

F 3138

Wolfgang Breit, Daniel Nyman

Entwicklung einer modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit – MonoBau

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumorhung

Fraunhofer IRB Verlag

F 3138

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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 reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0390-7

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

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00 Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



FACHBEREICH BAUINGENIEURWESEN Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Gebäude 60 Gottlieb-Daimler-Straße 67663 Kaiserslautern

Telefon: (0631) 2 05 – 22 97 Telefax: (0631) 2 05 – 31 01 E-Mail: wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de www.bauing.uni-kl.de/fwb

ENDBERICHT

F251-9201548

vom 20. Oktober 2018

SWD-10.08.18.7-16.52

Entwicklung einer modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit - MonoBau

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

(Aktenzeichen: SWD - 10.08.18.7-16.52)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Dieser Bericht umfasst 75 Seiten (inkl. Deckblatt).

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



Inhaltsverzeichnis

C ~	:
NP	ΙΤΡ
20	i u u

Ü	bersich	t		4
1	Aus	gangssit	tuation	5
	1.1	Kurzbe	schreibung	5
	1.2	Beschr	eibung der zu lösenden Probleme	6
	1.3	Begrün	ndung des Forschungsvorhabens	6
	1.4	Forsch	ungsverbund / Projektbegleitung / Beratergruppe	8
2	Aufl	bau des	Forschungsvorhabens	9
	2.1	Allgem	nein	9
	2.2	Arbeits	paket I	9
	2.3	Arbeits	paket II	10
	2.4	Arbeits	paket III	10
	2.5	Arbeits	paket IV	10
	2.6	Arbeits	paket V	10
3	Dur	chführu	ng und Ergebnisse der Module	11
	3.1	Arbeits	paket I	11
	3.1.	1 Al	lgemein	11
	3.1.	2 Fe	estlegung der Parameter	16
	3.2	Arbeits	paket II	16
	3.2.	1 Al	lgemein	16
	3.2.	2 Ma	aterialauswahl	17
	3.2.	3 En	ntwicklung der Betonzusammensetzung	18
	3.2.4	4 Ur	ntersuchungen zum Schwindverhalten	19
	3.2.	5 Fri	isch- und Festbetonuntersuchungen	22
	3.3	Arbeits	paket III	25
	3.3.	1 Al	lgemein	25
	3.3.	2 Be	estimmung des idealen Dämmmaterials	26
	3.3.	3 Er	mittlung der optimalen Bewehrung	27
	3.3.4	4 Ur	ntersuchung der maximal aufbringbaren Vorspannkraft	28

	3.3.5	Biegeversuche an Betonplatten	31
	3.3.6	Biegeversuche an Sandwichelementen	38
3	5.4 Arb	eitspaket IV	46
	3.4.1	Allgemein	46
	3.4.2	Innere Schalung	47
	3.4.3	Äußere Schalung	48
2	5.5 Arb	eitspaket V	49
	3.5.1	Allgemein	49
	3.5.2	Dämmung und Carbonfaserbewehrung	49
	3.5.3	Vorspannsystem und Holz-Stabilisierungen	52
	3.5.4	Betonage der Probekörper	55
	3.5.5	Großmaßstäblicher Versuch	58
4	Zusamm	enfassung	68
Lite	eraturverz	eichnis	70
Abł	oildungsve	erzeichnis	71
Tat	ellenverz	eichnis	75

Übersicht

BBR-Bericht:	SWD-10.08.18.7-16.52
Titel:	Entwicklung einer modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit
Kurztitel:	MonoBau
Zuwendungsgeber:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
	Zukunft BAU
	Deichmanns Aue 31-37 D-53179 Bonn
Zuwendungsgeber, vertreten durch:	Herr Fabian Brodbeck, M. Sc.
Bearbeiter:	UnivProf. DrIng. Wolfgang Breit (TU Kaiserslautern)
	Daniel Nyman, M. Eng. (TU Kaiserslautern)
Interne Forschungsnummer:	F251-9201548
Ausgestellt am:	20.10.2018
Berichtsumfang:	75 Seiten

1 Ausgangssituation

1.1 Kurzbeschreibung

Seit Anfang des 21. Jahrhunderts leben erstmals mehr Menschen in Städten als auf dem Land. Die Prognosen der Vereinten Nationen gehen sogar davon aus, dass im Jahr 2050 zwei von drei Menschen in urbanisierten Gebieten leben. Das damit einhergehende rasante Wachstum der Städte und der zur Verfügung stehende Bauplatz, stellt besonders Stadtplaner und Architekten vor große Herausforderungen. Besonders die strukturellen Veränderungen in Familie und in der Gesellschaft erfordern ein hohes Maß an Flexibilität, welches sich auch in der Wohnraumnutzung widerspiegelt. Um diesem Umstand gerecht zu werden, müssen die vorhandenen Städtestrukturen optimiert und ausgebaut werden. Dabei ist vor allem die Nachfrage nach neuem und preiswertem Wohnraum groß.

Modulares Bauen – eine Bauweise, die nach dem Baukastenprinzip die einzelnen Elemente zusammenfügt und komplexe geometrische Strukturen entstehen können, bietet dabei eine Möglichkeit den Ansprüchen unserer heutigen Zeit gerecht zu werden. Durch einzelne modulare Elemente, die jederzeit flexibel austauschbar oder ergänzt werden können, entsteht eine wandelbare Wohneinheit, die jeder Umgebungsstruktur angepasst werden kann. Während die meisten Menschen in Deutschland die "Containerbauweise" mit Notunterkünften assoziieren, haben Architekten längst das Potential dieser Bauweise entdeckt. Im Vergleich zu den anfänglichen Interessen der Material- und Zeiteinsparung, entwickelt sich modulares Bauen hin zur experimentellen und innovativen Architektur.

Ein neuer experimenteller Ansatz ist die Herstellung monolithisch konzipierter Wohnelemente aus Sandwichstrukturen mit Deckschichten aus textilbewehrtem Beton. Textilbewehrter Beton oder auch Textilbeton genannt, ist ein innovativer Verbundwerkstoff, der eine der bedeutendsten Erforschungen im Massivbau der letzten Jahrzehnte ist. Mit dem Einsatz von Carbonfasern als textiles Gelege wird die Korrosionsanfälligkeit der Bewehrung ausgeschlossen und die damit verbundene Betondeckung hinfällig. Zudem hat Carbon eine höhere Zugfestigkeit als Stahl und ist um ein Vielfaches leichter. Diese positiven Eigenschaften ermöglichen eine Herstellung von Sandwichelementen mit filigranen Deckschichten. Durch den Einsatz von Hochleistungsbetonen wird gleichzeitig eine dauerhafte, witterungsbeständige und optisch ansprechende Oberfläche geschaffen. In Kombination mit einer Dämmung als Kernmaterial lassen sich damit moderne Gebäudehüllen aus Sandwichelementen herstellen, die sehr gute bauphysikalische Eigenschaften, geringer Baustoffbedarf, Modularität und moderne Architektur vereinbaren.

Der Aspekt der monolithischen Herstellung nimmt einen wesentlichen Schwerpunkt bei der Herstellung ein. Der Begriff stammt aus dem altgriechischen und bedeutet so viel wie "aus einem Guss" hergestellt. Für das monolithisch konzipierte Wohnelement bedeutet dies, der Boden, die Wände und die Decke werden gleichzeitig betoniert und es entstehen keine konstruktiven Fugen zwischen den einzelnen Bauteilen. Es impliziert eine vermeintliche Einfachheit in der Planung und Ausführung. Die Eigenschaft des Betons im Laufe der Zeit durch Feuchtigkeitsabgabe zu schwinden, führt jedoch besonders an den Schnittstellen der Bauteile zu Problemen. Die Verformungen des Betons werden verhindert und es entstehen Zwangsspannungen, die besonders im jungen Alter des Betons zu Schwindrissen führen können. Um das Konzept der monolithisch hergestellten Wohnelemente in die Praxis umzusetzen, müssen die Ausführbarkeit und die auftretenden Probleme analysiert und bearbeitet werden.

1.2 Beschreibung der zu lösenden Probleme

Durch den in dieser Arbeit geplanten Einsatz von Sandwichelementen mit filigranen, textilbewehrten Deckschichten aus Hochleistungsbeton sind neben den Vorteilen einige Herausforderungen bei der Herstellung und Planung des monolithischen Wohnelements zu bewältigen. Dabei sind nicht nur die Anforderungen der Tragfähigkeit, sondern auch der Gebrauchstauglichkeit gleichermaßen zu erfüllen.

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind die Beschränkung der Rissbreite und die Begrenzung der Verformungen wichtige Kriterien für das Wohnelement. Werden diese nicht eingehalten, fühlen sich Bewohner unsicher und unwohl. Des Weiteren führen Risse zu einem Verlust der Steifigkeit und größere Durchbiegungen sind die Folge. Insbesondere aufgrund der Tatsache, dass das Wohnelement in einem Guss und somit ohne Fugen ausgebildet wird, sind einige Schwierigkeiten bei der Herstellung zu bewältigen.

Bei der Betrachtung des Tragverhaltens kann weder die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit durchgeführt, noch das Last-Verformungs-Verhalten von Sandwichelementen aufgrund der Vielfalt der unterschiedlichen Konstruktionsdetails unmittelbar vorhergesagt werden, sodass eigene experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit erforderlich sind.

1.3 Begründung des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung und Herstellung einer modularen und wandelbaren Wohneinheit aus Sandwichstrukturen mit Deckschichten aus Textilbeton. Das Forschungsvorhaben soll zur Realisierung eines neuen experimentellen Ansatzes in der modularen Bauweise beitragen, die eine wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Alternative zu den bereits vorhandenen Ausführungsvarianten darstellt. Dabei soll das Wohnelement so konzipiert werden, dass sowohl die statischen und konstruktiven Anforderungen als auch die Transportfähigkeit sichergestellt werden.

Neben diesen Anforderungen ist vor allem auch die effiziente und schnelle Produktion der Wohneinheit ein wesentliches Kriterium. Um ressourcenschonend zu bauen, werden die Deckschichten möglichst schlank ausgebildet, wodurch das Gewicht und der Baustoffbedarf verringert werden. Für eine zeiteffizientere Produktion wird die Wohneinheit nicht wie üblich in einzelnen Betonierabschnitten hergestellt, sondern in einem Guss betoniert. Hierfür wird ein speziell angepasster Beton entwickelt, der zum einen eine hohe Fließfähigkeit und Festigkeit und zum anderen ein geringes Schwindverhalten aufweist. Eine zusätzliche Reduzierung der Verformungen im Beton wird mittels einer Vorspannung der Bewehrung erzeugt. Dazu wird ein geeignetes Vorspannsystem für die Carbonfasermatten entwickelt.

1.4 Forschungsverbund / Projektbegleitung / Beratergruppe

Das Projekt wurde durchgeführt von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit Daniel Nyman, M. Eng. Technische Universität Kaiserslautern Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen Gottlieb-Daimler-Straße, Geb. 60 D-67663 Kaiserslautern

Das Projekt wurde seitens des BBR begleitet von:

Fabian Brodbeck, M. Sc.

Forschungskoordinator Fraunhofer Informationszentrum für Raum und Bau (IRB) AG Forschungsbegleitung & Projekte Nobelstraße 12 D-70569 Stuttgart

Inken Pfrengle

Sachbearbeiterin i. A. des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Stab Wissenschaftliche Dienste Bereich Forschungsverwaltung Deichmanns Aue 31-37 D-53179 Bonn

2 Aufbau des Forschungsvorhabens

2.1 Allgemein

Um die genannten Ziele für das Forschungsvorhaben "Entwicklung einer modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit" aus Abschnitt 1.3 zu erreichen, wurden im Voraus differierende Arbeitspakte bestimmt, die sich wie folgt unterteilen:

Mit dem ersten Arbeitspaket wurden die architektonischen sowie ingenieurtechnischen Vorbemessungen und Grundlagen für das Projekt geschaffen. Auf diesem Hintergrund konnten die notwendigen Eigenschaften und Anforderungen der jeweiligen Bestandteile des MonoBau-Körpers definiert werden. Hinsichtlich der Sandwich-Bauweise wurde somit im Arbeitspaket II neben der Materialauswahl die Entwicklung bzw. Optimierung der entsprechenden Schicht vorgenommen. Im Anschluss an dieses Arbeitspaket wurden die experimentellen Voruntersuchungen durchgeführt, die unter anderem zur Bestimmung des Last-Verformungs-Verhaltens der Sandwichelemente und für die Auswahl eines geeigneten Schalungs- und Vorspannsystems dienten. Des Weiteren wurden in diesem Arbeitsprozess die geplanten Eigenschaften der Betondeckschicht verifiziert, um bspw. das Fließ- und Konsistenzverhalten für die spätere Herstellung des Prototypens prognostizieren zu können.

Für den Bau eines MonoBau-Körpers flossen die Ergebnisse und Erfahrungen aus den unterschiedlichen Bauteilversuchsreihen in einem ständigen Optimierungsprozess in die nächsten Module mit ein, sodass in den abschließenden Arbeitspaketen die Konzeption der Schalung sowie die Herstellung des Prototypens behandelt wurde. Das Forschungsvorhaben schließt mit der Analyse des Tragverhaltens und der gewonnenen Erkenntnisse über die Ausführbarkeit der monolithisch hergestellten Wohneinheit ab.

2.2 Arbeitspaket I

Konzeption der modularen Wohneinheit

- Erstellung des Raumkonzeptes und Gebäudeentwurf
- Festlegen der Maße / Dimensionen
- Ermittlung der Anforderungen an die Betonfestigkeit

2.3 Arbeitspaket II

Konzeption der modularen Wohneinheit

- Erstellung des Raumkonzeptes und Gebäudeentwurf
- Festlegen der Maße / Dimensionen
- Ermittlung der Anforderungen an die Betonfestigkeit

2.4 Arbeitspaket III

Herstellen von Sandwichelementen unter Verwendung verschiedener Textile

- Herstellen von dünnen textilverstärkten Platten
- Druck- und 4-Punkt-Biegezugversuche zur Bestimmung des optimalen Textils
- Herstellung von großflächigen Sandwichelementen in stehender Schalform
- Belastungstests der Sandwichelemente

2.5 Arbeitspaket IV

Konzeption der Schalungsform

- Konzeption und Bemessung der Schalungsform/Segmentierung
- Überprüfung der Schalungskonstruktion durch eine Fließsimulation anhand der in AP II ermittelten Kenndaten

2.6 Arbeitspaket V

Konstruktion der Schalungsform und monolithische Herstellung der Prototypen

- Herstellung und Zusammenbau der Schalelemente
- Montage der Textilbewehrung, Styrodur-Elemente und weitere Einbauteile
- Betonage und anschließendes Entschalen
- Testweiser Transport des modularen Wohnelementes

3 Durchführung und Ergebnisse der Module

3.1 Arbeitspaket I

3.1.1 Allgemein

Basierend auf der grundlegenden Konzeption der modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit aus Sandwichstrukturen mit Deckschichten aus Beton ergeben sich verschiedene Raumkonzepte, die individuell anpassbar sind und somit eine vielfältige Nutzung ermöglichen. Exemplarisch für den Gebäudeentwurf mit einer integrierten Wohneinheit dienen die Abbildung 1 bis Abbildung 8. Sie veranschaulichen die pragmatisch, sinnvolle Nutzung eines Wohnraums für Bedürftige oder Personen mit dem Bedürfnis sich in einer wandelbaren Unterkunft verwirklichen zu können.



Abbildung 1: Gebäudeentwurf



Abbildung 2: Struktureller Aufbau



Abbildung 3: Struktureller Aufbau (ohne Frontsystem)



Abbildung 4: Zwischenliegende Dämmung



Abbildung 5: Frontansicht

(Quelle: Bayer, D.; Berger, D.: fatuk, TUK)











Abbildung 8: Schnitt B-B

Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Methodik des Entwerfens und Entwerfen der Fakultät Architektur neben dem exemplarischen Wohnkonzeptideen weitere Visualisierungen für die Einsatzmöglichkeiten im urbanen Umfeld oder in Küstengebieten entwickelt (siehe Abbildung 9 bis Abbildung 11).



Abbildung 9: Urbane Umsetzungsmöglichkeit I



Abbildung 10: Urbane Umsetzungsmöglichkeit II



Abbildung 11: Küstengebiet Umsetzungsmöglichkeit I

3.1.2 Festlegung der Parameter

Die Dimensionierung des einzelnen Moduls wurde an die allgemein zulässigen Grundabmessungen eines LKWs nach § 32 StVZO [1] angepasst. Des Weiteren wurden im Zuge der Assoziation zwischen Gesamtgewicht und Mobilität des Baukörpers die Außenabmessungen mit (L / B / H) 6,0 / 2,4 / 3,0 m definiert.

Die Anforderungen an die Betoneigenschaften wurden aufgrund der Aspekte des filigranen Baues sowie einer ressourcenschonenden Herstellung der Betondeckschichten wie folgt definiert:

- Hohe Druckfestigkeit
- Hohe Dauerhaftigkeit
- Hohe Fließfähigkeit
- Möglichst geringes Schwindverhalten
- Größtkorn $\leq 5 \text{ mm}$
- Sichtbetonklasse SB4

3.2 Arbeitspaket II

3.2.1 Allgemein

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Betondeckschichten wurden verschiedene Untersuchungen zur Ermittlung einer geeigneten Betonzusammensetzung durchgeführt. Hierbei wurden die Versuche im Rahmen dieser Arbeit in drei Gruppen gegliedert (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Gliederung der Prüfungen

Bestimmung der einzelnen Materialeigenschaften	Untersuchung des Strukturverhaltens	Großmaßstäbliche Versuche
Ausbreit- / Setzfließmaß	Horstollungsmothodo	
Zeit (t ₅₀₀)	heistettungsmethode	Herstellung von
Dichte	Bewebrungsart	Probemodulen
Luftporengehalt	Deweniungsart	
Fließgrenze	Schwindverhalten	
Druckfestigkeit	Schwindverhatten	Konzeption und Bemessung
Elastizitätsmodul	Fließsimulation	der Schalungsform
Spaltzugfestigkeit	Fuebsiniulation	

Die erste Kategorie "Bestimmung der einzelnen Materialeigenschaften" beinhaltet unter anderem mit der Bestimmung des Setzfließmaßes nach DIN EN 12350-8 [2], der Frischbetondichte nach DIN EN 12350-6 [3] sowie dem Luftporengehalt nach DIN EN 12350-7 [4] Teile der zu analysierenden Frischbetonparameter. Die Ergänzung zu den Frischbetonuntersuchungen bilden die Festbetonprüfungen hinsichtlich der Druck- und Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und -5 [5, 6] sowie die Bestimmung des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 12390-13 [7] und der Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 [8].

Die zweite Kategorie stellt das Bindeglied zu den großmaßstäblichen Versuchen dar. Hier wird u. a. die Thematik der Bewehrung behandelt, die ein maßgebender Bestandteil in den Überlegungen einer möglichst geringen Verformungsentwicklung des Tragwerksystems war.

Die abschließende Kategorie "Großmaßstäbliche Versuche" beinhaltet mit der Konzeption der Schalungsform sowie weiterer Details zum Bau des Prototypens die grundlegend, planerischen Elemente in der Umsetzung. Den Abschluss des geplanten Forschungsvorhabens bildet die Herstellung eines Probemoduls.

3.2.2 Materialauswahl

Für die geplanten Untersuchungen hinsichtlich eines optimalen Dämmstoffes sowie einer idealen Bewehrung wurden folgende Materialien berücksichtigt:

Dämmung:

- Extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS)
- Drain-Board-Streifen
- Mineralschaum

Bewehrung:

- Stahl-Mikrobewehrung
- Glasfaserbewehrung
- Carbonfaserbewehrung

3.2.3 Entwicklung der Betonzusammensetzung

Für die Produktion der Probekörper wurden verschiedene Zusammensetzungen eines selbstverdichtenden Betons (SVB) mit einer Druckfestigkeit von 130 bis 150 N/mm² verwendet. Die sehr gefügedichte Betonmatrix der jeweiligen Exponate wies stets eine gute Homogenität auf und beinhaltete, wie in Abschnitt 0 definiert, ein maximales Größtkorn von 5 mm.

Die Betonzusammensetzungen glichen aufgrund ihrer Zusammensetzung denen von ultrahochfesten Betonen (UHPC, engl. Ultra High Performance Concrete), jedoch konnte innerhalb der zahlreichen Festbetonuntersuchungen kein konstantes Druckfestigkeitsniveau von mindestens 150 N/mm² [9] dokumentiert werden. Demzufolge werden die in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Betone als Hochleistungsbetone (HPC, engl. High Performance Concrete) deklariert. Mit der Begrifflichkeit der "Hochleistungsbetone" sind neben der Druckfestigkeit von 50 – 150 N/mm² ebenfalls die in Abschnitt 0 dargestellten Anforderungen wie bspw. eine hohe Dauerhaftigkeit, hohe Fließfähigkeit sowie ein möglichst geringes Schwindverhalten verbunden.

Im Laufe des Projekts wurden unterschiedliche HPC-Zusammensetzungen verwendet und hinsichtlich ihrer Frisch- sowie Festbetoneigenschaften untersucht und optimiert. Aufgrund einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse wird in Tabelle 2 auf die Vielzahl an differierenden Rezepturen verzichtet und ausschließlich die zwei Zusammensetzungen zur Herstellung der großen Exponate gegenübergestellt.

Für die finalen Betonzusammensetzungen F-1 und F-2 wurde ein Zement CEM I 42,5 R SR mit hohem Sulfatwiderstand verwendet. Die Zusammensetzungen unterscheiden sich primär im gewählten Größtkorn sowie in der Verwendung eines Konsistenzhalters. Eine weitere Abweichung in der Zusammensetzung befindet sich in der Wahl des Schwindreduzierers. Für die Herstellung des Hochleistungsbetons F-1 wurde ein Superabsorbierendes Polymer (SAP) in Pulverform gewählt und für die Betonzusammensetzung F-2 wurde ein flüssiges Schwindreduktionsmittel verwendet. Die Intention der beiden Stoffe – die Reduktion von Schwindverkürzungen – ist in beiden Fällen identisch, jedoch mit einer unterschiedlichen Herangehensweise. Die Superabsorbierenden Polymere nehmen die Feuchtigkeit während des Betonierprozesses auf und geben sie im Laufe der Zeit wieder ab. Das flüssige Schwindreduktionsmittel hingegen reduziert die Oberflächen-spannung des Wassers im Porenraum, wodurch bei Wasserverlust die Kontraktion und damit die Längenänderung wesentlich reduziert wird.

Ausgangsstoffe	F-1 [kg/m³]	F-2 [kg/m³]
Zement	800,0	800,0
Quarzmehl 1600	194,7	194,7
Sand 0,1/0,6	216,7	216,7
Sand 0/2	173,3	173,3
Basaltsplitt 1/3	-	493,3
Basaltsplitt 2/5	493,3	-
Wasser	70,7	70,7
Silikasuspension (incl. 50% Wasser)	240,0	240,0
Fließmittel (PCE)	20,0	20,0
Schwindreduzierer	3,2	4,0
Konsistenzhalter	-	4,0

Tabelle 2: Zusammensetzung der verwendeten HPC-Zusammensetzungen

3.2.4 Untersuchungen zum Schwindverhalten

Im Zuge der Versuchsreihe zur Bestimmung der Frisch- und Festbetoneigenschaften wurde ebenfalls das Schwindverhalten der verwendeten Hochleistungsbetone nach DIN EN 12617-4 [10] untersucht. Die Schwinduntersuchungen wurden an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 [11] mit den Abmessungen von (L / B / H) 160 / 40 / 40 mm durchgeführt. Die Dehnungsmessungen der Versuchsreihen wurden mit einem Setzdehnmessgerät durchgeführt. Um Streuungen der Messwerte zu vermeiden, wurde jede Messung dreimal wiederholt und daraus ein Mittelwert gebildet.

Die zeitabhängigen Schwind- und Quellwerte der beiden Betonzusammensetzungen sind in den Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt. Die gestrichelten Linien beschreiben den Mittelwertverlauf der Schwind- bzw. Quelldehnungen. Trotz der Mittelwertbildung der Messwerte weisen die gemessenen Dehnungen deutliche Streuungen auf, die aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in den Diagrammen dargestellt werden. Diese Ergebnisse sind neben der Ungenauigkeit der Messung mit dem Setzdehnmessgerät auch auf Schwankungen der Luftfeuchte und der Temperatur im klimatisierten Messraum zurückzuführen. Nach Abschluss der diversen Versuchsreihen lässt sich resümieren, dass durch die Verwendung eines Zements mit hohem Sulfatwiderstand sowie der Zugabe eines Schwindreduzierers die Schwinddehnungen verringert werden konnten. Des Weiteren deutet die Gegenüberstellung von F-1 und F-2 auf einen gewissen Einfluss des Größkorns bzgl. der Schwind- bzw. Quelldehnungen hin. Im vorliegenden Fall können die geringeren Schwind- bzw. Quelldehnungen der Betonzusammensetzung F-2 zum einen eine Schlussfolgerung des noch dichteren sowie homogeneren Gefüges sein und zum anderen ist der effektive w/z-Wert bei der Zusammensetzung mit einem geringeren Größkorn niedriger, sodass sich dies wiederum positiv auf die Schwind- bzw. Quelldehnungen auswirkt.

Da die Messung der unterschiedlichen Dehnungen der Prismen erst nach circa 24 Stunden (nach dem Ausschalen) begonnen wurde, konnte in den Versuchen lediglich ein Teil des Schwindens bestimmt werden. Jedoch tritt bereits ein großer Anteil der Gesamtschwinddehnung schon in Form des plastischen Schwindens und des frühen autogenen Schwindens in diesen ersten Stunden auf.

Durch Fontana 2013 [12] und Pirskawetz u. a. 2011 [13] wurde das frühe autogene Schwinden von verschiedenen Hochleistungsbetonen untersucht. Dabei traten in den ersten 6 bis 10 Stunden nach der Erstarrung des Betons bereits Verformungen von etwa 0,7 bis 1,5 mm/m auf. Diese wurden neben dem autogenen Schwinden jedoch auch auf das Abfließen der Hydratationswärme zurückgeführt. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die in den Schwindversuchen gemessenen Werte um bis zu 1,5 mm/m vergrößert werden müssen.



Abbildung 12: Quelldehnung der Probekörper



Abbildung 13: Schwinddehnung der Probekörper

3.2.5 Frisch- und Festbetonuntersuchungen

Zur Ermittlung der Materialkennwerte der verwendeten Betone wurden die entsprechenden Frischbetonuntersuchungen nach DIN EN 12350 und die Festbetonuntersuchungen nach DIN EN 12390 durchgeführt.

Dabei wurde die Druckfestigkeit an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm ermittelt und die Biegezugfestigkeitsprüfungen sowie die anschließenden Druckfestigkeitsuntersuchungen von Mörtelprismen mit den Abmessungen von (L / B / H) 160 / 40 / 40 mm bestimmt. Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgte an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm. Im Anschluss an die Analyse des E-Moduls wurden die zylindrischen Probekörper noch auf ihre Spaltzugfestigkeit untersucht.

Grundsätzlich wurden die Festbetoneigenschaften im Zuge der Bauteilversuchsreihen ermittelt. Während der Herstellung der Probekörper wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Frischbetonparameter (Setzfließmaß, Zeit t_{500} , Frischbetonrohdichte und Luftporengehalt) zusätzlich bestimmt. Die Verfahren zur Herstellung der Betone und zur Ermittlung der Materialeigenschaften wurden zum Vergleich unter konstanten Bedingungen durchgeführt. Die Ausgangsmaterialien wurden vor dem Mischprozess auf 2 °C (± 1 °C) gekühlt und in einer definierten Reihenfolge dem Mischer hinzugegeben. Anhand der erbrachten Versuche konnten folgende Bandbreiten der verschiedenen Eigenschaften erzielt werden.

Tabelle 3: Frischbetoneigenschaften

Setzfließmaß (SF)	Zeit (t ₅₀₀)	Frischbetondichte (D)	Luftporengehalt (A _c)
930 – 1.030 mm	3,3 – 5,5 s	2.290 – 2.360 kg/m ³	1,1 - 3,2 %

Neben der Kühlung der Ausgangsmaterialien wurde zudem zur Vermeidung von Rissbildung infolge des Schwindprozesses teilweise ein Schwindreduzierer hinzugegeben. Des Weiteren wurden unterschiedliche Zemente als auch Korngrößenverteilungen zur Herstellung differierender Probekörper berücksichtigt. Die Korngröße wurde aufgrund des Siebeffekts der Bewehrung sowie der geringen Öffnung beim Betoniervorgang variiert. Der Frischbeton zeigte, wie in Abbildung 14 dargestellt, bei den unterschiedlichen Hochleistungsbetonen rein optisch keine Entmischungsanzeichen und ein gutes Zusammenhaltevermögen. Dies bestätigte sich auch in den Rissflächen der untersuchten Probekörper (siehe Abbildung 15)



Abbildung 14: Setzfließmaß der differierenden Hochleistungsbetone



Abbildung 15: Rissfläche der Probekörper



Auf Basis der Festbetonanalysen ergaben sich nachstehende Materialeigenschaften, sodass die verwendeten Betone als Hochleistungsbetone nach DIN EN 206-1 [14] in Verbindung mit DIN 1045-2 [15] bezeichnet werden können. Die in Tabelle 4 erzielten Spannungswerte geben die Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen wieder.

Tabelle 4: Festbetoneigenschaften

Mittlere Druckfestigkeit	Mittlerer Elastizitätsmodul	Mittlere Spaltzugfestigkeit
(f _{cm,cube})	(E _{cm})	(f _{ctm,sp})
130 – 150 N/mm²	35.400 – 43.200 N/mm²	3,1 – 5,3 N/mm²

In der Betonzusammensetzung F-2 wurde im Vergleich zur Zusammensetzung F-1 neben der Verringerung des Größkorns ebenfalls ein Konsistenzhalter hinzugegeben, um die Verarbeitbarkeit des Frischbetons über einen längeren Zeitraum gewährleisten zu können. Die Ergebnisse hinsichtlich des Setzfließmaßes sowie die Zeit t₅₀₀ sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Untersuchung umfasst einen Verarbeitungszeitraum von 90 min, die für eine spätere Betonage des Prototypens ausreichen sollte. Vor jeder Messung wurde der Frischbeton jeweils 5 min im Mischer durchmengt. Bei der Auswertung wurde darauf geachtet, dass die Frischbeton-eigenschaften auch nach Ablauf des Untersuchungszyklus den Anforderungen eines selbstverdichtenden Betons entsprechen.

	 har alman	Vararhaitur aanaitra	
I anelle 5' Setztliekmak	iner einen	verarneitiinniszeitrai	im von yu min
		v ci ai D ci tu i q 52 ci ti a t	

		t = 0 min	t = 15 min	t = 45 min	t = 90 min
Setzfließmaß SF	[mm]	1020	980	920	880
Zeit t ₅₀₀	[s]	4	4	6	7

An den Frischbetonuntersuchungen ist deutlich die Wirksamkeit des Konsistenzhalters zu erkennen. Selbst nach einer Wartezeit von 90 min wies der Beton noch ein Setzfließmaß von 880 mm auf, womit die Konsistenzanforderung SF3 von selbstverdichtendem Beton übertroffen wurde. Dennoch traten über den Bearbeitungszeitraum hinweg keine Inhomogenitäten bzw. Entmischungserscheinungen auf.

3.3 Arbeitspaket III

3.3.1 Allgemein

Zur Umsetzung der in Abschnitt 1.3 angegeben Zielsetzung dienen die experimentellen Voruntersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften der Sandwichelemente sowie der Auswahl eines geeigneten Vorspannsystems. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Voruntersuchungen lassen sich wie folgt gliedern:

- Bestimmung des idealen Dämmmaterials
- Ermittlung der optimalen Bewehrung
- Untersuchung der maximal aufbringbaren Vorspannkraft
- Konstruktion eines geeigneten Vorspannsystems für die Betonplatten, Sandwichelemente und für den großmaßstäblichen Bauteilversuch
- Untersuchung des Last-Verformungs-Verhaltens von Betonplatten mit und ohne Bewehrung unter Biegebeanspruchung
- Untersuchung des Last-Verformungs-Verhaltens von Sandwichelementen unter Biegebeanspruchung

Bevor eine gezielte versuchstechnische Untersuchung des Traglastvermögens erfolgen konnte, wurde die maximal aufnehmbare Vorspannkraft der Textilbewehrung in einaxialen Zugversuchen ermittelt. Im Anschluss erfolgte die Planung einer geeigneten Schalungskonstruktion zur Aufbringung der Vorspannkraft. Hierbei ist besonders zu beachten, dass sich durch die induzierte Vorspannung die Verformungen der Schalung in Grenzen halten und die Bauteilgeometrie nicht beeinflusst wird. Die unterschiedlichen Geometrien der Prüfkörper erforderten jeweils eine Anpassung des Vorspannsystems.

Danach wurden Biegezugversuche an bewehrten und unbewehrten Betonplatten durchgeführt. Ziel war es, die Eigenschaften des verwendeten Betons in den Deckschichten der Sandwichelemente gesondert zu ermitteln und dadurch die Wirksamkeit der Textilbewehrung und der Vorspannung zu überprüfen. Neben den Versuchen an Betonplatten wurde abschließend das komplexe Last-Verformungs-Verhalten an Sandwichelementen betrachtet. Diese wurden ebenfalls unter Biegebeanspruchung geprüft und im Speziellen auf die vorherrschenden Versagensarten untersucht.

Durch die experimentellen Voruntersuchungen konnten erste Anhaltspunkte zur Versagensform getroffen und die aufnehmbare Belastung des abschließend, großmaßstäblichen Bauteilversuchs kalkuliert werden.

3.3.2 Bestimmung des idealen Dämmmaterials

Bei der Herstellung der dünnen textilverstärkten Platten wurden zunächst neben der bevorzugten Styrodur-Dämmung noch weitere Materialien als Dämmstoff des Sandwichelements analysiert. Die Untersuchungen ergaben jedoch, dass die Drain-Board-Streifen sowie der Mineralschaum angesichts des zum Teil spröden Versagens und der geringen aufnehmbaren Belastung keine Alternative zum extrudierten Polystyrol-Hartschaum (XPS) darstellen. Des Weiteren konnten die Styrodur-Elemente durch die Zusammenarbeit mit BASF hinsichtlich eines verbesserten Verbunds zwischen Dämmmaterial und Betondeckschicht optimiert werden. Hierfür wurden, wie in Abbildung 16 dargestellt, Stufenfalze in die bestehenden Styrodur 3035 CS – Dämmelemente eingefräst.



Abbildung 16: Darstellung des Styrodurs 3035 CS mit Stufenfalzen

Die Rohdichte sowie die Druckfestigkeit des verwendeten Styrodurs ist in Tabelle 6 zusammengestellt. Die Styrodur-Sorte 2800 C weist zwar bereits werkseitig eine Prägung der Oberfläche auf, jedoch können infolge der speziell gefrästen Profilierung des Styrodurs 3035 CS höhere Verbundkräfte übertragen bzw. erzielt werden. Des Weiteren implizieren die optimierten Dämmelemente neben einer höheren Rohdichte auch eine größere Druckfestigkeit, sodass ebenfalls gesteigerte Schubkräfte übertragen werden können. Indessen variieren die Rohdichten und damit auch die Materialeigenschaften des Styrodurs mit jeder Charge.

Tabelle 6: Eigenschaften der XPS-Sorten

XPS-Produkt	Rohdichte	Druckfestigkeit
Styrodur 3035 CS	32 – 35 kg/m³	350 – 400 kN/m²
Styrodur 2800 C	31 – 33 kg/m³	300 – 350 kN/m²

3.3.3 Ermittlung der optimalen Bewehrung

Ergänzend zur Carbonfaser- und Glasfaser-Textilbewehrung wurde unter anderem eine Stahl-Mikrobewehrung in die filigranen Deckschichten eingelegt (siehe Abbildung 17). Die in diesem Versuchsstadium erbrachten Ergebnisse bezüglich des Tragverhaltens sowie der Tragfähigkeit zeigten, dass im Zustand I das Last-Verformungs-Verhalten der drei Probekörper mit der unterschiedlichen Bewehrungsart nahezu identisch war. Ebenfalls konnten die ersten Risse in etwa bei gleichem Lastniveau festgestellt werden, jedoch wiesen die carbonfaserbewehrten Probekörper im Zustand II ein wesentlich größeres Verformungsaufnahmevermögen auf (siehe Abbildung 18). Die glasfaserbewehrten Probekörper konnten hingegen kein duktiles Bauteilverhalten aufweisen.



Abbildung 17: v.l.n.r Stahl-Mikrobewehrung, Glasfaserbewehrung, Carbonfaserbewehrung



- 1 Kraftmessdose
- 2 Traverse
- 3 Rollenlager
- 4 Probekörper (im Zustand II)
- 5 Auflager



In Anbetracht der geringen Betondeckung, einer höheren Zugfestigkeit bei identischem Querschnitt sowie eines duktilen Versagensverhaltens wurden die Carbonmatten als Bewehrungselement innerhalb der Betondeckschicht definiert. Die Eigenschaften der vom Projektpartner Solidian GmbH zur Verfügung gestellten Carbonfasermatten sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Kenndaten		Längsrichtung	Querrichtung
Garnzugfestigkeit		> 4.000 MPa	> 4.000 MPa
	avg.	2.500 MPa	2.800 MPa
Bruchspannung	min.	2.200 MPa	2.000 MPa
	max.	3.300 MPa	3.500 MPa
Bruchspannung (charakt. Wert)		2.200 MPa	2.200 MPa
Elastizitätsmodul		180.000 MPa	180.000 MPa

Tabelle 7: Technische I	Daten der	Carbonbewehrung
-------------------------	-----------	-----------------

3.3.4 Untersuchung der maximal aufbringbaren Vorspannkraft

Im Vorfeld der Versuche wurde eine geeignete Halterungskonstruktion für die einaxialen Zugversuche konzipiert. Zunächst wurden die Bewehrungsmatten zwischen zwei Stahlplatten mit einer zusätzlichen Gummistreifeneinlage gepresst. Hierfür wurden in die Metallbleche in einem Abstand von 4 cm Löcher gebohrt und mit Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 auf ein definiertes Drehmoment festgezogen. Im Anschluss wurde die in Abbildung 19 illustrierte Konstruktion in die Prüfmaschine eingespannt und jeweils nach einer Laststeigerung von 1 kN die Längenänderung zwischen den Metallblechen dokumentiert, bis die Bewehrungsmatte aus der Halterung gezogen wurde (siehe Abbildung 20).



- 1 Halterung der Zugmaschine
- 2 Halterung der Carbonmatte
- 3 Schraube (Drehmoment 60 Nm)
- 4 Gummistreifen
- 5 Carbonmatte

Abbildung 19: Aufbau zur Prüfung der möglichen Vorspannung



Abbildung 20: Fotodokumentation der Versuchsreihe "Vorspannung mit Gummistreifen"

Dieser Versuchsvorgang zeigte, dass die Bewehrungselemente inklusive Gummistreifen ungeachtet einer Steigerung der Anzieh- bzw. Halterungskräfte der seitlich angebrachten Schraubenreihen bei erhöhter Zugkraft immer wieder aus ihrer Fixierung gelöst wurden. Nach einer Profilierung der Stahlbleche zur Optimierung des Verbunds zwischen Metallblech und Carbonbewehrung sowie einer Variation der Schraubengröße wurde der Versuchsvorgang bis zum Erreichen der gewünschten Vorspannkraft ohne eine Gummistreifeneinlage wiederholt (siehe Abbildung 21 bis Abbildung 23).



Abbildung 21: Profilierte Stahlbacken inkl. adaptierter Schraubengröße



Abbildung 22: Fotodokumentation der Versuchsreihe "Vorspannung ohne Gummistreifen"

Die Analyse dieses Vorversuchs ist in Abbildung 23 dargestellt. Das Diagramm belegt ein lineares Verhältnis von Kraft zur Längenänderung bis zu einer Zuglast von 26 kN. Danach zeichnet sich eine rapide ansteigende Längenänderung ab, die auf das Herausziehen der Carbonfaserbewehrung aus der Halterung zurückzuführen ist. Der Versuch wurde bei einer Zuglast von 27 kN abgebrochen, da die Verformung nicht mehr im Verhältnis zur realen Umsetzung stand. Dennoch erwies sich eine Halterung ohne Gummistreifen zuzüglich einer Profilierung der Stahlhalterung als realisierbar.



Abbildung 23: Kraft-Verformungs-Diagramm

3.3.5 Biegeversuche an Betonplatten

3.3.5.1 Allgemeines

Das Zug- und Biegeverhalten der Deckschichten beeinflusst erheblich das Tragverhalten der Sandwichelemente. Daher wurden in den Biegeversuchen die Eigenschaften der Deckschichten separat ermittelt. Des Weiteren sollte der Einfluss der Bewehrung sowie der Vorspannung in unterschiedlichen Versuchsreihen bestimmt werden.

Die Betonplatten wurden mit den Abmessungen (L / B / H) 0,90 / 0,25 / 0,02 m hergestellt und haben somit die identische Plattenstärke, die sie beim späteren monolithischen Baukörper besitzen. Bei den Platten mit Bewehrung wurde darauf geachtet, dass die Carbonfaserbewehrung mittig ausgerichtet ist, um etwaige Dysbalancen im Baukörper ausschließen zu können. Für einen Vergleich der Betonplatten mit und ohne Vorspannung wurde bei der letzten Versuchsreihe auf diese verzichtet.

3.3.5.2 Probekörperherstellung

Ein wichtiger Aspekt der Probekörperherstellung war die Umsetzung der zuvor ermittelten maximalen Zugkraft auf die Probekörper. Dabei spielte die Konstruktion der Schalung und des Vorspannsystems eine zentrale Rolle. In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die beiden Aufbauten der Schalungen und der Vorspannkonstruktion für die Bewehrung dargestellt. Während

die Platten ohne Bewehrung mit einem geringeren Aufwand hergestellt werden konnten, war die Herstellung der Platten mit Bewehrung hinsichtlich der Vorspannkonstruktion mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden.



Abbildung 24: Schalung der Platten ohne Bewehrung



Abbildung 25: Schalung und Vorspannkonstruktion der Platten mit Bewehrung



Abbildung 26: Seitenansicht des Vorspannsystems

Für die Herstellung der bewehrten Betonplatte wurden an die Halterungskonstruktion der Bewehrung zwei Gewindestangen angeschweißt, damit eine gleichmäßig verteilte Kraft an der zwischenliegenden Bewehrung aufgebracht werden konnte. Die Gewindestangen wurden durch ein Metallblech geführt und mit Muttern angezogen. Um einen Widerstand aufzubauen, wurden jeweils in Höhe der Gewindestangen links und rechts vom Bauteil rechteckige Hohlprofile angeordnet, die beim Anziehen der Muttern auf Druck belastet wurden. Mit diesem Mechanismus wurde auf die Halterungskonstruktion der Bewehrung Zug ausgeübt und die Bewehrung vorgespannt. Eine Seitenansicht der Konstruktion ist in Abbildung 26 dargestellt.

Nach einer Erhärtungszeit von einem Tag wurden die Bauteile ausgeschalt und die Vorspannung gelöst. Abbildung 27 zeigt die Betonplatten nach dem Ausschalen. Die seitlichen Überstände der Bewehrung wurden abgeschnitten und die Betonplatte mit einer nassen Vliesfolie umwickelt und bis zu den Biegeversuchen trocken gelagert.



Abbildung 27: Betonplatten mit Bewehrung nach dem Ausschalen

3.3.5.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung des Tragverhaltens der bewehrten und unbewehrten Betonplatten unter Biegebeanspruchung wurden die Betonplatten anhand des 4-Punkt-Biegezugversuchs untersucht. Die Einzellast des Prüfzylinders wurde über eine Lastverteilungskonstruktion in zwei gleich große Einzellasten aufgeteilt und mithilfe von Rollenlagern in den Drittelspunkten der Stützweite in die Probekörper eingeleitet. Damit konnte eine äquivalente Beanspruchung, wie bei einem Träger mit einer Gleichstreckenlast erzeugt werden. In Querrichtung der Probekörper wurde die Last als gleichmäßig verteilte Linienlast eingeleitet. Die Spannweite der Auflager betrug 750 mm. Die Auflager bestanden aus Stahlrollen, um somit problemlos eine Verdrehung der Probekörper zu gewährleisten. Eine Darstellung des Versuchsaufbaus und der daraus resultierenden Momentenverteilung ist in Abbildung 28 abgebildet.



Abbildung 28: Versuchsaufbau und Momentenverteilung des 4-Punkt-Biegezugversuchs

Die einwirkende Belastung wurde weggesteuert mit einer konstanten Geschwindigkeit aufgebracht. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde aufgrund der großen Duktilität der carbonfaserbewehrten Betonplatten auf 10 mm/min eingestellt. Bei den unbewehrten Platten wurde die Geschwindigkeit auf 1 mm/min reduziert.

3.3.5.4 Versuchsergebnisse

Bei allen Biegezugversuchen, in denen die Betonplatten eine Bewehrung enthielten, zeigten diese ein sekundäres Biegedruckversagen. Hierbei stellten sich mehrere regelmäßig verteilte, feine Risse im Abstand von ca. 3 cm zwischen den Lasteinleitungspunkten ein, bevor es zur Entstehung eines Makrorisses kam (siehe Abbildung 29). Dieses Verhalten ist auch im Last-Verformungs-Diagramm erkennbar, bei dem die maximalen Biegezugspannungen erst bei größeren Verformungen auftraten. Das Versagen der bewehrten Probekörper wurde somit aufgrund der äußerst duktilen Versagensform vorangekündigt. Es traten vorher weder Längsrisse noch Abplatzungen des Betons auf.


Abbildung 29: Rissbildung zwischen den Lasteinleitungspunkten

Nach vollständiger Ausbildung der Rissverteilung an der Unterseite begannen diese mit zunehmender Verformung sich zu vergrößern und über die Querschnittshöhe nach oben zu wandern. Es stellte sich, wie in Abbildung 30 dargestellt, an der Vorderseite der Platte in Höhe der Dehnungsnulllinie eine verzweigte Rissbildung ein.



Abbildung 30: Rissbildung an der Vorderseite der Betonplatte

Im Gegensatz zu den bewehrten Probekörpern ließen die Betonplatten ohne Bewehrung keine Vorankündigung des Versagens erkennen. Sie versagten schon bei geringen Verformungen schlagartig und wiesen damit ein sehr sprödes Materialverhalten auf. Der Bruch in der Betonplatte erfolgte durch Überschreiten der Festigkeit in der Zugzone des Betons. In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind beispielhaft die maximalen Durchbiegungen für die Platten mit und ohne Bewehrung illustriert. Generell wiesen alle Versuche mit und ohne Bewehrung jeweils zwei Bruchstellen auf, die sich im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten befanden (siehe Abbildung 33).



Abbildung 31: Maximale Durchbiegung einer carbonbewehrten Betonplatte



Abbildung 32: Maximale Durchbiegung einer unbewehrten Betonplatte



Abbildung 33: Typischen Versagen der Betonplatten



Abbildung 34: Typisches Last-Verformungs-Diagramm der Betonplatten

Anhand des Last-Verformungs-Diagramms in Abbildung 34 lässt sich das typische Tragverhalten der unterschiedlichen Betonplatten analysieren. Im ungerissenen Zustand (Zustand I) wiesen die Betonplatten ein linear-elastisches Verformungsverhalten auf. Mit Überschreitung der Betonzugfestigkeit traten erste größere Risse auf und die Durchbiegung nahm im Vergleich zum Zustand I überproportional zu. Nach abgeschlossenem Rissbild stieg die Last-Verformungs-Kurve wieder annähernd linear an, bis der Bruch des Bauteils eintrat.

Erwartungsgemäß verhielt sich die Betonplatte ohne Bewehrung bis zur Erstrissbildung wie die Probekörper mit Bewehrung, linear-elastisch. Die einzelnen Unebenheiten im Diagramm lassen sich durch die Entstehung feiner Mikrorisse in der Betonmatrix erklären, die zu einem Abflachen der Kurve führen. Mit Überschreiten der Biegezugfestigkeit bildeten sich die Mikrorisse zu einem Einzelriss aus und unmittelbar danach trat ein sofortiges Versagen der Betonplatte auf, das mit einem direkten Lastabfall verbunden war.

Die im 4-Punkt-Biegezugversuch erreichten Maximalverformungen der Platten mit Bewehrung zeigen in auffallender Weise, welch duktiles Verhalten die Platten aufweisen. Die extremen Verformungen von bis zu 86 mm in Feldmitte des Balkens führten zu einem Einschnüren der Betondruckzone und zu einer zunehmenden Gefügeauflockerung. Bei Erreichen der Bruchlast war die Tragfähigkeit der Druckzone erschöpft und die Folge war ein Biegedruckversagen der Platten mit Bewehrung. Die erzielten Zugfestigkeiten lagen dabei über dem 3- bis 5-fachen der Erstrisskraft. Im Gegensatz dazu verhielten sich die Betonplatten ohne Bewehrung sehr spröde

und versagten schon bei geringen Verformungen durch ein Überschreiten der Betonzugfestigkeit. Vergleicht man die erzielten Zugfestigkeiten der unbewehrten Platten mit der Erstrisskraft der bewehrten Betonplatte ohne Vorspannung lässt sich eine gute Übereinstimmung feststellen.

Die Resultate der Biegezugversuche verdeutlichen die Wirksamkeit der Vorspannung auf das Last-Verformungs-Verhalten der Betonplatten. Dies lässt sich auf das Überdrücken des Betons infolge der Vorspannung zurückführen, womit eine spätere Überschreitung der Zugfestigkeit, eine deutlich höhere Erstrisskraft F_{cr} und die damit zusammenhängende Rissbildung erfolgt.

3.3.6 Biegeversuche an Sandwichelementen

3.3.6.1 Allgemeines

Nachdem das Tragverhalten der Deckschichten ausführlich untersucht wurde, konnte im Anschluss das Verbund- und Tragverhalten der Sandwichelemente analysiert werden. Hierzu wurden Versuchskörper hergestellt, die den Querschnittsabmessungen des monolithischen Bauteilkörpers entsprechen. Bei der innenliegenden Kernschicht handelte es sich um eine von der Firma BASF hergestellten XPS-Dämmung mit einer Querschnittsbreite von 11,5 cm und einer speziellen, querlaufenden Dämmplattenmaserung, wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert. Diese Profilierung wurde nachträglich in die Styrodur 3035 CS – Dämmelemente eingefräst, um einen optimierten Verbund der einzelnen Schichten herstellen zu können.

Abbildung 35 veranschaulicht den Querschnittsaufbau der Sandwichelemente und die Maserung der Dämmplatte. Die Besonderheit besteht in den querlaufenden Rillen der Dammplätte, die in einem Abstand von 2 cm angeordnet sind. Für diese Versuchsreihe wurden die identischen Abmessungen wie bei den Betonplatten aus Abschnitt 3.3.5.1 gewählt.



Abbildung 35: Draufsicht und Querschnitt der Sandwichelemente

3.3.6.2 Probekörperherstellung

Im ersten Schritt der Probekörperherstellung wurden aus den Dämmplattentafeln die Kernschicht für die Sandwichelemente mit der Länge von 90 cm und einer Höhe von 26,8 cm herausgeschnitten. Die zusätzlichen 1,8 cm wurden zur Fixierung der Dämmung am unteren Fuß zwischen der Schalung vorgesehen (siehe Abbildung 36 links).

Im zweiten Schritt erfolgte der Einbau der Dämmung und das mittige Ausrichten der Carbonfaserbewehrung in den Deckschichten. Wie in Abbildung 36 rechts dargestellt, wurde zwischen den Stirnhölzern am Ende des Bauteils Dichtungsbänder befestigt und durch diese die Carbonfaserbewehrung gelegt. Mögliche Krümmungen der Bewehrung innerhalb der Deckschichten wurden durch die später aufgebrachte Vorspannung wieder ausgeglichen.



Abbildung 36: Querschnitt und Draufsicht der eingebauten Dämmung und Carbonfaserbewehrung

Durch den breiteren Querschnitt der Bauteile und der zweiten Deckschicht musste das Vorspannsystem an den Stirnseiten der Schalung angepasst werden. Anstelle des Metallblechs wurden die Gewindestangen der Halterungskonstruktionen durch U-Profile geführt und mit Muttern angezogen. Für die Kraftübertragung von den U-Profilen auf die längslaufenden Hohlprofile wurden querlaufende Hohlprofile in den Zwischenraum der Halterungskonstruktionen und den U-Profilen angeordnet (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38)



Abbildung 37: Schalung und Vorspannkonstruktion der Sandwichelemente



Abbildung 38: Konstruktionsdetail an der Stirnseite



Abbildung 39: Seitenansicht des Vorspannsystems

Im letzten Schritt der Probekörperherstellung wurden die Tragschichten des Sandwichelements betoniert, nach einem Tag ausgeschalt und die Vorspannung gelöst. Der Überstand der Dämmung wurde mit einem heißen Draht abgetrennt und die Probekörperlagerung erfolgte wie schon bei den Betonplatten in einer nassen Vliesfolie umwickelt im trockenen Klima bis zum Tag der Bauteilprüfung.

3.3.6.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Analog zu den Biegeversuchen bei den Deckschichten wurden die Sandwichelemente ebenso mit einem 4-Punkt-Biegezugversuch untersucht. Die Abstände der Lasteinleitungspunkte und der Abstand der Auflager waren dabei identisch (siehe Abschnitt 3.3.5.3). Die Last wurde weggesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 10 mm/min aufgebracht.

3.3.6.4 Versuchsergebnisse

Aus den Beobachtungen während und nach dem Versuch konnten wichtige Erkenntnisse über das und Verbundverhaltens der einzelnen Schichten komplexe Tragder getesteten Sandwichelemente gewonnen werden. In den beiden Tragschichten entstanden mit zunehmender Verformung Risse, bis sich ein abgeschlossenes Rissbild einstellte und nur noch ein Rissfortschritt und eine Rissvergrößerung zu beobachten war. Während in der unteren Tragschicht überwiegend Biegerisse auftraten, wurden in der oberen Tragschicht neben den Lasteinleitungspunkten schräglaufende Schubrisse beobachtet. Bezüglich der Rissanzahl wurde in der unteren Tragschicht eine Mehrzahl an gleichmäßig verteilten Rissen festgestellt. Trennrisse sind in den Tragschichten in keinem der Versuche aufgetreten.



Abbildung 40: Rissbildung in der unteren und oberen Tragschicht

In der Kernschicht haben sich trotz der hohen Belastungen keine sichtbaren Risse gebildet. Lediglich an den Auflagerenden wurde die Dämmung zusammengedrückt und der obere und untere Teil gegeneinander verschoben, was aber nicht zu einem kompletten Bauteilversagen führte. Die in Abbildung 40 vermeintlich erkennbaren Risse in der Dämmung sind Unebenheiten, die durch den Abschnitt der überstehenden Dämmung entstanden.

Das Verbundverhalten und damit die Haftung zwischen Beton und Dämmung erwies sich als äußerst beständig. Es konnte bis zur maximalen Tragfähigkeit der Sandwichelemente kein Verbundversagen festgestellt werden. Dies zeigte, dass mit der gewählten Dämmplattenmaserung eine ausreichende Haftsicherung der Schichten hergestellt wurde und keine zusätzlichen Verbindungsmittel notwendig waren. Um zu überprüfen, inwieweit der Beton die Rillen ausfüllte, wurden die Sandwichelemente im Anschluss der Versuche durchschnitten. In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind die Querschnitte der Sandwichelemente mit den in Abschnitt 3.2.3 aufgelisteten HPC-Zusammensetzungen dargestellt. Hierbei ist bei beiden Zusammensetzungen erkennbar, dass die Rillen vollständig und ohne Fehlstellen ausgefüllt wurden. Ein Ablösen der Schichten konnte auch hier nicht erkannt werden.



Abbildung 41: Schnitt durch ein Sandwichelement (F-1-Zusammensetzung)

Abbildung 42: Schnitt durch ein Sandwichelement (F-2-Zusammensetzung)

Das Versagen der Sandwichelemente kündigte sich mit ähnlich großen Verformungen wie bei den Betonplatten an. Ein großer Unterschied bestand darin, dass trotz des Hauptversagens weiterhin Lasten abgetragen wurden. Dies lässt sich mit den Umlagerungsmöglichkeiten der Sandwichelemente begründen. Das Hauptversagen entstand trotz der symmetrischen Ausführung des 4-Punkt-Biegezugversuchs nicht gleichzeitig auf beiden Seiten, sondern entweder auf der rechten oder auf der linken Seite des Versuchskörpers. Dabei handelte es sich bei allen Sandwichelementen um ein lokales Querkraftversagen der oberen Deckschicht im Bereich der Lasteinleitung. Es bildete sich zuerst an der Unterkante der Tragschicht ein Riss aus, der mit zunehmender Kraft schräg nach oben zur Lasteinleitung wanderte und im Anschluss schließlich zum Versagen führte. Hierbei platzen Stücke des Betons ab und teilweise wurde die Carbonbewehrung freigelegt. In Abbildung 44 ist dieses Versagen an der rechten Lasteinleitung zu erkennen.







Abbildung 44: Versagen des Sandwichelements

Nach dem Entstehen dieses Bauteilversagens konnten im weiteren Belastungsverlauf noch andere Versagensarten beobachtet werden. So entsteht, wie in Abbildung 44 veranschaulicht, zum Querkraftversagen zusätzlich ein Biegedruckversagen der unteren Tragschicht. Eine Steigerung der Traglast konnte hingegen nicht mehr erzielt werden. Im Rahmen der Biegezugversuche konnten 4 unterschiedliche Versagensformen festgestellt werden. Die Versagensarten sind in der nachfolgenden Tabelle beschrieben.

Tabelle 8: Versagensarten der Sandwichelemente

Beschreibung

Beispielaufnahme

Lokales Querkraftversagen der oberen Deckschicht:

Diese Versagensart bildete bei allen Versuchen die Maßgebende. Es bildete sich ein diagonal verlaufender Schubriss über die vollständige Höhe der oberen Tragschicht aus. Der Schubriss stellte sich aufgrund der einleitenden Last direkt neben der Lasteinleitungsrollen im Bereich der hohen Querkraft ein.



Lokales Biegedruckversagen der unteren Deckschicht:

Das Versagen trat infolge großer Verformungen durch ein Einschnüren der Betondruckzone und damit einhergehenden Überschreitung der Druckfestigkeit des Betons ein. Dieses konnte zeitlich kurz nach dem lokalen Querkraftversagen beobachtet werden.

Schubversagen zwischen Kern und Deckschicht:

Bei dem Schubversagen löste sich die obere Deckschicht von der Kernschicht und ragte einige Zentimeter über dem Kern hinaus. Das Versagen des Verbunds zwischen den Schichten trat allerdings erst nach dem Querkraftversagen auf und wurde durch den querlaufenden Riss wahrscheinlich begünstigt, indem die Betonplatte seitlich nach oben geschoben wurde.

Druckversagen im Kern am Auflager:

Das Druckversagen im Kern bildete sich meist in der Mitte der Kernschicht aus. Es zeigte sich ein Knick in der Dämmung, der durch die gegenseitige Verschiebung der unteren und oberen Hälfte des Sandwichelements entstand. Das Versagen trat teilweise schon vor dem Querkraftversagen auf, führte aber zu keinem Lastabfall.

Das in Abbildung 45 dargestellte Last-Verformungs-Diagramm stellt einen typischen Verlauf der untersuchten Probekörper dar. Das aufgezeichnete Verhalten lässt sich in drei unterschiedliche Bereiche unterteilen:

- Bereich I: Der erste Bereich wird durch einen starken Lastanstieg mit geringen Verformungen gekennzeichnet. Die Laststeigerung nimmt annähernd linear zu.
- Bereich II: In diesem Bereich flacht durch die Entstehung von mehreren Rissen in den Tragschichten die Lastverformungskurve infolge eines Steifigkeitsverlustes ab. Dieser Bereich hält solange an, bis ein Versagen des Bauteils eintritt und die Last drastisch nach abfällt.





 Bereich III: Der letzte Bereich wird dadurch gekennzeichnet, dass trotz des Versagens des Bauteils die Last durch die Umlagerungsmöglichkeiten im Sandwichelement wieder leicht ansteigt. Ein Erreichen der maximalen aufgebrachten Last ist aber nicht mehr möglich.



Abbildung 45: Typisches Last-Verformungs-Diagramm der Sandwichelemente

Der exemplarische Last-Verformungs-Verlauf demonstriert, dass mit dem gewählten Querschnitt der Sandwichelemente bestehend aus einer beidseitigen, dünnen Textilbetondeckschicht zzgl. einer aufgebrachten Vorspannung und der zwischenliegenden Kernschicht aus einer XPS-Dämmung Auflasten von über 30 kN verwirklicht werden konnten. Im Vergleich zu den einzelnen Betonplatten mit Bewehrung wurde eine 4- bis 6-fache Steigerung der maximalen Tragfähigkeit realisiert. Infolge der Umlagerungsmöglichkeiten der Lasten im Sandwichelement war der Steifigkeitsabfall bei der Entstehung erster Risse deutlich geringer als bei den Betonplatten. Die Kernschicht konnte einen wesentlichen Anteil zur Begrenzung der Verformungen und der Aufnahme der Kräfte beitragen.

Die Verbundfestigkeit der einzelnen Schichten, welches für Sandwichelemente von essenzieller Bedeutung ist, konnte mit der verwendeten Maserung in der Dämmplatte ohne Verbundmittel gewährleistet werden. Vor allem um die Reduzierung der Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit einzuhalten, musste eine ausreichende Verbundfestigkeit vorliegen. Die Profilierung wurde hierbei ausreichend groß gewählt, um ein vollständiges Verfüllen zu ermöglichen und damit eine gute Haftung der Schichten herzustellen. Ein Versagen der Verbundfestigkeit wurde bei den Versuchen erst nach dem lokalen Querkraftversagen beobachtet und war damit für das Bauteil nicht mehr entscheidend.

In der Kernschicht, die hauptsächlich Quer- bzw. Schubkräfte aufnimmt, zeigten sich keine Risse während der Versuchsdurchführung. Auch sind keine nennenswerten Stauchungen in der Mitte der Kernschicht aufgetreten. Lediglich im Auflagerbereich konnte eine gegenseitige Verschiebung der oberen und unteren Hälfte der Dämmung mit einem leichten Knick beobachtet werden.

Bei den Biegezugversuchen der unterschiedlichen Sandwichelemente konnten im Allgemeinen ähnliche Versagensformen des Bauteils festgestellt werden. Somit ließen sich erste Prognosen für das mögliche Versagen des monolithisch hergestellten Probekörpers treffen. Die erzielten Tragfähigkeiten dienten ebenfalls als erste Hinweise.

3.4 Arbeitspaket IV

3.4.1 Allgemein

Im Arbeitspaket IV lag der Schwerpunkt in der Konzeption und Bemessung der Schalungsform bzw. dessen Segmentierung. Die Abmessungen einer einzelnen Wohneinheit sind wegen der Transportfähigkeit und der Austauschbarkeit der einzelnen Module begrenzt. Daher sollten sie in der späteren Ausführung, wie im Abschnitt 0 definiert, maximal eine Breite von 6 m, eine Länge von 2,4 m und eine Höhe von 3 m aufweisen. Die einzelnen Einheiten können danach wahlweise durch Fassadenelemente abgeschlossen oder mit weiteren Elementen ergänzt werden. Für den Bau des 1:1 Prototyps, der in einem Fertigteilwerk erfolgen muss, wurde labortechnisch der Maßstab 1:3 gewählt, das hierdurch eine hinreichend genaue Aussage für die Fertigung sowie das Traglastverhalten prognostiziert werden kann. Die sich daraus ergebenen Abmessungen sind in der Abbildung 46 angegeben. Die Tiefe des Baukörpers beträgt 0,8 m. Die Herstellung erfolgte in einer stehenden Schalung, sodass die seitliche Ansicht auch dem Grundriss der Betonage entspricht.



Abbildung 46: Seitliche Ansicht des monolithisch hergestellten Baukörpers

Die größeren Dimensionen des Bauteils und insbesondere die Knotenstellen der Wände mit dem Boden und der Decke, die in den vorher getesteten Bauteilen nicht vorhanden waren, stellten die Ausführung des Schal- und Vorspannsystems vor besondere Herausforderungen. Damit auch die innenliegenden Betontragschichten vorgespannt werden konnten, musste eine sorgfältige Segmentierung der einzelnen Bestandteile erfolgen. Wie mit den Schwierigkeiten bei der Herstellung umgegangen und welche Traglasten erzielt wurden, wird im Folgenden detailliert beschrieben.

3.4.2 Innere Schalung

Für die Befestigung der Schalelemente am Boden wurde der Versuchskörper auf einer Holztafelplatte errichtet. Diese wurde zusätzlich mit Doka-Trägern unterlegt, damit während dem Aufbau durch Seile eine Verschiebung mit dem Kran in der Prüfhalle möglich war. Zuerst wurde mittig auf die Holztafelplatte eine weitere Platte mit den Abmessungen (L / B) 1,73 / 0,73 m befestigt. Die Abmessungen entsprachen dem Innenabstand der gegenüberliegenden Dämmschichten. Daraufhin wurden die inneren Schaltafeln umlaufend mit einem Randabstand von 2 cm sowie einer Höhe von 80 cm auf der Holzplatte angeordnet und am unteren Fuß verschraubt. Bevor im Anschluss der Einbau der Carbonfaserbewehrung und Dämmung vorgenommen wurde, mussten die Schaltafeln mit Trennmittel eingesprüht und im Innenraum mit Kanthölzern gegeneinander verkeilt werden.



Abbildung 47: Aufbau der inneren Schalung, Draufsicht und Querschnitt

3.4.3 Äußere Schalung

Im abschließenden Arbeitsschritt bzgl. der Konzeption der Schalungsform bzw. dessen Segmentierung wurde der Aufbau der äußeren Schalung entwickelt. Hierbei wurde, wie auch bei der inneren Schalung, an der Unterseite der senkrechten Schalungswand ein waagrechtes Holzstück angeschraubt und die Innenseiten mit Trennmittel besprüht. Die Abmessung der Konstruktion betrug 1,706 bzw. 0,706 m, sodass diese bündig mit der Außenkante der unteren Holztafel fixiert und die Carbonfaserbewehrung ausgerichtet werden konnte (siehe Abbildung 48). Zudem wurde darauf geachtet, dass der Abstand von 2 cm für die Betondeckschicht zwischen Schalung und Dämmung eingehalten wurde.



Abbildung 48: Aufbau der äußeren Schalung, Draufsicht und Querschnitt

Ein entscheidendes Detail in der Planung war die Ausführung der Eckbereiche, da die Carbonfaserbewehrung der innen- und außenliegenden Betondeckschichten durch die Öffnungen der Schalung nach außen vorgespannt werden musste. Die segmentierten Elemente wiesen jeweils eine Breite von 13,1 cm auf, sodass die Bewehrungsmatte mithilfe der äußeren Schalung zentriert gehalten werden konnte.



Abbildung 49: Eckdetail nach Aufbau der äußeren Schalung

3.5 Arbeitspaket V

3.5.1 Allgemein

Das abschließende Arbeitspaket V umfasst den Bau des Prototypens mit der Beschreibung weiterer Details (bspw. den Aufbau des Vorspannsystems), die in Arbeitspaket IV nicht bereits behandelt wurden sowie die Traglastuntersuchung am großen Prüfrahmen zuzüglich einer Photogrammetriemessung.

3.5.2 Dämmung und Carbonfaserbewehrung

Nachdem die innere Schalung sowie die Unterkonstruktion, wie in Abschnitt 3.4.2 erläutert, montiert wurde, konnte die Kernschicht aus dem Dämmmaterial zuzüglich der Carbonfaserbewehrung zugeschnitten werden. Hinsichtlich der diffizilen Bewehrungsvorspannung in jeder Betondeckschicht mussten einige Details (wie bspw. die Durchführung der Bewehrungsmatten der inneren Tragschicht durch die Dämmung, die äußere Betondeckschicht inkl. Bewehrung und durch die äußere Schalung, siehe Abbildung 50) beachtet werden.

Die Zuschnitte wurden auf Basis der Plattengröße bzw. der Abstände zwischen den Bewehrungselementen bestimmt. Der Verbund einzelner Dämmplatten wurde, wie in Abbildung 51 und Abbildung 52 verdeutlicht, anhand eines PUR-Klebstoffes hergestellt und über Nacht mit Schraubzwingen fixiert.



Abbildung 50: Problemfeld des Baukörpers (Eckpunkt)



Abbildung 51: Auftragen des Flüssigklebers



Abbildung 52: Zusammenpressen der geklebten Dämmung

Für den monolithisch hergestellten Probekörper wurde dasselbe Einspannprinzip der Dämmung am Fußpunkt angewandt wie bei den Sandwichelementen in Abschnitt 3.3.6.2. Die Styrodur-Elemente wurden zwischen die Holztafeln eingeklemmt und benötigten daher eine zusätzliche Höhe von 1,8 cm. Der Zuschnitt der Dämmtafeln orientierte sich an der Plattenmaserung, die im Bauteil quer ausgerichtet wurde. Die Abmessungen der einzelnen Abschnitte sind in Abbildung 53 dargestellt. Die blauen Striche stellen dabei die Anordnung der Carbonfaserbewehrung dar.





Nachdem der Kleber getrocknet war, konnten die zugeschnittenen Elemente der Dämmung an die vorgesehenen Felder platziert werden. Hierfür wurden zunächst die längs- und querlaufenden Seiten der Dämmung aufgestellt sowie die äußeren Holztafeln gegen die Fußpunkte der Dämmung geschoben und fixiert. Die Montage der Eckdämmung erfolgte anschließend an den Aufbau der Bewehrung.



Abbildung 54: Vorderansicht der eingebauten Dämmung

Abbildung 55: Seitenansicht der eingebauten Dämmung

Für den Aufbau der Bewehrung musste die angesprochene Thematik der sich kreuzenden Carbonfaserbewehrung in den Eckpunkten berücksichtigt werden. Hierfür wurden die Enden der Bewehrungsmatten der innenliegenden Betondeckschicht aufgeschnitten, um anschließend das äußere Carbongelege von vorne einfädeln zu können. Eine Detailansicht der Ausführung eines Eckpunktes ist in Abbildung 56 dokumentiert. Die Länge der Flächenbewehrungen wurde angesichts der späteren Montage der Halterungskonstruktion für die Vorspannung mit einem Überstand von 10 cm auf beiden Seiten des Probekörpers gewählt.

Abgeschlossen wurde der Aufbau mit der Einbringung der fehlenden Dämmelemente in den Eckbereichen sowie der in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Außenschalung.



Abbildung 56: Detailansicht eines Eckpunktes nach Verlegen der Bewehrung



Abbildung 57: Vorderansicht des Probekörpers nach Einbau der Carbonfaserbewehrung



Abbildung 58: Vorderansicht der äußeren Schalung



Abbildung 59: Seitenansicht der äußeren Schalung

3.5.3 Vorspannsystem und Holz-Stabilisierungen

Der letzte Arbeitsschritt beinhaltete den Aufbau des Vorspannsystems und die Stabilisierung der Konstruktion mit Kanthölzern. Hierzu wurden, wie bei den Voruntersuchungen, die gleichen Vorrichtungen und Stahlprofile gewählt. Bei den Stahlprofilen handelte es sich um warmgefertigte Hohlprofile mit rechteckigem Querschnitt der Stahlgüte S235. Die Außenabmessung der Profile betrug (B / H) 80 / 40 mm und wiesen eine Wandstärke von 4 mm auf. Die Längen der eingesetzten Hohlprofile sind in Abbildung 60 dargestellt. Diese wurden mit einem Überstand von 200 mm auf beiden Seiten des Bauteils gewählt, sodass der Zwischenraum für die notwenige Holz-Stabilisierung genutzt werden konnte.



Abbildung 60: Aufbau des Vorspannsystems, Draufsicht und Querschnitt

Bevor die Konstruktion der umlaufenden Profile montiert werden konnte, mussten zunächst die Flächenbewehrungen mit den Halterungskonstruktionen verschraubt sowie die U-Profile auf die Gewindestangen aufgesetzt werden. Für eine gleichmäßige Lastverteilung der Vorspannkraft auf die Hohlprofile wurde eine 3-lagige Anordnung der Profile ausgeführt. Während die unteren und oberen Stahlprofile jeweils auf den Gewindestangen aufgelegt werden konnten, wurden die mittigen Hohlprofile mit Holztafeln, wie in Abbildung 61 veranschaulicht, ausgerichtet. Die Anordnung von zwei Hohlprofilen an den kurzen Seiten des Bauteils war erforderlich, um eine Auflagerfläche für das Hohlprofil auf der langen Seite zu erzeugen.

Nachfolgend wurden zwischen den Profilen und der äußeren Schalung in regelmäßigen Abständen Kanthölzer eingebracht. Die Hölzer dienten zum einen der Stabilisierung der Schalung beim Eingießen des Frischbetons und zum anderen der Begrenzung der Verformungen der Vorspannvorrichtung. Des Weiteren wurden die einzelnen Schrauben der Gewindestangen zur Übertragung der Vorspannkraft, wie in Abbildung 64 illustriert, mit jeweils 40 Nm angezogen.



Abbildung 61: Seitliche Ansicht des Vorspannsystems



Abbildung 62: Eckdetail des Vorspannsystems



Abbildung 63: Fertiggestellter Probekörper für die Betonage



Abbildung 64: Lastverteilung auf das Vorspannsystem

3.5.4 Betonage der Probekörper

Aufgrund der geringen Abmessungen der äußeren und inneren Betondeckschicht wurde im Vorfeld eine geeignete Vorrichtung für eine leichtere Handhabung der Betonage konzipiert (siehe Abbildung 65). Dazu wurde eine Holzapparatur mit den identischen Querschnittmaßen des Sandwichelements angefertigt. Im Innenraum der Vorrichtung wurde ein schräg auseinanderlaufendes Metallblech montiert, sodass der Beton beim Befüllen gleichmäßig in beide Tragschichten fließen konnte. Dies und weitere Details sind der Fotoreihe "Betonage des Probekörpers" (Abbildung 67) veranschaulicht.



Abbildung 65: Betonagevorrichtung

Trotz der Apparatur zur gleichmäßigen Befüllung der Betondeckschichten wurde die Dämmung gegen eine seitliche Verschiebung zusätzlich am oberen Rand des Baukörpers gesichert. Dazu wurden Abstandshalter mit einer Breite von 2 cm zugeschnitten und oberflächennah zwischen die Stränge der Flächenbewehrung in die innere und äußere Tragschicht platziert (siehe Abbildung 66). Somit war die Dämmplatte am oberen und unteren Ende fixiert und lies sich nicht mehr seitlich verschieben. Nachdem die Betonage abgeschlossen war, wurden die Abstandshalter entfernt und die Stellen nachträglich mit Beton verfüllt. Nach Beendigung der Betonagen wurden die Betonoberflächen mit einer Folie abgedeckt und nach einem Tag ausgeschalt.



Abbildung 66: Abstandshalter zur Verhinderung der seitlichen Verschiebung der Dämmung



Abbildung 67: Betonage des Probekörpers

In Abbildung 68 und Abbildung 69 sind exemplarisch die Auswirkungen einer fehlerhaften sowie zu schnell ansteifenden Betonage gegenüber einem Idealergebnis dargestellt. Der Versuchskörper mit einer zu schnell ansteifenden Betonkonsistenz zeigte vor allem an den Außenseiten Fehlstellen, da der Beton den oberen Bereich der Deckschicht isolierte und somit ein Nachfließen des übrigen Materials verhinderte. Aufgrund der unvollendeten Betonoberfläche wurde dieser Versuchskörper für eine weitere Betrachtung der Tragfähigkeit nicht in Betrachtung gezogen. Der Versuchskörper aus Abbildung 69 wurde hingegen aufgrund der angepassten Betonzusammensetzung ohne Schwierigkeiten betoniert, sodass eine optimale Sichtbetonoberfläche erzielt werden konnte.



Abbildung 68: Fehlerhafte Betonage



Abbildung 69: Ideale Betondeckschicht

3.5.5 Großmaßstäblicher Versuch

3.5.5.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die großmaßstäblichen Untersuchungen erfolgten im Labor des konstruktiven Ingenieurbaus der Technischen Universität Kaiserslautern. Für die Prüfung wurde ein Zwei-Säulen-Prüfrahmen mit einer Zylinderkraft von 250 kN eingesetzt. Die Zylinderkraft wurde mithilfe einer Lasteinleitungskonstruktion zentrisch auf den Probekörper aufgebracht. Diese Konstruktion bestand aus einer Zylinderverlängerung, einer Kraftmessdose, einer Kalotte zur Zentrierung der Last auf die Kraftmessdose sowie aus querverlaufenden Lastverteilungsplatten. Für eine ungünstigere Belastung des Tragwerksystems wurde ein 3-Punkt-Biegezugversuchsaufbau gewählt, sodass unter der Lasteinleitungsplatte, wie in Abbildung 70 illustriert, neben dem Querkraftsprung zusätzlich das maximale Biegemoment aufgenommen werden muss.

Die Lastverteilungsplatten wurden verwendet, um ein lokales Versagen der Deckschichten infolge einer punktförmigen Belastung im Einwirkungsbereich zu verhindern. Die Breite der Lasteinleitungsplatten wurde mit 5 cm gewählt und die Länge der Platte betrug mindestens die der Bauteiltiefe des Probekörpers. Für eine waagrechte Positionierung des Probekörpers während der Versuchsdurchführung wurde das Tragwerk auf zwei Stahlträger aufgestellt sowie jegliche Unebenheiten im Auflagerbereich mit einem Mörtelbett ausgeglichen.



Abbildung 70: Vergleich der Momenten- und Querkraftverläufe eines 4-Punkt- und 3-Punkt-Biegezugversuchsaufbaus an einem Einfeldträger

Die Belastung des Probekörpers der quasi-statischen Versuche erfolgte weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min. Zur Messung der maximalen vertikalen Durchbiegung des Deckenbereichs wurden induktive Wegaufnehmer in Feldmitte angesetzt. Zur Erfassung der horizontalen Verformung wurde ein weiterer Wegaufnehmer in 2/3 der Wandhöhe angebracht. Für weitere Untersuchungen der einzelnen Verschiebungen im Querschnitt der Sandwichstruktur wurde eine photogrammetrische Messung durchgeführt. Dazu wurde ein unregelmäßiges Muster von unterschiedlich großen Markierungspunkten im Messbereich der Decke bis zur Rahmenecke aufgebracht (siehe Abbildung 71). Diese Markierungen wurden während des Prüfzyklus aus einer fixierten Perspektive mit einer Bildfrequenz bzw. Bildrate von 1/3 Hz abfotografiert. Die Veränderung bzw. Verschiebung der einzelnen Markierungspunkte wurde anhand der photogrammetrischen Messung aufgenommen und mit den Messwerten der Kraftmessdose zu einem Last-Verformungs-Diagramm kombiniert.



- Prüfzylinderverlängerung
 Kraftmessdose
 Kalotte
- 4 Querträger zur Lastverteilung
- 5 induktive Wegaufnehmer6 photogrammetrischer Messbereich7 Decke der monolithischen Wohneinheit

Abbildung 71: Versuchsaufbau der großmaßstäblichen Untersuchungen

Bei der Versuchsdurchführung konnten die typischen Merkmale der zuvor untersuchten Sandwichelemente auch bei dem großmaßstäblichen Bauteilversuch beobachtet werden. Mit zunehmender Verformung entstanden in den Tragschichten dem Momentenverlauf angepasste Biegezugrisse. Diese bildeten sich, wie in Abbildung 72 und Abbildung 73 veranschaulicht, in einem regelmäßigen Abstand aus und verliefen über die komplette Querschnittsbreite. In der Dämmung konnten zunächst augenscheinlich keine Risse und Stauchungen beobachtet werden. Ein Verbundversagen der einzelnen Schichten konnte ebenfalls nicht konstatiert werden.



Abbildung 72: Biegezugrisse im Feldbereich der Decke



Abbildung 73: Biegezugrisse im Stützbereich der Decke

Eine Versagensform, die in den vorherigen Bauteilversuchen nicht zu beobachten war, stellte sich erst bei den großmaßstäblichen Probekörpern ein. Hierbei handelte es sich um das Aufklaffen der Verbindungsfugen zwischen den einzelnen XPS-Dämmelementen. Erste Rissanzeichen in der Mitte der Fuge konnten bei einer Durchbiegung von 23 mm in Feldmitte festgestellt werden. Wie in Abbildung 74 dargestellt, wanderte der Riss mit steigender Verformung zu den Betondeckschichten und bildete sich dort als parallellaufender Riss in den Schichtübergängen weiter aus. Eine Abnahme der aufgebrachten Last wurde dadurch nicht beobachtet. Nachdem sich der Riss über die vollständige Höhe der Kernschicht eingestellt hatte, wurde eine deutliche Rissbreitenöffnung erkennbar. Die maximal abgelesene Rissbreite betrug 10 mm (siehe Abbildung 75).



Abbildung 74: Aufklaffen der Verbindungsfugen zwischen den einzelnen XPS-Dämmelementen



Abbildung 75: Abgeschlossenes Rissbild der Fuge

Im weiteren Bauteilversuch entwickelten sich bei größeren Verformungen in Feldmitte in der oberen Tragschicht neben der Krafteinleitung flach verlaufende Biegeschubrisse, bis schließlich die obere Deckschicht des Sandwichelements versagte. Mit Auftreten des lokalen Querkraftversagens in Feldmitte war die Maximallast erreicht und damit die maßgebende Versagensart der Wohnraumhülle identifiziert. Im Anschluss nahmen die Verformungen stetig zu, wobei ein stufenweiser Lastabfall zu verzeichnen war. Der Versuchsvorgang wurde jeweils mit dem Biegezugversagen der Rahmenecke abgeschlossen. Hierbei entwickelte sich, wie in Abbildung 76 demonstriert, ein diagonalverlaufender Riss von der Außenkante der Rahmenecke durch die äußere Betondeckschicht bis weit in den XPS-Kern hinein. Ein Schubversagen der Betondeckschicht zur Styrodur-Dämmung des Sandwichelements sowie ein Biegedruckversagen der unteren Deckschicht konnte hingegen nicht diagnostiziert werden.



Abbildung 76: Exemplarischer Endzustand der großmaßstäblichen Bauteilversuche

3.5.5.2 Versuchsergebnisse

Das Last-Verformungs-Verhalten weist bis zu einer Lastaufnahme von ca. 45 kN bei gleichzeitiger Durchbiegung von ca. 3 cm ein lineares Tragverhalten auf. Danach nimmt das Lastaufnahmevermögen exponentiell ab, bis sich bei einer einleitenden Kraft von ca. 47 kN ein Plateau ausbildet. Der Beginn dieses Plateaus war verbunden mit dem Entstehen erster Schubrisse an der Lasteinleitung. Die sich danach einstellenden Verformungen ohne einen Abfall der Last verdeutlichen die großen Lastumlagerungsmöglichkeiten des Tragwerksystems. Erst bei einem Mittelwert von 8,1 cm zeigte sich ein Kraftabfall. Dieser Lastabfall korreliert mit dem lokalen Querkraftversagen der oberen Deckschicht.

Im Anschluss begann das Lastaufnahmevermögen stufenweise abzufallen. Nachdem die Verformung in Feldmitte im Durchschnitt über 11 cm betrug, konnte eine deutlichere Abnahme der Last festgestellt werden. Dieses Bauteilverhalten war mit dem Entstehen des querlaufenden Biegezugrisses in der Bauteilecke verbunden. Selbst nach dem Versagen der Rahmenecke konnte die Last noch gehalten werden, jedoch wurde mit Aufklaffen des Sandwichelements im Rahmeneck jeweils der Versuchsdurchgang beendet. Die erzielte Maximalkraft lag bei knapp 49 kN in Verbindung mit einer Verformung von ca. 7,3 cm. Diese Werte übertrafen die Ergebnisse aus den Kleinbauteilversuchen deutlich, was mit der günstigeren Momentenverteilung begründet werden kann.



Abbildung 77: Typisches Lastverformungsdiagramm des großmaßstäblichen Probekörpers

Bei der Auswertung der photogrammetrischen Messung wurden für eine detaillierte Untersuchung des Sandwichelements aus dem Markierungsbereich, wie in Abbildung 78 dokumentiert, unterschiedliche Punkte ausgewählt. Somit konnte eine genauere Aussage über das Verformungsverhalten des Tragwerksystems getroffen werden. Bei der Auswahl der Markierungen wurde ein regelmäßiger Abstand mit zwei bis drei Punkten über die gesamte Querschnittshöhe selektiert. Der obere sowie untere Messpunkt befand sich mit Ausnahme des ersten Punktes am Übergang der Schichtgrenzen und der mittlere Messpunkt in der Mitte der Kernschicht. Der erste Punkt wurde zum Vergleich der Wegaufnehmer in Feldmitte direkt unter der Lasteinleitung gesetzt.



Abbildung 78: Einzelne Punkte im Markierungsbereich

Für eine geeignete Darstellung des vertikalen Verschiebungsverhaltens der einzelnen Punkte sind diese als polynomische Trendfunktionen wiedergegeben. Die Werte der übereinanderliegenden Punkte im Querschnitt sind in Abbildung 79 für eine bessere Übersicht farblich angepasst.

Von besonderem Interesse sind die Verformungen vor dem Erreichen der Versagenslast, womit auch Aussagen über die Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gewonnen werden können. Vergleicht man die Ergebnisse der Punkte, die im Längsquerschnitt in der gleichen Lage liegen, sind die Kurven praktisch identisch. Erst nach dem Abfall der Last, deutet sich eine ungleichmäßigere Verformung an. Für die Auswertung der Durchbiegung wurden zu unterschiedlichen Laststufen die Mittelwerte der Verformungen in Tabelle 9 gebildet.



Abbildung 79: Last-Verformungs-Verhalten der Markierungspunkte

Kraft [kN]	Punkte 1-3 [mm]	Punkte 4-6 [mm]	Punkte 7-9 [mm]	Punkte 10-12 [mm]	Punkte 13-14 [mm]	Punkte 15-17 [mm]	Punkte 18-21 [mm]
12,1	5,0	4,4	3,2	2,0	1,0	0,2	0
24,2	12,0	10,2	7,4	4,7	2,5	0,5	0
36,3	20,6	17,6	12,8	8,2	4,4	0,7	0
48,4	74,8	66,4	48,0	28,7	13,1	1,5	0

Tabelle 9: Mittelwert der vertikalen Verformungen der Punkte bei unterschiedlichen Laststufen

Für eine anschaulichere Darstellung sind die Werte der einzelnen Punkte in Abbildung 80 dargestellt. Die Verformungen sind über das Längenverhältnis der Decke aufgezeichnet. Da für die photogrammetrische Messung nicht die komplette Bauteillänge untersucht werden konnte, wurde eine symmetrische Durchbiegung angenommen. Anhand der Auswertung kann die überproportionale Zunahme der Verformungen, die erst kurz vor Erreichen der Maximallast auftreten, festgestellt werden. Bspw. ergibt sich für eine einwirkende Last von 3/4 der Maximalkraft in Feldmitte eine Verformung von nur 20,6 mm.



Abbildung 80: Durchbiegung der Decke für unterschiedliche Laststufen

Die Ergebnisse der Messpunkte 1 bis 3 unterhalb der Lasteinleitung decken sich mit den aufgezeichneten Werten der Wegaufnehmer. Die gemessene Verformung mit den Wegaufnehmern bei der Maximallast betrug bspw. ca. 73 mm und der Mittelwert der Messpunkte 74,8 mm. Die Aufzeichnung der Messwerte von Punkt 1 wurde nach dem Versagen der oberen Deckschicht abgebrochen. Dieses lag daran, dass ein Riss in diesem Bereich entstand und die Messaufzeichnung störte.

3.5.5.3 Optische Ergebnisse

Ein nicht zu vernachlässigbarer Aspekt der Wohnraumhülle ist die ästhetische Darstellung der äußeren Tragschichten, die gleichzeitig auch die Sichtflächen des Baukörpers darstellen. Zu den wichtigsten Sichtkriterien gehören die Farbtongleichmäßigkeit, Textur, Fugen und die Rissbildung. Dazu wurde der Probekörper augenscheinlich auf diese Kriterien untersucht, bevor er auf seine Tragfähigkeit getestet wurde.

Obwohl der großmaßstäbliche Baukörper monolithisch hergestellt wurde, konnten keine erkennbaren Risse festgestellt werden. Damit können sowohl die durchgeführten Schwinduntersuchungen der verwendeten Betonzusammensetzungen als auch die Wirkung der Vorspannung bestätigt werden. Selbst an den Bauteilecken, an denen der Beton durch Schwinden von beiden Seiten zusammengezogen wird, wurden keine nennenswerten Risse erkannt.



Abbildung 81: Sichtfläche an einer Bauteilecke



Abbildung 82: Ansicht eines Probekörpers

Ein unschöner Nebeneffekt, der durch die herausgeführte Bewehrung entstand, sind die sichtbaren Fugenstellen an den Ecken der Schalung. In diesen Bereichen mussten die Carbonfaserbewehrungsmatten durch Schalelemente gezogen und im Anschluss an die Betonage abgetrennt werden. Demnach ließen sich diese Fugen nicht vermeiden. Außerdem wurden durch die Segmentierung der Schalung leichte Unebenheiten zwischen den einzelnen Abschnitten festgestellt. Hier gilt es für eine laufende Produktion optimierte Schalungsbedingungen zu entwickeln.

Die dunkelgraue Farbgebung des Betons resultierte aus der Betonzusammensetzung. Die Farbtongleichheit lässt sich im Allgemeinen als sehr gut beurteilen. Lediglich auffallend sind die

Gitterstrukturen der Textilbewehrung, die aufgrund der dünnen Betondeckung an der Oberfläche leicht sichtbar wurden. Mit der letzten Betonzusammensetzung wurde eine nahezu fehlerfreie Oberflächenstruktur geschaffen, die keinerlei Anzeichen von Entmischungen oder Lufteinschlüsse aufzeigt. Der Gesamteindruck der kompletten Sichtbetonflächen war sehr gut.

Wie ein solches monolithisch konzipiertes Wohnelement in der späteren Nutzung einmal aussehen könnte, ist in Abbildung 83 illustriert. Das Modell wurde dazu auf der Vorderseite mit einer Holzfassade und einer integrierten großflächigen Glasfront abgeschlossen. Das Ergebnis zeigt eine optisch ansprechende Gebäudehülle, die sich in der modernen Architektur etablieren könnte.



Abbildung 83: Darstellung einer monolithisch konzipierten Wohneinheit mit einer Holzfassade

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde eine neuartige Variante der modularen Bauweise aus Sandwichelementen mit dünnen Deckschichten aus Textilbeton in monolithischer Ausführung entwickelt. Die formulierten Ziele konnten dabei erfolgreich umgesetzt werden. Im Vorfeld der Untersuchungen wurde eine ausführliche Zusammenstellung der wichtigsten Grundlagen für das Forschungsvorhaben erarbeitet. Dies umfasste bspw. die Erstellung eines Raumkonzeptes und Gebäudeentwurfs, die Festlegung der Dimensionen des Baukörpers sowie die zu verwendenden Materialien.

Des Weiteren musste aufgrund der filigranen, monolithischen Bauweise eine Betonzusammensetzung entwickelt werden, die neben der selbstverdichtenden Eigenschaft noch zusätzlich geringe Schwindverkürzungen aufweist, über den gesamten Betonagezeitraum eine fließfähige Konsistenz besitzt, sich selbst entlüftet sowie nicht zur Entmischung neigt und sich zudem noch durch eine hochfeste Druckfestigkeit von 130 – 150 N/mm² kennzeichnet.

Ein signifikanter Bestandteil der experimentellen Untersuchungen lag in der Reduktion der Verformungen und somit in der Entwicklung einer geeigneten Konstruktion für die Vorspannung der textilen Flächenbewehrung. Die maximal aufbringbare Vorspannung wurde in einaxialen Zugversuchen im Vorfeld an die Bauteiluntersuchungen durchgeführt. Die Kernaussage dieser Versuchsreihe war, dass die maximal aufnehmbare Vorspannung nicht mit der Grenzzugspannung der Bewehrung, sondern mit dem Herausziehen der Bewehrung aus der Halterungskonstruktion korreliert. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde für die unterschiedlichen Probekörper ein auf die Bauteilgeometrie optimiertes Vorspannsystem entwickelt.

In den ersten Bauteilversuchen wurde das allgemeine Last-Verformungs-Verhalten der Betontragschichten unter einer Biegebeanspruchung untersucht. Der Fokus lag auf der Analyse der Wirksamkeit der Vorspannung und der eingebauten Textilbewehrung im Vergleich zu den unbewehrten Betonplatten. Durch den Einsatz der Carbonfasermatten ergab sich ein äußerst duktiles Tragverhalten. Zudem konnte der günstige Einfluss der aufgebrachten Vorspannung auf das Last-Verformungs-Verhalten bestätigt werden.

Im Anschluss erfolgten die Biegezugversuche an den Sandwichstreifen, um das diffizile Tragverhalten des Verbundbauteils sowie dessen Versagensformen zu ermitteln. Hierbei konnten vier Versagensmechanismen festgestellt werden. Maßgebend war stets das lokale Querkraftversagen in den Lasteinleitungsbereichen. Des Weiteren bestätigte die speziell angefertigte Dämmplattenmaserung einen guten Verbund zwischen den einzelnen Schichten, sodass eine gegenseitige Tragschichtenverschiebung erst nach dem maßgebenden Querkraftversagen auftrat. Der Schwerpunkt dieses Forschungsprojekts lag in der Entwicklung eines geeigneten Herstellverfahrens der monolithischen Wohneinheit und der anschließenden Untersuchung der Wohnraumhülle bezüglich des Last-Verformungs-Verhalten sowie der optischen Erscheinung.

Wie sich beim Aufbau des Schal- und Vorspannsystems zeigte, bedarf die Konzeption der Eckdetails eine sorgsame und detailgenaue Planung. Die erforderliche Segmentierung der einzelnen Bestandteile musste auf jedes darauffolgende Ausführungselement angepasst werden, damit die innenliegenden Carbonfasermatten ohne Probleme nach Außen geführt werden konnten. Neben den Eckdetails benötigten auch die Halterungskonstruktionen und das Vorspannsystem eine passgenaue Abstimmung der Abmessungen. Aus diesen Gründen erwies sich die Herstellung der Probekörper als äußerst aufwendig und zeitintensiv.

In umfangreichen Versuchen wurde schließlich das Traglastverhalten der Wohnraumhülle näher untersucht. Die Durchbiegungen, bis kurz vor Erreichen der Maximalkraft, waren dabei verhältnismäßig gering. Das Versagen der Wohnraumhülle ging mit einem lokalen Querkraftversagen an der Lasteinleitung einher. Infolge der Umlagerungsmöglichkeiten im Bauteil konnte kein schlagartiger Abfall der Last beobachtet werden. Besonders auffallend war während der Versuchsdurchführung das frühe Aufklaffen der Fuge zwischen dem Dämmplattenstoß.

Begleitend zu den Bauteilversuchen wurden die jeweiligen Frisch- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Betonagen untersucht. Die erzielten Festigkeiten und Konsistenzwerte konnten den Ansprüchen eines selbstverdichtenden Hochleistungsbetons gerecht werden. Die Adaptation des Betongemischs stellte sich als äußerst vorteilhaft für die Herstellung des Prototyps dar und konnte die Problematik des frühen Ansteifens während der ersten Versuchsreihen beseitigen. Zudem konnte eine äußerst schwindarme Betonzusammensetzung mit einer Verkürzung von bis zu 1,5 mm/m entwickelt werden.

Im letzten Schritt wurde eine optische Bewertung der Sichtbetonflächen durchgeführt. Diese erwiesen sich als gleichmäßig und sehr ansehnlich. Es konnten weder sichtbare Risse noch Entmischungserscheinungen an den Probekörpern beobachtet werden.

Mit diesem Forschungsvorhaben wurde das Spektrum der modularen Bauweise erweitert. Die zunächst kalkulierten Herstellungskosten für einen fertigen MonoBau-Körper belaufen sich auf ca. 33.000 € und können infolge einer Serienfertigung noch entscheidend verringert werden, sodass dieser Baukörper für Wohngebiete in urbanen Siedlungen eine interessante wie auch wirtschaftliche Alternative darstellen kann. Anhand der flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten durch angehängte Module sowie einer minimalistisch, effizienten Architektur lässt sich ein innovatives Design mit konstruktiven Tragwerksideen vereinen.

Literaturverzeichnis

- [1] Straßenverkehrsrecht. Sonderausgabe 53. München: Dt. Taschenbuch-Verl.; Beck, 2015 (dtv)
- [2] DIN EN 12350-8:2010-12 Prüfung von Frischbeton Teil 8: Selbstverdichtender Beton Setzfließversuch
- [3] DIN EN 12350-6:2011-03 Prüfung von Frischbeton Teil 6: Frischbetonrohdichte
- [4] DIN EN 12350-7:2009-08 Prüfung von Frischbeton Teil 7: Luftgehalt Druckverfahren
- [5] DIN EN 12390-3:2009-07. Prüfung von Festbeton Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
- [6] DIN EN 12390-5:2009-07 Prüfung von Festbeton Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern
- [7] DIN EN 12390-13:2014-06. Prüfung von Festbeton Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung
- [8] DIN EN 12390-6:2010-09 Prüfung von Festbeton Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern
- [9] SCHMIDT, M.: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008
- [10] DIN EN 12617-4:2002-08 Prüfverfahren Teil 4: Bestimmung des Schwindens und Quellens
- [11] DIN EN 196-1:2005-05 Prüfverfahren für Zement Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- [12] FONTANA, P.: *Poster: Frühes autogenes Schwinden von Hochleistungsbeton (HPC)*. URL http://www.bam.de/de/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_7/fg71/fg71_poster.htm
- [13] PIRSKAWETZ, S.; WEISE, F.; FONTANA, P.: Zwangsinduzierte Rissbildung bei erhärtendem Hochleistungsbeton. Berlin: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2011
- [14] DIN EN 206-1:2001-07 Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [15] 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
Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gebäudeentwurf	11
Abbildung 2: Struktureller Aufbau	11
Abbildung 3: Struktureller Aufbau (ohne Frontsystem)	12
Abbildung 4: Zwischenliegende Dämmung	12
Abbildung 5: Frontansicht	12
Abbildung 6: Draufsicht	13
Abbildung 7: Schnitt A-A	13
Abbildung 8: Schnitt B-B	13
Abbildung 9: Urbane Umsetzungsmöglichkeit I	14
Abbildung 10: Urbane Umsetzungsmöglichkeit II	15
Abbildung 11: Küstengebiet Umsetzungsmöglichkeit I	15
Abbildung 12: Quelldehnung der Probekörper	21
Abbildung 13: Schwinddehnung der Probekörper	21
Abbildung 14: Setzfließmaß der differierenden Hochleistungsbetone	23
Abbildung 15: Rissfläche der Probekörper	23
Abbildung 16: Darstellung des Styrodurs 3035 CS mit Stufenfalzen	26
Abbildung 17: v.l.n.r Stahl-Mikrobewehrung, Glasfaserbewehrung, Carbonfaserbewehrung	27
Abbildung 18: Verformungsaufnahmevermögen einer carbonbewehrten Betondeckschicht	27
Abbildung 19: Aufbau zur Prüfung der möglichen Vorspannung	28
Abbildung 20: Fotodokumentation der Versuchsreihe "Vorspannung mit Gummistreifen"	29
Abbildung 21: Profilierte Stahlbacken inkl. adaptierter Schraubengröße	29
Abbildung 22: Fotodokumentation der Versuchsreihe "Vorspannung ohne Gummistreifen"	30
Abbildung 23: Kraft-Verformungs-Diagramm	31
Abbildung 24: Schalung der Platten ohne Bewehrung	32
Abbildung 25: Schalung und Vorspannkonstruktion der Platten mit Bewehrung	32
Abbildung 26: Seitenansicht des Vorspannsystems	32
Abbildung 27: Betonplatten mit Bewehrung nach dem Ausschalen	33

Abbildung 28: Versuchsaufbau und Momentenverteilung des 4-Punkt-Biegezugversuchs	34
Abbildung 29: Rissbildung zwischen den Lasteinleitungspunkten	35
Abbildung 30: Rissbildung an der Vorderseite der Betonplatte	35
Abbildung 31: Maximale Durchbiegung einer carbonbewehrten Betonplatte	36
Abbildung 32: Maximale Durchbiegung einer unbewehrten Betonplatte	
Abbildung 33: Typischen Versagen der Betonplatten	36
Abbildung 34: Typisches Last-Verformungs-Diagramm der Betonplatten	
Abbildung 35: Draufsicht und Querschnitt der Sandwichelemente	38
Abbildung 36: Querschnitt und Draufsicht der eingebauten Dämmung und Carbonfaserbewehrung	39
Abbildung 37: Schalung und Vorspannkonstruktion der Sandwichelemente	40
Abbildung 38: Konstruktionsdetail an der Stirnseite	40
Abbildung 39: Seitenansicht des Vorspannsystems	40
Abbildung 40: Rissbildung in der unteren und oberen Tragschicht	41
Abbildung 41: Schnitt durch ein Sandwichelement (F-1-Zusammensetzung)	42
Abbildung 42: Schnitt durch ein Sandwichelement (F-2-Zusammensetzung)	42
Abbildung 43: Maximale Durchbiegung kurz vor Versagen	43
Abbildung 44: Versagen des Sandwichelements	43
Abbildung 45: Typisches Last-Verformungs-Diagramm der Sandwichelemente	45
Abbildung 46: Seitliche Ansicht des monolithisch hergestellten Baukörpers	47
Abbildung 47: Aufbau der inneren Schalung, Draufsicht und Querschnitt	48
Abbildung 48: Aufbau der äußeren Schalung, Draufsicht und Querschnitt	48
Abbildung 49: Eckdetail nach Aufbau der äußeren Schalung	49
Abbildung 50: Problemfeld des Baukörpers (Eckpunkt)	50
Abbildung 51: Auftragen des Flüssigklebers	50
Abbildung 52: Zusammenpressen der geklebten Dämmung	50
Abbildung 53: Einbau der Kernschicht und Carbonfaserbewehrung, Draufsicht und Quersch	nitt
	51
Abbildung 54: Vorderansicht der eingebauten Dämmung	51

Abbildung 55: Seitenansicht der eingebauten Dämmung	51
Abbildung 56: Detailansicht eines Eckpunktes nach Verlegen der Bewehrung	52
Abbildung 57: Vorderansicht des Probekörpers nach Einbau der Carbonfaserbewehrung	52
Abbildung 58: Vorderansicht der äußeren Schalung	52
Abbildung 59: Seitenansicht der äußeren Schalung	52
Abbildung 60: Aufbau des Vorspannsystems, Draufsicht und Querschnitt	53
Abbildung 61: Seitliche Ansicht des Vorspannsystems	54
Abbildung 62: Eckdetail des Vorspannsystems	54
Abbildung 63: Fertiggestellter Probekörper für die Betonage	54
Abbildung 64: Lastverteilung auf das Vorspannsystem	55
Abbildung 65: Betonagevorrichtung	55
Abbildung 66: Abstandshalter zur Verhinderung der seitlichen Verschiebung der Dämmung	56
Abbildung 67: Betonage des Probekörpers	57
Abbildung 68: Fehlerhafte Betonage	58
Abbildung 69: Ideale Betondeckschicht	58
Abbildung 70: Vergleich der Momenten- und Querkraftverläufe eines 4-Punkt- und 3-Punkt-	
Biegezugversuchsaufbaus an einem Einfeldträger	59
Abbildung 71: Versuchsaufbau der großmaßstäblichen Untersuchungen	60
Abbildung 72: Biegezugrisse im Feldbereich der Decke	60
Abbildung 73: Biegezugrisse im Stützbereich der Decke	60
Abbildung 74: Aufklaffen der Verbindungsfugen zwischen den einzelnen XPS-Dämmelement	en
	61
Abbildung 75: Abgeschlossenes Rissbild der Fuge	61
Abbildung 76: Exemplarischer Endzustand der großmaßstäblichen Bauteilversuche	62
Abbildung 77: Typisches Lastverformungsdiagramm des großmaßstäblichen Probekörpers	63
Abbildung 78: Einzelne Punkte im Markierungsbereich	63
Abbildung 79: Last-Verformungs-Verhalten der Markierungspunkte	64
Abbildung 80: Durchbiegung der Decke für unterschiedliche Laststufen	65
Abbildung 81: Sichtfläche an einer Bauteilecke	66

Abbildung 82: Ansicht eines Probekörpers	
Abbildung 83: Darstellung einer monolithisch konzipierten Wohneinheit mit einer Holz	fassade
	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gliederung der Prüfungen	16
Tabelle 2: Zusammensetzung der verwendeten HPC-Zusammensetzungen	19
Tabelle 3: Frischbetoneigenschaften	22
Tabelle 4: Festbetoneigenschaften	24
Tabelle 5: Setzfließmaß und Zeit t $_{500}$ über einen Verarbeitungszeitraum von 90 min	24
Tabelle 6: Eigenschaften der XPS-Sorten	26
Tabelle 7: Technische Daten der Carbonbewehrung	28
Tabelle 8: Versagensarten der Sandwichelemente	13
Tabelle 9: Mittelwert der vertikalen Verformungen der Punkte bei unterschiedlichen Laststufer	۱
	55