB überprüft.

#### 7.3.4.2 Temperaturentwicklung

Bild 54 zeigt die Entwicklung der Temperatur. Der Start der Messung erfolgte, nachdem der erste Temperatursensor in 1 m Höhe in den Beton gelegt wurde. Die Maximaltemperatur ergab sich nach 9 Stunden in 1 m Höhe zu 78 °C. In 2 m Höhe betrug die Temperatur nach 12 Stunden 55 °C (Bild 54). Da der zweite Sensor ca. 3 Stunden nach dem ersten Sensor einbetoniert wurde, tritt das Maximum relativ zum Zeitpunkt der Betonherstellung nach 9 Stunden auf. Die Temperatur des Sensors in 1 m Höhe ist größer, da die Wärme nicht so schnell nach oben entweichen konnte wie auf Höhe des zweiten Sensors.



**Bild 54:** Temperaturentwicklung des SVPLB in Wand 2

### 7.3.4.3 Druckfestigkeit

Die parallel zu Wand 2 hergestellten Probekörper hatten nach 28 Tagen eine sehr geringe Druckfestigkeit von  $0,46 \text{ N/mm}^2$  bei einer Festbetonrohddichte von  $470 \text{ kg/m}^3$ . Die aus der Wand entnommenen Bohrkern hatten aufgrund des Zusammensackens des Betons und des Auffüllens der Wände eine Rohddichte von  $760 \text{ kg/m}^3$  und eine Druckfestigkeit von  $3,2 \text{ N/mm}^2$ .

### 7.3.4.4 Haftzugprüfung

Bei Wand 2 versagte der Verbund zwischen BIS und SVPLB bereits beim Bohren der Prüfstellen. Daher wurden quadratische Prüfstellen ( $90 \text{ mm} \cdot 90 \text{ mm}$ ) mit einem Winkelschleifer gesägt. An zwei Stellen trat auch hier schon beim Sägen ein Versagen des Verbundes ein. An den anderen vier Prüfstellen ergaben sich Haftzugfestigkeiten von  $0,05 \text{ N/mm}^2$  bis  $0,11 \text{ N/mm}^2$ . Das Versagen erfolgte hier jedoch auch zwischen BIS und SVPLB und nicht innerhalb des SVPLB (s. Bild 55). Der Verbund BIS/SVPLB war bei Wand 2 also deutlich geringer als bei Wand 1, was sich im Versuch durch ein Ablösen der BIS schon bei ca.  $400 \text{ kN}$  bemerkbar machte.



**Bild 55:** Versagensmechanismus eines Prüfkörpers von Wand 2 nach der Haftzugprüfung

## **7.4 Wand 3**

### **7.4.1 Allgemeines**

Das Gewicht von Wand 3 betrug 693 kg. Eine der Stirnseiten wies eine sehr glatte Oberfläche auf, da diese Seite während der Betonage den Boden darstellte. Die Oberseite dagegen zerbröselte sehr schnell, da der SVPLB mit dem Schnellzement zu schnell fest wurde und die Oberfläche nicht sofort abgedeckt worden war. Vereinzelt waren Schwindrisse zu erkennen.

### **7.4.2 Zentrische Druckfestigkeit**

Auch bei Wand 3 betrug die Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min. In Bild 56 ist die Last über die Verformung aufgetragen. Die Last stieg in 8 Minuten bis zum Maximum von 733 kN und fiel dann schlagartig ab. Diese Höchstlast entspricht einer Druckfestigkeit von 2,1 N/mm<sup>2</sup>. Auffällig bei dieser Wandprüfung ist die Dehnung von fast 3,0 mm/m. Bei den Wänden 1 und 2 waren die Verformungen bei der Höchstlast etwa halb so groß.

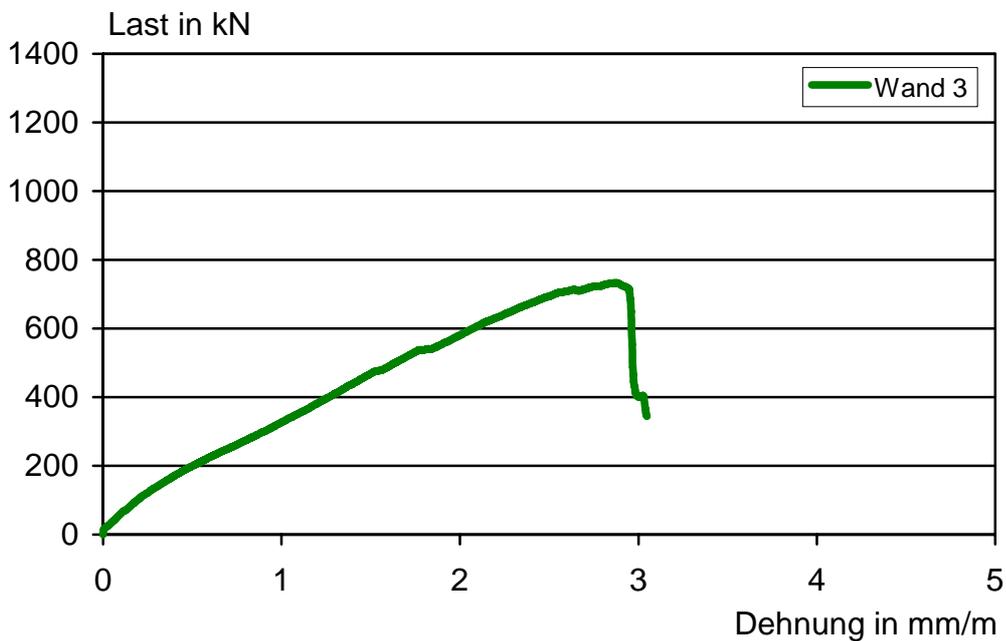


Bild 56: Last-Verformungskurve Wand 3

### 7.4.3 Versagensverhalten

In den Bildern 57 und 58 sind die Längs- und Querverformungen der Wand 3 getrennt nach Vorder- und Rückseite sowie den Stirnseiten dargestellt.

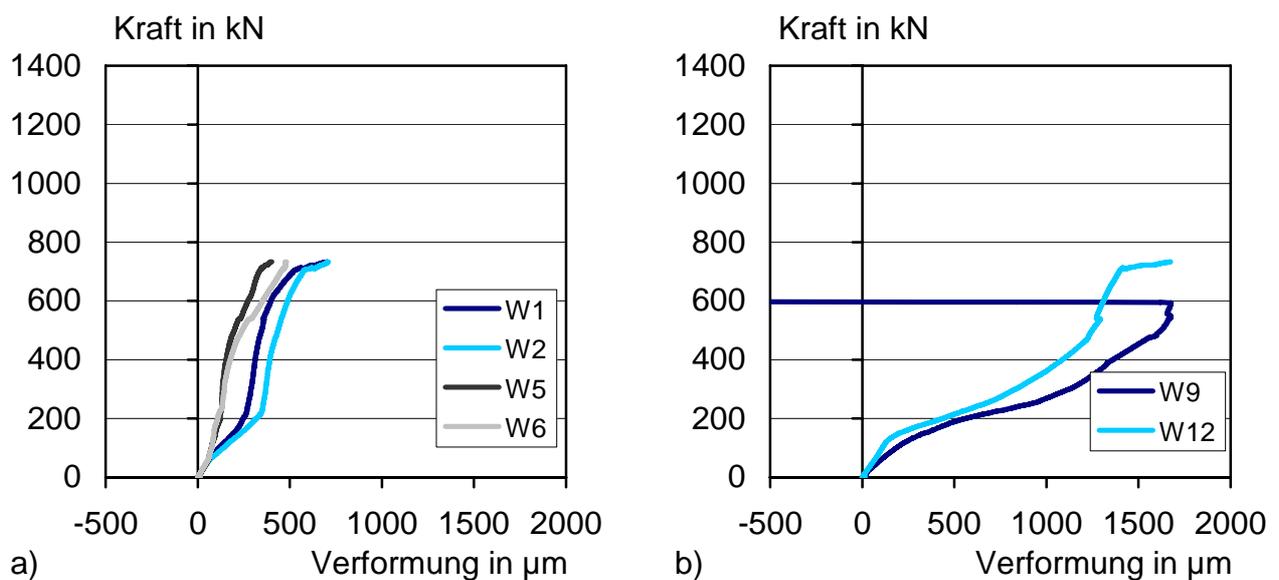
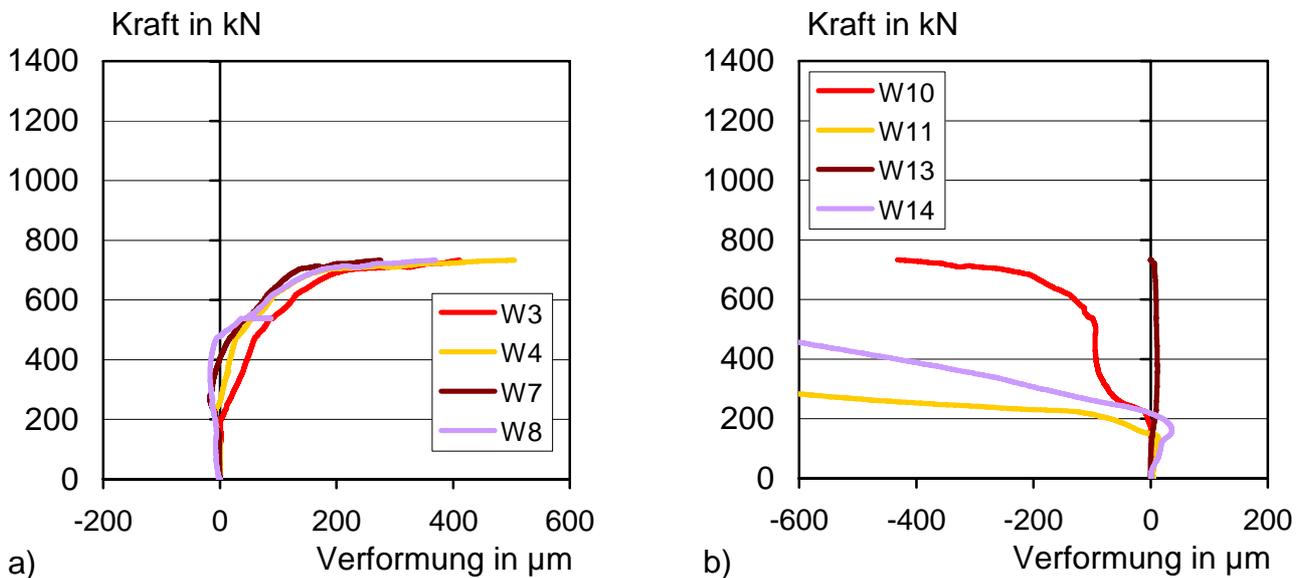


Bild 57: a) Längsverformung der Vorder- und Rückseite, b) Längsverformung der Stirnseiten



**Bild 58:** a) Querverformung der Vorder- und Rückseite, b) Querverformung der Stirnseiten

Bei Wand 3 entstanden wiederum als erstes auf beiden Seiten Fugen zwischen BIS und SVPLB von oben nach unten (Laststufe: ca. 150 kN). Auf der einen Seite stellte sich ein Beulen ein, während die andere Seite der gleichen BIS ausknickte (Bild 59 a) und b)). Dies geht auch aus den Querverformungen hervor (s. Bild 58 a)). Die Verformungen nehmen bei Laststeigerung kontinuierlich zu, was einer Verwölbung des BIS-Elements entspricht. Die andere BIS zeigte außer einer Stauchung kein Abknicken oder Beulen. Im SVPLB traten bei dieser Wandprüfung keine Risse auf. Ebenfalls war kein Haftverbund zwischen der BIS und dem SVPLB erkennbar. An der BIS sowie am SVPLB waren glatte Flächen nach der Wandprüfung erkennbar (Bild 59 c)).

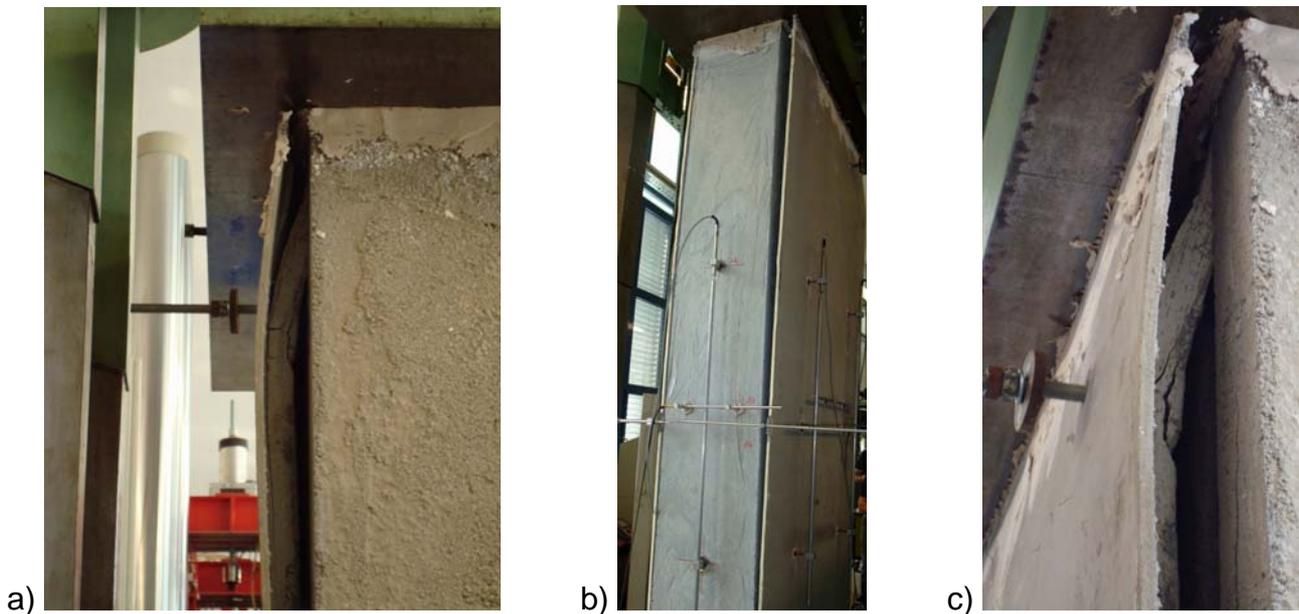


Bild 59: a) Beulen der BIS, b) Abknicken der BIS, c) Verbund BIS/SVPLB

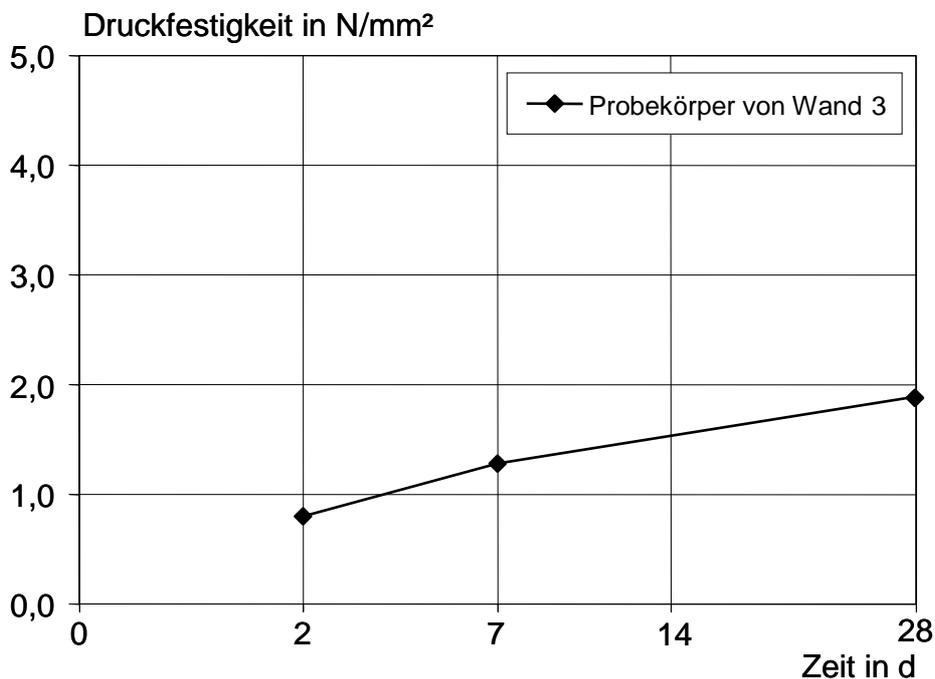
#### **7.4.4 Kennwerte des SVPLB**

##### **7.4.4.1 Allgemeines**

Während der Betonage von Wand 3 wurden Probekörper zur Überprüfung der Druckfestigkeit hergestellt, um einen Vergleich der Mischungen mit und ohne Schnellzement herstellen zu können. Die Trockenrohddichte des SVPLB wurde zusätzlich bestimmt. Nach der Wandprüfung wurde die Haftzugfestigkeit zwischen BIS und SVPLB überprüft.

##### **7.4.4.2 Druckfestigkeit**

Die Druckfestigkeitsentwicklung der bei der dritten Wandbetonage hergestellten Würfel ist Bild 60 zu entnehmen. Nach 28 Tagen ergibt sich eine Druckfestigkeit von  $1,9 \text{ N/mm}^2$  bei einer Festbetonrohddichte von  $500 \text{ kg/m}^3$ . Sie ist somit etwas geringer als die Druckfestigkeit der Mischung ohne Schnellzement.



**Bild 60:** Druckfestigkeitsentwicklung des SVPLB der Probekörper von Wand 3

#### 7.4.4.3 Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte des SVPLB aus Wand 3 ergab sich nach einer Trocknung bei 105 °C zu 395 kg/m<sup>3</sup> und liegt so im Bereich der optimierten Mischung mit CEM I 52,5 R anstelle des Schnellzements.

#### 7.4.4.4 Haftzugprüfung

Ein Haftverbund zwischen BIS und SVPLB war wie bei der Prüfung bereits erkennbar nicht vorhanden. Bereits beim Sägen der Prüfstellen löste sich die restliche BIS vom SVPLB, weshalb hier nur die Oberflächenzugfestigkeit des SVPLB geprüft wurde. An drei untersuchten Stellen ergaben sich Oberflächenzugfestigkeiten zwischen 0,09 und 0,12 N/mm<sup>2</sup>. Im Mittel war eine Oberflächenzugfestigkeit von 0,10 N/mm<sup>2</sup> vorhanden. Beim Vergleich mit den Ergebnissen von Wand 1 (0,68 N/mm<sup>2</sup> für den SVPLB) ist hier aufgrund der geringeren Rohdichte (500 kg/m<sup>3</sup> gegenüber 820 kg/m<sup>3</sup>) eine deutlich verringerte Oberflächenzugfestigkeit vorhanden.

## 7.5 Wand 4

### 7.5.1 Allgemeines

Wand 4 wies ein Gewicht von 710 kg auf. Beide Stirnseiten hatten eine glatte bzw. eine mit ausreichend Zementleim bedeckte Oberfläche. In regelmäßigen Abständen von ca. 40 cm waren jedoch über die ganze Wanddicke Schwindrisse vorhanden.

### 7.5.2 Zentrische Druckfestigkeit

Auch bei der letzten Wand betrug die Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min.

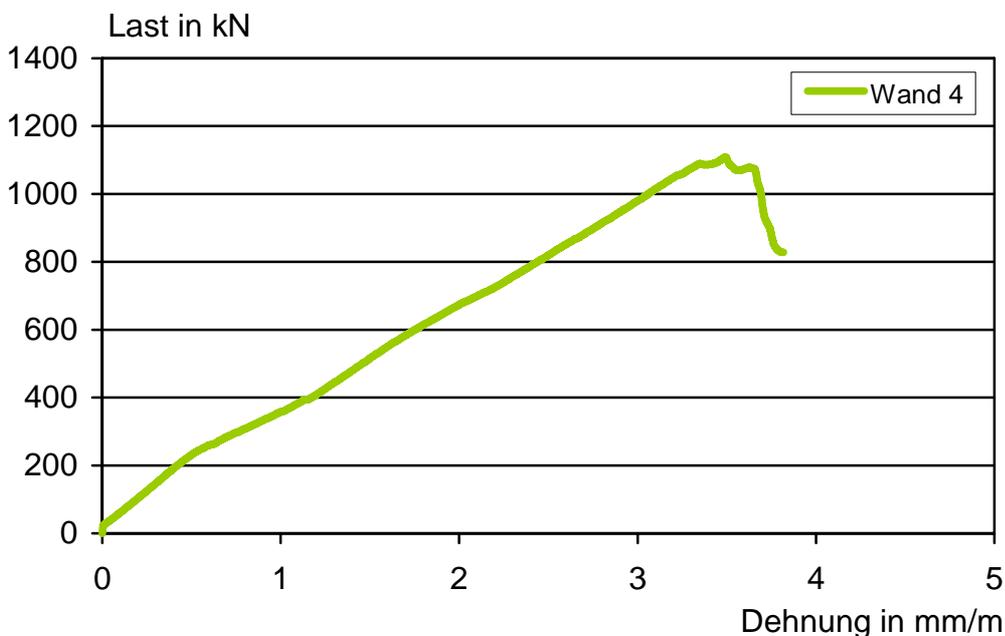
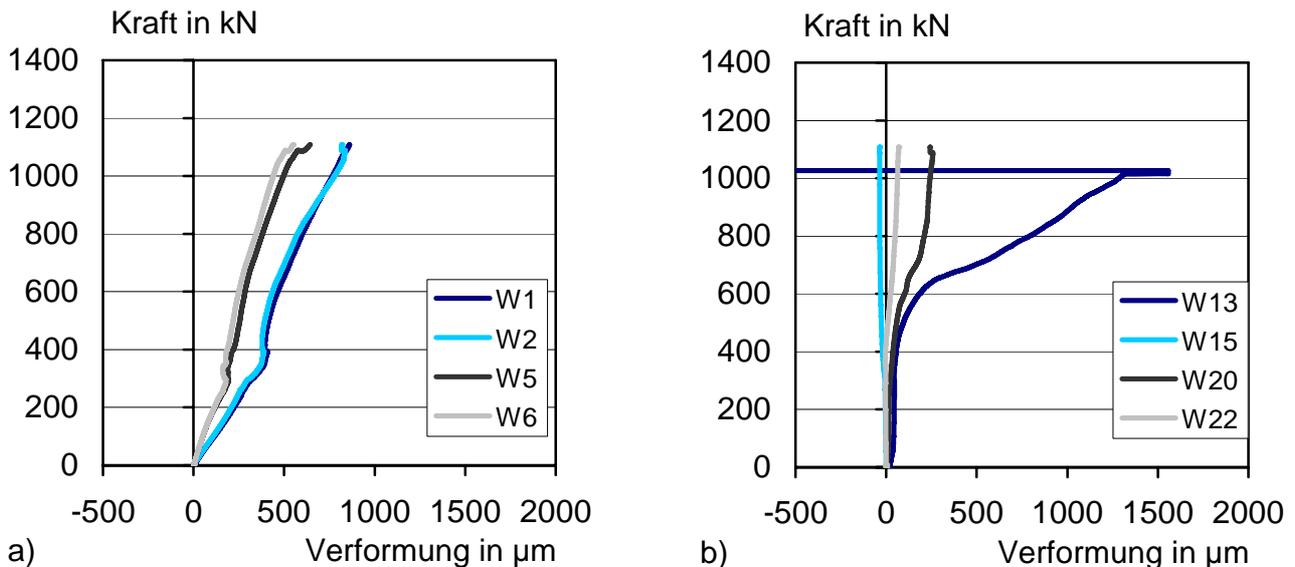


Bild 61: Last-Verformungskurve Wand 4

In Bild 61 ist die Last über die Verformung aufgetragen. Nach einem geringen Steifigkeitsabfall zwischen 0,5 und 1,2 mm/m wird bei ca. 3,5 mm/m die Höchstlast von 1108 kN erreicht. Daraus ergibt sich eine Druckfestigkeit von 3,2 N/mm<sup>2</sup>. Die Zeit bis zum Erreichen der Prüflast betrug 10 Minuten. Auch bei Wand 4 ergab sich im Vergleich zu Wand 1 und 2 eine geringere Steifigkeit des Gesamtsystems.

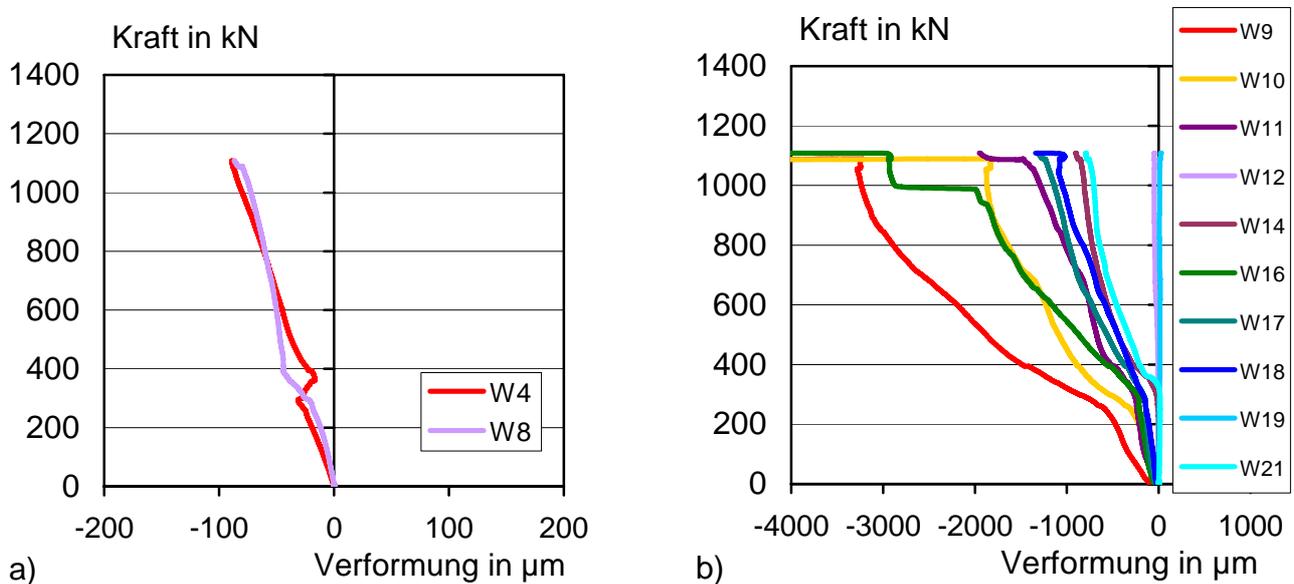
### 7.5.3 Versagensverhalten

Die Längs- und Querverformungen der Vorder- und Rückseite sowie die Stirnflächen der Wand 4 sind in den Bildern 62 und 63 dargestellt.

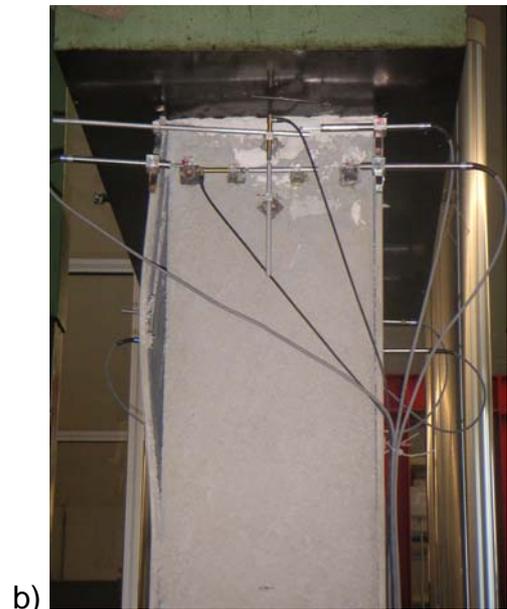


**Bild 62:** a) Längsverformung der Vorder- und Rückseite, b) Längsverformung der Stirnseiten

Wie zuvor bei den anderen Wänden entstanden auch hier zunächst Fugen zwischen BIS und SVPLB (Laststufe: ca. 200 kN). Die Ablösung der BIS vom SVPLB erfolgte bei steigender Belastung jedoch auch nur an einer Seite, entsprechend den Wänden 2 und 3. Auf der einen Seite beulte die Wand etwas tiefer (Bild 64 a)) als auf der anderen Seite der gleichen BIS aus (Bild 64 b)). An dieser Wand waren im Gegensatz zu den drei anderen Wänden die Wegaufnehmer an den Stirnflächen sowohl im oberen Lasteinleitungsbereich als auch im unteren Drittel der Wand angeordnet (s. Bild 43). Das Beulen und Ablösen der BIS vom SVPLB kann daher direkt aus den Querverformungen (s. Wegaufnehmer W10 und W11 bzw. W17 und W18) abgelesen werden (s. Bild 63 b)).



**Bild 63:** a) Querverformung der Vorder- und Rückseite, b) Querverformung der Stirnseiten



**Bild 64:** a) und b) Ablösen der BIS vom SVPLB

Zwischen der BIS-Platte und dem SVPLB war teilweise nur wenig Verbund vorhanden. Allerdings war der Verbund zwischen den Stegen der BIS und der Platte so gering, dass sie sich teilweise voneinander ablösten. Der Verbund des Steges zum SVPLB war deutlich besser.

Im SVPLB waren während der Belastung wiederum keine Risse zu erkennen. In der BIS traten jedoch aufgrund der starken Durchbiegung mehrere Risse auf (Bild 65).



Bild 65: Risse in der BIS

## **7.5.4 Kennwerte des SVPLB**

### **7.5.4.1 Allgemeines**

Während der Betonage von Wand 4 wurden Sensoren zur Erfassung der Hydratationswärmeeentwicklung einbetoniert. Zusätzlich wurden Probekörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit sowie des E-Moduls hergestellt. Nach der Wandprüfung wurde die Haftzugfestigkeit zwischen BIS und SVPLB überprüft.

### **7.5.4.2 Temperaturentwicklung**

Bild 66 zeigt die Entwicklung der Temperatur. Der Start der Messung erfolgte, nachdem der erste Temperatursensor in 0,4 m Höhe in den Beton gelegt wurde. Die Maximaltemperatur ergab sich nach 12 Stunden in 0,4 m Höhe zu 67 °C und in 0,6 m Höhe nach 13,5 Stunden zu 66 °C, wobei auch hier wieder zu beachten ist, dass die Betonierhöhe von 0,6 m ca. 1,5 Stunden später erreicht wurde.

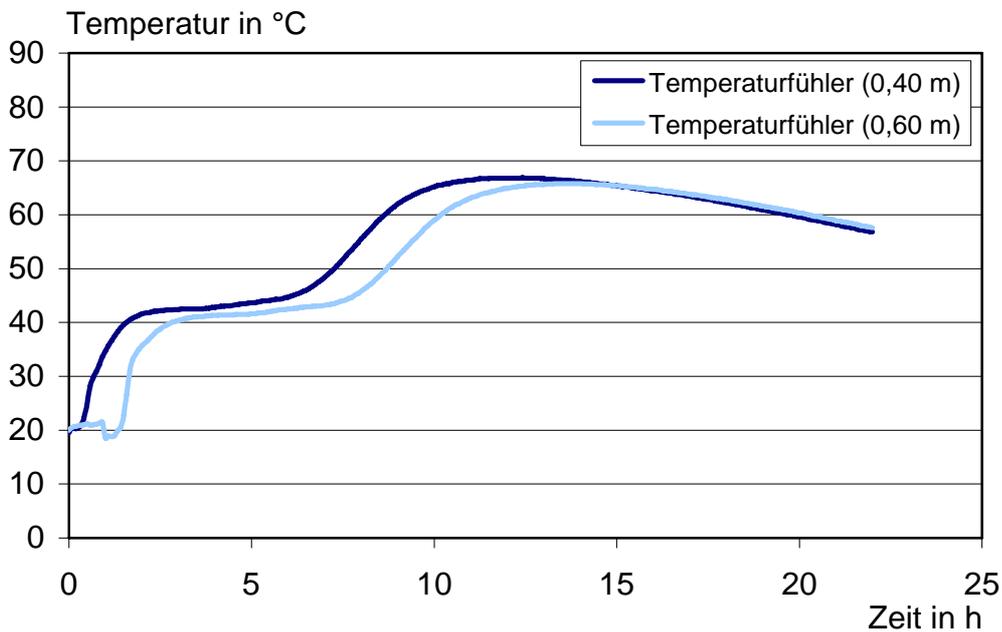
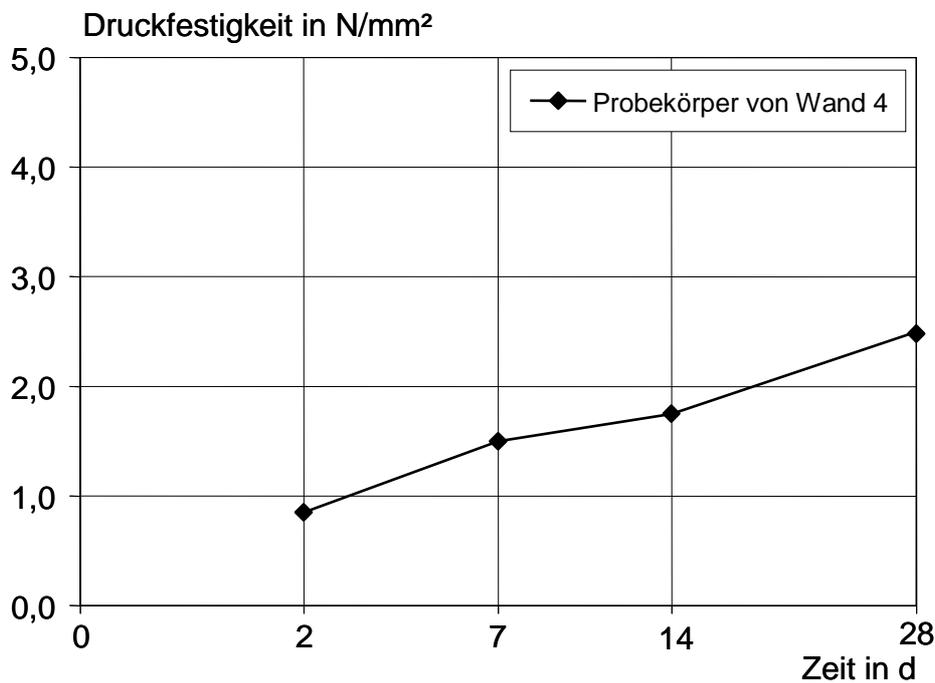


Bild 66: Temperaturentwicklung des SVPLB in Wand 4

### 7.5.4.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsentwicklung der parallel zu Wand 4 hergestellten Würfel ist Bild 67 zu entnehmen. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen ergibt sich zu 2,5 N/mm<sup>2</sup> bei einer Festbetonrohddichte von 510 kg/m<sup>3</sup> und liegt somit geringfügig über der Druckfestigkeit der Mischung mit dem CEM I 52,5 R.



**Bild 67:** Druckfestigkeitsentwicklung des SVPLB der Probekörper von Wand 4

#### 7.5.4.4 E-Modul

Der E-Modul der Probekörper, die während der Wandbetonage hergestellt wurden, ergab sich nach 28 Tagen zu 1300 N/mm<sup>2</sup> und entspricht dem der ursprünglichen Mischung ohne Schnellzement.

#### 7.5.4.5 Trockenrohddichte

Die Trockenrohddichte des SVPLB aus Wand 4 ergab sich nach einer Trocknung bei 105 °C zu 400 kg/m<sup>3</sup> und entspricht somit der Trockenrohddichte der Mischung aus Wand 3.

#### **7.5.4.6 Haftzugprüfung**

Obwohl bei der Wandprüfung SVPLB an der BIS haften blieb und die Stege von der Platte gerissen wurden, war bei der separaten Haftzugprüfung kein Haftverbund zwischen BIS und Beton vorhanden. Beim Sägen der Prüfstellen löste sich die BIS wiederum vom SVPLB ab, so dass lediglich die Oberflächenzugfestigkeit des SVPLB überprüft werden konnte. Hierbei ergaben sich bei 3 Prüfstellen Werte zwischen 0,10 und 0,13 N/mm<sup>2</sup>. Im Mittel ergab sich eine Oberflächenzugfestigkeit von 0,12 N/mm<sup>2</sup>, die in etwa den Werten des SVPLB aus Wand 3 entspricht.

### **7.6 Diskussion der Ergebnisse**

#### **7.6.1 Allgemeines**

In diesem Kapitel erfolgt zunächst ein Vergleich der Wandprüfungen, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse festzustellen. Aufgrund der zwei verschiedenen SVPLB-Mischungen werden Wände 1 und 2 sowie Wände 3 und 4 miteinander verglichen. Im Anschluss wird exemplarisch an Wand 4 die Lastverteilung auf die BIS-Elemente und den SVPLB aus den Versuchsdaten berechnet und der theoretisch ermittelten Verteilung gegenübergestellt. Als nächstes erfolgt eine wärmetechnische Bewertung der Wände 1 und 2 aufgrund der erhöhten Rohdichte des SVPLB. Abschließend wird eine kurze Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchgeführt.

#### **7.6.2 Vergleich der Wandprüfungen**

Betrachtet man die Längsverformungen der Wände 1 und 2 (s. Bild 45 und Bild 68) so fällt auf, dass die Verformungen der Vorder- und Rückseite bis zu einer Last von ca. 400 kN und die Verformungen der Stirnflächen bis zu einer Last von ca. 600 kN einen nahezu identischen Verlauf aufweisen. Für die Querverformungen, die auf den BIS-Elementen sowie auf dem SVPLB an den Stirnseiten gemessen wurden (s. Bild 46 und Bild 52) trifft die Aussage bis zu einer Last von ca. 800 kN ebenfalls zu. Die Querverformungen, die von den Wegaufnehmern W11 und W14 an Wand 2 (s. Bild 52 b)) erfasst wurden, zeigen das Ablösen der beiden BIS-Elemente vom SVPLB sowie das Ausknicken der Elemente.

Die Gesamtverformung beider Wände liegt in einem vergleichbaren Bereich (s. Bild 44 und Bild 50), allerdings erreicht Wand 2 nur eine Höchstlast von 846 kN im Vergleich zu 1180 kN bei Wand 1. Dies kann auf einen wesentlich geringeren Verbund zwischen SVPLB und BIS und ein deutlich früheres Ablösen der BIS bei Wand 2 zurückgeführt werden.

Aufgrund der veränderten Anordnung der Wegaufnehmer an den Stirnseiten der Wände, kann für die Wände 3 und 4 nur ein Vergleich der Längs- und Querverformungen, die auf den BIS-Elementen gemessen wurden, erfolgen.

Während die Längsverformungen bis zu einer Last von ca. 200 kN in etwa identisch und bis zum Erreichen der jeweiligen Höchstlast in ähnlichen Bereichen liegen (s. Bild 57 a) und Bild 62 a)), kann zwischen den Querverformungen (s. Bild 58 a) und Bild 63 a)) kein Zusammenhang festgestellt werden. Dies ist im Ausbeulen und Verwölben der BIS-Elemente von Wand 3 begründet.

Betrachtet man die Messungen an den Stirnseiten von Wand 3 (s. Bild 57 b) und Bild 58 b)), so können hier große Zunahmen der Verformungen festgestellt werden. Diese sind vermutlich im schlechten Verbundverhalten der BIS-Elemente mit dem SVPLB und der schlechten Haftzugfestigkeit des SVPLB begründet.

Die Längsverformungen, die an den Stirnseiten von Wand 4 gemessen wurden (s. Bild 62 b)) zeigen deutlich, dass der SVPLB im Bereich der Lasteinleitung eine große Stauchung und im unteren Drittel kaum Verformungen erfährt. An den Querverformungen (s. Bild 63 b)) stellt man fest, dass das Ablösen der BIS-Elemente vom SVPLB bereits ab einer Last von ca. 200 kN deutlich sichtbar ist. Dies gilt sowohl für den Bereich der Lasteinleitung als auch für das untere Drittel der Wand. Der SVPLB erfährt im Bereich der Lasteinleitung nur sehr geringe Querverformungen.

Aus den Last-Verformungskurven der beiden Wände (s. Bild 56 und Bild 61) geht hervor, dass die Gesamtverformung in einem ähnlichen Verlauf liegt. Die geringere Höchstlast von Wand 3 (733 kN) im Vergleich zu Wand 4 (1108 kN) ist auf das schlechtere Verbundverhalten zwischen BIS und SVPLB zurückzuführen.

### 7.6.3 Traglastverteilung

Für die Berechnung der theoretischen Verteilung der Gesamtlast auf die BIS-Elemente und den SVPLB wird vorausgesetzt, dass die Längsdehnungen der BIS-Elemente gleich denen des SVPLB sind. Unter der Bedingung von Gleichung (6) kann mit Hilfe der beiden Gleichungen (7) und (8) unter der Annahme linear-elastischen Werkstoffverhaltens die theoretische Lastverteilung berechnet werden.

$$\varepsilon = \varepsilon_{BIS} = \varepsilon_{SVPLB} = \frac{F}{E \cdot A} \quad (6)$$

mit:

|                         |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| $\varepsilon$ :         | Dehnung                      |
| $\varepsilon_{BIS}$ :   | Dehnung der BIS              |
| $\varepsilon_{SVPLB}$ : | Dehnung des SVPLB            |
| F:                      | Last in kN                   |
| E:                      | E-Modul in N/mm <sup>2</sup> |
| A:                      | Fläche in mm <sup>2</sup>    |

$$\frac{aF}{E_{BIS} \cdot A_{BIS}} = \frac{bF}{E_{SVPLB} \cdot A_{SVPLB}} \quad (7)$$

mit:

|               |  |
|---------------|--|
| a:            | Traganteil der BIS                     |
| b:            | Traganteil des SVPLB                   |
| F:            | Last in kN                             |
| $E_{BIS}$ :   | E-Modul der BIS in N/mm <sup>2</sup>   |
| $E_{SVPLB}$ : | E-Modul des SVPLB in N/mm <sup>2</sup> |
| $A_{BIS}$ :   | Fläche der BIS in mm <sup>2</sup>      |
| $A_{SVPLB}$ : | Fläche des SVPLB in mm <sup>2</sup>    |

$$F = 2 \cdot \frac{a}{2} \cdot F + b \cdot F \quad (8)$$

mit:

|    |                      |
|----|----------------------|
| a: | Traganteil der BIS   |
| b: | Traganteil des SVPLB |
| F: | Last in kN           |

Mit den Werten  $E_{BIS} = 31.300 \text{ N/mm}^2$ ,  $A_{BIS} = 15.000 \text{ mm}^2$ ,  $E_{SVPLB} = 1.300 \text{ N/mm}^2$  und  $A_{SVPLB} = 320.000 \text{ mm}^2$  ergeben sich die Anteile zu 69,3 % für die BIS und 30,7 % für den SVPLB.

Die Ermittlung der echten Lastverteilung kann nur durch Verwendung der Daten der Wandprüfung 4 erfolgen. Für die Berechnung ist es erforderlich, den Zeitpunkt des Verbundverlustes zwischen BIS-Element und SVPLB im Lasteinleitungsbereich zu kennen. Die Bestimmung dieses Zeitpunkts sowie der zugehörigen Last war durch Anordnen der Wegaufnehmer im oberen Bereich von Wand 4 möglich.

Bei Betrachtung der Querverformungen im Lasteinleitungsbereich (s. Bild 63 b)) fällt auf, dass der Verbundverlust bereits bei einer Last von ca. 200 kN deutlich sichtbar ist. Die Berechnung der Lastverteilung kann daher nur exemplarisch für eine Last von 150 kN unter der Annahme, dass zu diesem Zeitpunkt noch ein Verbund zwischen BIS-Elementen und SVPLB besteht, durchgeführt werden.

Aufgrund von unterschiedlichen Längsverformungen der BIS-Elemente sowie des SVPLB, setzt sich die Last wie folgt zusammen:

$$F = F_{1,BIS} + F_{2,BIS} + F_{3,SVPLB} \quad (9)$$

mit:

F: Gesamtlast in N  
 $F_{1,BIS}$ : Last auf 1. BIS-Element in N  
 $F_{2,BIS}$ : Last auf 2. BIS-Element in N  
 $F_{3,SVPLB}$ : Last auf SVPLB in N

Berechnet man unter Verwendung der Gleichung (6) und den bekannten Längsdehnungen aus dem Versuch bei einer Last von 150 kN die Lasten  $F_{1,BIS}$ ,  $F_{2,BIS}$  und  $F_{3,SVPLB}$ , so erhält man eine Gesamtlast  $F = 244 \text{ kN}$ . Dieser Wert entspricht nicht den erwarteten 150 kN. Geht man davon aus, dass zumindest die Längsdehnungen der BIS-Platten zuverlässig gemessen wurden, muss der Fehler in der Dehnung des SVPLB begründet sein.

Dieser Ansatz kann für eine weitere Berechnung genutzt werden. Dabei unterstellt man dem SVPLB die gleichen Dehnungen wie den BIS-Elementen. Unter Verwendung von Gleichung (10) sowie dem Mittelwert der gemessenen Längsdehnungen der BIS-Elemente kann die zugehörige Last  $F$  berechnet werden. Diese ergibt sich zu 182,9 kN. Dieser Wert entspricht eher der vorhandenen Last in Höhe von 150 kN, ist aber noch zu groß.

$$F = \varepsilon \cdot (2 \cdot E_{BIS} \cdot A_{BIS} + E_{SVPLB} \cdot A_{SVPLB}) \quad (10)$$

mit:

|                 |  |
|-----------------|--|
| $F$ :           | Last in N                              |
| $\varepsilon$ : | Mittelwert der Längsdehnungen der BIS  |
| $E_{BIS}$ :     | E-Modul der BIS in N/mm <sup>2</sup>   |
| $E_{SVPLB}$ :   | E-Modul des SVPLB in N/mm <sup>2</sup> |
| $A_{BIS}$ :     | Fläche der BIS in mm <sup>2</sup>      |
| $A_{SVPLB}$ :   | Fläche des SVPLB in mm <sup>2</sup>    |

Es ist anzunehmen, dass sich der SVPLB in der BIS nicht linear-elastisch verhält, da er über die Länge mit der deutlich steiferen BIS verbunden ist. Vermutlich wird daher der Lastanteil der BIS bei den Berechnungen etwas überschätzt. Dies würde bedeuten, dass die BIS im Versuch noch einen etwas kleineren Lastanteil als die errechneten 69,3 % übernimmt.

Exemplarisch konnte gezeigt werden, dass die sehr grob abgeschätzte Lastverteilung der aus dem Versuch ermittelten in etwa entspricht, wenn man die Verformungen der BIS-Elemente der Berechnung zugrunde legt. Bei Verwendung der Verformungen des SVPLB können keine zuverlässigen Berechnungen durchgeführt werden.

#### 7.6.4 Wärmetechnische Eigenschaften der Wände 1 und 2

Durch das Entlüften bei den Wänden 1 und 2 erhöhte sich ungewollt die Rohdichte des SVPLB auf ca. 800 kg/m<sup>3</sup>. Um diese Erhöhung wärmetechnisch zu berücksichtigen, wurde für die Wände eine nachträgliche bauphysikalische Berechnung durchgeführt. Gemäß /Sch06/ kann bei einer Rohdichte von 800 kg/m<sup>3</sup> eine Wärmeleitfähigkeit von 0,28 W/(m•K) für einen Leichtbeton angenommen werden. Unter Berücksichtigung dieser Wärmeleitfähigkeit müsste die Wanddicke daher auf einen Wert von 1,15 m erhöht werden, um den geltenden Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  in Höhe von 0,24 W/(m<sup>2</sup>•K) /EnEV09/ einzuhalten. Dies stellt eine inakzeptable Bauteildicke dar.

Im Rahmen des Vorhabens wurde dem Entlüften des SVPLB durch die Verwendung von Schnellzement entgegengewirkt. Hierdurch konnte für die Herstellung der Wände 3 und 4 eine stabile SVPLB-Mischung sichergestellt werden, die auch die Anforderungen an den Wärmeschutz erfüllt. Trotzdem besteht weiterhin Forschungsbedarf im Hinblick auf eine reproduzierbare, stabile SVPLB-Mischung unter Verwendung von normal erhärtendem Zement, nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen.

### 7.6.5 Wirtschaftliche Betrachtung

Um das neue Wandsystem mit bereits gängigen Wandkonstruktionen in Relation zu setzen, wurde eine wirtschaftliche Betrachtung durchgeführt. Hierbei wurden ein Wandsystem mit Dämmschicht und Sichtbetonqualität sowie eines mit Wärmedämmverbundsystem zum Vergleich mit der neuen Konstruktion (BIS + SVPLB) herangezogen. Das Wandsystem mit Dämmschicht und Sichtbetonqualität kann entweder als Doppel- oder als Sandwichwand ausgeführt werden.

Die verschiedenen Kosten für eine Wandart mit einer Dicke von 0,35 m sind in Tabelle 15 jeweils bezogen auf 1 m<sup>2</sup> aufgelistet. Es handelt sich hierbei um Anhaltswerte, die in Abhängigkeit vom Objekt variieren können.

Tabelle 15: Kostenvergleich der Wandsysteme

| Wandsysteme                            |                  | Kosten pro m <sup>2</sup> |
|--|------------------|---------------------------|
| -                                      |                  | Euro                      |
| 1                                      | 2                | 3                         |
| BIS + SVPLB                            |                  | 245 – 285                 |
| mit Dämmschicht und Sichtbetonqualität | als Doppelwand   | 80 – 90                   |
|  | als Sandwichwand | 100 – 120                 |
| mit Wärmedämmverbundsystem             |                  | 90 – 110                  |

Aus Tabelle 15 geht hervor, dass für die Herstellung des neuen Wandsystems ca. 250 bis 300 % mehr Kosten entstehen im Vergleich zu den marktüblichen Systemen. Die Preissteigerung liegt vor allem in der noch nicht realisierten industriellen Fertigung der Textiltonelemente begründet. Wird diese Fertigung umgesetzt, könnten die Kosten deutlich gesenkt werden. Zu beachten ist allerdings noch der Aspekt der Wiederverwertung. Hier bietet der rein mineralische Baustoff erhebliche Vorteile, die bislang nicht ökonomisch bewertet wurden.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer neuartigen Wandbauweise für den Wohnungsbau. Es handelt sich hierbei um eine Fertigteilwand unter Einsatz einer bauteilintegrierten Schalung (BIS) aus textilbewehrtem Beton sowie einem selbstverdichtenden porosierten Leichtbeton (SVPLB) als Verfüllbeton. Durch diese Kombination sollte ein Wandsystem mit einem geringen Gewicht bei einer gleichzeitig ausreichenden Wärmedämmung und weitgehend freien Gestaltungsmöglichkeit der Oberflächen geschaffen werden. Bei dem angestrebten Wandaufbau sollten keine zusätzlichen Wärmedämmstoffe angewendet werden, um alle verwendeten Baustoffe voll recyclingfähig zu halten.

Für die Herstellung der BIS wurde zunächst ein geeigneter Feinbeton entwickelt. Neben der entwickelten Feinbetonmischung kamen auch zwei mit Kurzfasern modifizierte Mischungen zur Anwendung. Aus bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben war bekannt, dass eine Stegplatte einen geeigneten Querschnitt für ein BIS-Element darstellt. Im Rahmen von Vorversuchen wurde die Querkrafttragfähigkeit der Stegplatten geprüft. Die Versuche zeigten zwar, dass eine Steigerung der Querkrafttragfähigkeit mit einer der beiden Kurzfasermischungen möglich war. Allerdings wies diese Mischung eine schlechte Verarbeitbarkeit auf, wodurch sie nicht für diese Anwendung geeignet war.

Mit Hilfe von zwei verschiedenen Berechnungsverfahren wurde eine Parameterstudie zu den Abmessungen des Steges sowie des Stegabstands ausgeführt. Zum einen wurden die Plattenbalkentheorie und zum anderen eine FE-Simulation durchgeführt. Mit zwei ausgewählten Querschnitten wurden dann 3-Punkt-Biegezugversuche zum Tragverhalten der Stegplatten ausgeführt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden sowohl das aufnehmbare positive als auch das aufnehmbare negative Moment bestimmt. Die Ergebnisse der Versuche wurden anschließend mit denen aus den statischen Berechnungen verglichen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass die maßgebende Bemessungsgröße die Querkraft ist. Unklar ist noch, ob durch die angewendeten Berechnungsverfahren die Plattentragwirkung der BIS-Elemente richtig erfasst wird.

Für die Herstellung der Wände wurden die BIS-Platten im Fertigteilwerk produziert. Hier stellte sich heraus, dass das Spritzverfahren eine geeignete Methode für das Einbringen des Feinbetons in die Schalung darstellt. Durch dieses Verfahren konnten auch Oberflächen in sehr guter Sichtbetonqualität hergestellt werden.

Bei der Entwicklung des SVPLB stand eine geringe Rohdichte bei einer ausreichenden Festigkeit im Vordergrund, um die Anforderungen an den Wärmeschutz mit einer praktikablen Bauteildicke erfüllen zu können. Der SVPLB wurde unter Zugabe von leichter Gesteinskörnung und vorgefertigtem Schaum auf eine Frischbetonrohichte von  $500 \text{ kg/m}^3$  eingestellt. Die optimierte Mischung wies ein Setzfließmaß von 680 mm auf, da der Beton zur Einsparung von Zeit, Verdichtungsenergie und des für die Verdichtung notwendigen Personals selbstverdichtend sein sollte. Die Druckfestigkeit betrug nach 28 Tagen  $2,2 \text{ N/mm}^2$  bei einem E-Modul von  $1300 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund der Festbetondichte von  $500 \text{ kg/m}^3$  ergab sich eine Trockenrohichte  $< 400 \text{ kg/m}^3$  und so für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,101 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

Die Herstellung der Fertigteilelemente erfolgte zunächst im Fertigteilwerk. Bei der Verfüllung der Wände mit dem SVPLB traten jedoch Schwierigkeiten auf, da die leichte Gesteinskörnung nicht vorgegast werden konnte und es so zu einem Aufschwimmen der Gesteinskörnung kam. Aus diesem Grund wurden die Wandbetonagen ins ibac verlegt. Bei den Betonagen der ersten beiden Wände wurde jedoch eine mangelhafte Stabilität des SVPLB festgestellt. Das Eigengewicht war zu groß, so dass eine Entlüftung auftrat. Es wurden zwei weitere Wände unter Verwendung von Schnellzement hergestellt, da so die einzelnen Schichten beim chargenweisen Einbau von etwa 100 l vor dem Einbringen der Folgechargen bereits fest waren und ein Absacken des SVPLB vermieden wurde. Durch seitliches Aufstellen der Schalung wurde zusätzlich die Betonierhöhe verringert. Im Rahmen der Betonagen konnte gezeigt werden, dass die BIS-Elemente den Frischbetondruck aufnehmen konnten.

Die für eine Bemessung aussagekräftigen Festbetoneigenschaften Druckfestigkeit, E-Modul und Trockenrohichte der Mischung mit dem Schnellzement lagen im gleichen Bereich wie die der Mischungen mit dem CEM I 52,5 R, weshalb weiterhin von der günstigen Wärmedämmeigenschaft ausgegangen wird.

Alle vier Wände wurden in einer 5-MN-Prüfmaschine hinsichtlich ihrer zentrischen Druckfestigkeit geprüft. Bei einem Vergleich der Verformungen der Wände 1 und 2 konnte eine gute Übereinstimmung der Werte festgestellt werden. Allerdings konnte aufgrund des schlechten Verbunds zwischen BIS und SVPLB bei Wand 2 nur eine Höchstlast von 846 kN erreicht werden. Im Vergleich dazu betrug der Wert für Wand 1 1180 kN.

Die Reproduzierbarkeit der Wände 3 und 4 konnte nur teilweise beurteilt werden. Grund hierfür ist, dass bei Wand 4 besonders das Ablösen der BIS vom SVPLB im Lasteinleitungsbereich betrachtet werden sollte. Durch die veränderte Anordnung der Wegaufnehmer an den Stirnseiten ist ein Vergleich mit den Verformungen der Wand 3 nicht möglich. Für die Längsverformungen liegt eine gute Reproduzierbarkeit vor. Allerdings konnte auch bei Wand 3 durch einen schlechten Verbund zwischen BIS und SVPLB nur eine verringerte Höchstlast (733 kN) erreicht werden. Die Höchstlast von Wand 4 betrug 1108 kN.

Die Betrachtung der Querverformungen im Lasteinleitungsbereich von Wand 4 zeigten, dass sich die BIS und der SVPLB bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt voneinander lösen. Die Last betrug hier ca. 200 kN. Nimmt man an, dass dieser Zeitpunkt bereits einem Versagen des Systems entspricht, so können für das neuartige Wandsystem nur sehr geringe Festigkeiten angesetzt werden. Dies spricht dafür, dass die BIS-Elemente innen miteinander verbunden werden müssen, um höhere Traglasten zu erzielen.

Im Rahmen einer Berechnung der theoretischen Verteilung der Gesamtlast auf die BIS-Elemente und den SVPLB konnten der Traganteil der BIS zu 69,3 % und der des SVPLB zu 30,7 % bestimmt werden. Ein Abgleich mit den tatsächlich gemessenen Kräften und Verformungen zeigte, dass der Traganteil der BIS wahrscheinlich noch höher ausfällt. Ziel muss es daher sein, die Traganteile der BIS zu verringern, z. B. durch Verwendung von Leichtbeton.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Ziel des Projekts teilweise erreicht wurde. Es konnte eine neuartige Wandbauweise entwickelt werden, die aus einer bauteilintegrierten Schalung aus Textilbeton sowie einem SVPLB als Verfüllbeton besteht. Bei einer Wanddicke von 0,435 m werden die Anforderungen der EnEV 09 hinsichtlich des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  in Höhe von  $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  erfüllt. Für eine industrielle Fertigung dieser Wandkonstruktion sind allerdings noch erhebliche Anstrengungen erforderlich. Die Praktikabilität von sehr leichten Leichtbetonen mit geschäumter Matrix ist derzeit nicht vorhanden und muss über die Auswahl von Ausgangsstoffen und die Herstellprozedur weiterentwickelt werden, dies vor dem Hintergrund einer weiteren, erforderlichen Reduktion der Rohdichte.

## 9 DANKSAGUNG

Wir danken den Drittmittelgebern MC-Bauchemie MÜLLER GmbH & Co. KG, SAFA Saarfiterasche-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Forschungs-, Entwicklungs- und Marketing-Gesellschaft der Leichtbetonindustrie mbH sowie OTTO QUAST Fertigbau Lindenberg für die finanzielle, materielle und fachliche Unterstützung des Projekts.

## 10 LITERATUR

- /Ban04/ Banholzer, B. ; Brameshuber, W.: Bauteilintegriertes Wandschalungssystem : Structural Integrated Formwork System. In: ibac Kurzberichte 17 (2004), Nr. 104
- /Ban05/ Banholzer, B. ; Brameshuber, W.: Lost Formwork Elements Made of Textile Reinforced Concrete. Budapest : Publishing Company of Budapest University of Technology and Economics, 2005. - In: Keep Concrete Attractive, Proceedings of the fib Symposium, Budapest, 23 to 25 May 2005, (Balazs, G.L. ; Borosnyoi, A. (Eds.)), Vol. 1, S. 351-356
- /BAW04/ Bundesanstalt für Wasserbau: Merkblatt Frostprüfung von Beton, Dezember 2004. Karlsruhe • Hamburg • Ilmenau : Bundesanstalt für Wasserbau
- /Bra03a/ Brameshuber, W. ; Gries, T. ; Hegger, J. ; Reinhardt, H.-W. ; Koster, M. ; Barle, M. ; Voss, S. ; Krüger, M.: Praxisgerechte Weiterentwicklung eines bauteilintegrierten Schalungssystems aus Textilbeton. In: Kurzberichte aus der Bauforschung 45 (2004), Nr. 5, S. 254-257
- /Bra03b/ Brameshuber, W. ; Koster, M. ; Hegger, J. ; Voss, S. ; Gries, T. ; Barle, M. ; Reinhardt, H.-W. ; Krüger, M.: Textile Reinforced Concrete (TRC) for Integrated Formworks. Farmington Hill : American Concrete Institute, ACI SP-224, 2004. - In: Thin Reinforced Cement-Based Products and Construction Systems, Vancouver, Spring 2003, (Dubey, A. (Ed.)), S. 45-53
- /Bra04/ Brameshuber, W. ; Banholzer, B.: Bauteilintegriertes Wandschalungssystem. Aachen : Institut für Bauforschung, 2004. - Forschungsbericht Nr. F 864
- /Bra06/ Brameshuber, W.: Textile Reinforced Concrete. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC. Bagnaux: RILEM, 2006. - Report 36
- /Bra06a/ Brameshuber, W. ; Uebachs, S.: Entwicklung von Selbstverdichtenden Betonen des Stabilisierer-Typs zum speziellen Einsatz im Wohnungsbau. Aachen : Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2008. - Forschungsbericht Nr. F 869

- /Bra07/ Brameshuber, W. ; Hegger, J. ; Gries, T. ; Dilger, K. ; Böhm, S. ; Mott, R. ; Voss, S. ; Barle, M. ; Hartung, I.: Serielle Einzelfertigung (Stückfertigung) von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, Institut für Massivbau, Institut für Textiltechnik, RWTH Aachen University, Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig, 2007. - Forschungsbericht Nr. F 882
- /Bra08/ Brameshuber, W. ; Mott, R.: Nachträgliche Abdichtung von Wohngebäuden gegen drückendes Grundwasser unter Verwendung von textilbewehrtem Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2008. – Forschungsbericht Nr. F 935
- /Bro06/ Brockmann, T.: Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for Textile Reinforced Composites. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2006), Nr. 13; Zugl.: Aachen, Technische Hochschule, Diss. 2005
- /Bun91/ Bunke, N.: Prüfung von Beton : Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422
- /Deh01/ Dehn, F. ; Orgass, M.: Betontechnologische Voraussetzungen zur Herstellung selbstverdichtender Leichtbetone. Leipzig : Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (2001), Nr. 6, S. 261-272
- /DIN79/ DIN 52612-1:1979-09 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät; Teil 1: Durchführung und Auswertung
- /DIN80/ DIN 18218:1980-09 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen
- /DIN91/ DIN 1048-5:1991-06 Prüfverfahren für Beton; Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Prüfkörper
- /DIN95/ DIN EN 992:1995-09 Bestimmung der Trockenrohddichte von haufwerksporigem Leichtbeton
- /DIN98/ DIN EN 1015-7:1998-12 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel
- /DIN01/ DIN 4108-3:2001-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- /DIN02/ DIN EN 13055-1:2002-08 Leichte Gesteinskörnungen; Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel
- /DIN03/ DIN 4108-2:2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

- /DIN03a/ DIN EN 1520:2003-07 Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton (enthält Berichtigung AC:2003)
- /DIN04/ DIN EN 197-1:2004-08 Zement; Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- /DIN04a/ DIN V 18004:2004-04 Anwendungen von Bauprodukten in Bauwerken . Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104
- /DIN05/ DIN EN 196-1:2005-05 Prüfverfahren für Zement; Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- /DIN05a/ DIN EN 1097-6:2005-12 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
- /DIN05b/ DIN EN 1354:2005-09 Bestimmung der Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton
- /DIN07/ DIN EN 1015-3:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)
- /DIN07a/ DIN EN 1015-6:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel
- /DIN08/ DIN 1045-1:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- /DIN08a/ DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- /DIN08b/ DIN EN 450-1:2008-05 Flugasche für Beton; Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien
- /DIN08c/ DIN EN ISO 6946:2008-04 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007)
- /DIN09/ DIN EN 12390-2:2009-08 Prüfung von Festbeton; Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- /DIN10/ DIN EN 196-6 Entwurf 2008-05 Prüfverfahren für Zement; Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit
- /EnE07/ EnEV 2007 - Energieeinsparverordnung für Gebäude; Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 24. Juli 2007 - vom 1. Oktober 2007 bis 30.09.2009 in Kraft. Adresse: [http://www.enev-online.net/enev\\_2007/index.htm](http://www.enev-online.net/enev_2007/index.htm)

- /EnE09/ EnEV 2009 - Energieeinsparverordnung für Gebäude; Verordnung über energie-sparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV 2009), seit 01.10.2010 in Kraft. Adresse: [http://www.enev-online.org/enev\\_2009\\_volltext/index.htm](http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/index.htm)
- /Grü01/ Grübl, P. ; Weigler, H. ; Karl, S.: Beton : Arten, Herstellung und Eigenschaften. 2. Aufl. Berlin : Ernst & Sohn, 2001
- /Loh00/ Lohaus, L.: Anwendbarkeit vorgeschäumter Luftporen im Betonbau. Stuttgart : IRB, 2000. - Forschungsbericht Nr. T 2938
- /Loh02/ Lohaus, L. ; Alawieh, H.: Geschäumter Beton - Leichtbeton der Zukunft?. In: BWI BetonWerk International (2002), Nr. 5, S. 30,32,34,36
- /Mül02/ Müller, H.S. ; Haist, M. ; Mechtcherine, V.: Entwicklung und Eigenschaften selbstverdichtender Leichtbetone. Stuttgart: ibidem, 2002. - In: Befestigungstechnik Bewehrungstechnik und... Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen anlässlich seines 60. Geburtstages, (Fuchs, W. ; Reinhardt, H.W. (Eds.)), S. 569-583
- /Mül02a/ Müller, H. S. ; Haist, M.: Hochleistungs-Leichtbeton - Selbstverdichtend, pumpbar, duktil. Wien: Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2002. - In: Baustofflehre Bauphysik Brandschutz, Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Schneider, S. 137-144
- /Pfe01/ Pfeifer, G. ; Ramcke, R. ; Achtziger, J. ; Zilch, K.: Mauerwerk Atlas. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2001
- /Pot06/ Pott, J. U.: Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume. Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Dissertation, 2006
- /Sch06/ Schneider K.-J.: Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen, Kapitel Bauphysik. 17. Aufl. Düsseldorf : Werner Verlag, 2006
- /SFB08/ SFB 532: Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie, Forschungsantrag, 2. Hj 2008, 2009, 2010, 1. Hj. 2011, Aachen : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
- /Tra98/ Transferstelle Ökologisch orientiertes Bauen: Umweltverträgliches Planen und Bauen. Dresden : Europäisches Institut für postgraduate Bildung, 1998

**Tabelle A1:** Chemische Zusammensetzung des Zements und der Flugasche

| Bestandteil / Parameter                    |  | Einheit | CEM I 52,5 R | Flugasche |
|--|--|---------|--------------|-----------|
| 1  |  | 2       | 3            | 4         |
| Glühverlust an Luft <sup>1)</sup>          |  |         | 1,44         | 4,19      |
| Haupt- und Nebenbestandteile <sup>1)</sup> | Kohlenstoff als CO <sub>2</sub> (CSA)    | M.-%    | 1,18         | 8,92      |
|  | als C                                    |         | n. b.        | 2,43      |
|  | Gesamtschwefel als SO <sub>3</sub> (CSA) |         | 3,36         | 1,15      |
|  | Chlorid (HNO <sub>3</sub> -Aufschluss)   |         | n. b.        | 0,014     |
|  | SiO <sub>2</sub>                         |         | 23,01        | 52,07     |
|  | TiO <sub>2</sub>                         |         | 0,15         | 1,04      |
|  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           |         | 2,52         | 22,8      |
|  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           |         | 1,41         | 9,4       |
|  | MnO                                      |         | n. b.        | 0,09      |
|  | MgO                                      |         | 0,63         | 2,09      |
|  | CaO                                      |         | 66,34        | 2,42      |
|  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>            |         | 0,10         | 0,31      |
|  | Na <sub>2</sub> O                        |         | 0,10         | 1,13      |
|  | K <sub>2</sub> O                         |         | 0,98         | 1,84      |

1) bezogen auf die getrocknete Probe  
 CSA: Kohlenstoffschwefelanalysator

**Tabelle A2:** Dichte, D<sub>50</sub>-Wert und spezifische Oberfläche des Zements und der Flugasche

| Parameter                           | Einheit            | CEM I 52,5 R       | Flugasche         |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1                                   | 2                  | 3                  | 4                 |
| Dichte                              | g/cm <sup>3</sup>  | 3,1                | 2,3               |
| D <sub>50</sub> -Wert <sup>1)</sup> | µm                 | 10,8               | 13,3              |
| Spezifische Oberfläche nach Blaine  | cm <sup>2</sup> /g | 5310 <sup>2)</sup> | -                 |
| Spezifische Oberfläche nach BET     | m <sup>2</sup> /g  | -                  | 3,3 <sup>3)</sup> |

1) aus Lasergranulometrie (s. Anhang B, Bild B1)  
 2) gemäß DIN EN 196-6:2010-05 /DIN10/  
 3) gemäß DIN 66132 /DIN75/

**Tabelle A3:** Kornrohddichte und Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung

| Parameter      | Einheit           | 1-2 mm <sup>1)</sup> | 4-8 mm <sup>2)</sup> |
|----------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| 1              | 2                 | 3                    | 4                    |
| Kornrohddichte | g/cm <sup>3</sup> | 400                  | 325                  |
| Wasseraufnahme | M.-%              | 40                   | 18                   |

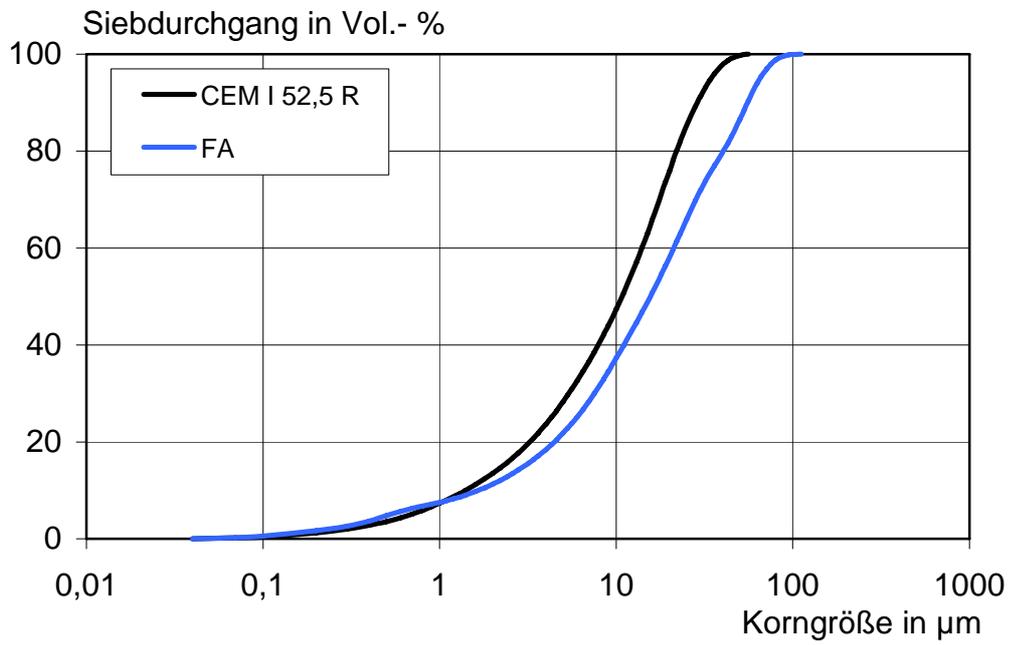
1) nach DIN V 18004 /DIN04a/

2) nach DIN EN 1097-6 Anhang C /DIN05a/

**Tabelle A4:** Dichte und spezifische Oberfläche des Schnellzements

| Parameter                            | Einheit           | Schnellzement |
|--------------------------------------|-------------------|---------------|
| 1                                    | 2                 | 3             |
| Dichte                               | g/cm <sup>3</sup> | 3,1           |
| Spezifische Oberfläche <sup>1)</sup> | m <sup>2</sup> /g | 0,528         |

1) nach Blaine, gemäß DIN EN 196-6 /DIN10/



**Bild B1:** Korngrößenverteilung des Zements und der Flugasche