

F 2904

Jürgen Schnell, Matthias Pahn, Andreas Schmitt

Hochwärmedämmende Sandwichaußenwände mit Verbindungsmitteln aus glasfaservestärktem Kunststoff

> Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2904

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden 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

2014

ISBN 978-3-8167-9253-6

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



BAUINGENIEURWESEN Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell Jun.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

Paul-Ehrlich-Straße 67663 Kaiserslautern Gebäude 14, Zimmer 515 Telefon (0631) 2 05 - 21 57 Telefax (0631) 2 05 - 35 55 e-mail: juergen.schnell@bauing.uni-kl.de

Zukunft **BAU**

FORSCHUNGSINITIATIVE

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

Hochwärmedämmende Sandwichaußenwände mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff (SF - 10.08.18.7-11.9/ II 3-F20-10-1-077)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



- Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell Jun.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn
- Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Andreas Schmitt
- Datum: 31. Januar 2014

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell Jun.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn Dipl.-Ing. Andreas Schmitt

Inhaltsverzeichnis

1	Ei	Einleitung				
2	2 Ausgangssituation und Zielsetzung des Forschungsprojekts					
	2.1. Frischbetondruck in Sandwichwänden					
	2.2.	Va	prversuche an der TU Kaiserslautern (Pahn, 2011)	6		
	2.3.	Be	erechnung des horizontalen Frischbetondrucks nach DIN 18218	8		
3	Ei	ignung	sanalyse der Messmethode	11		
	3.1	Appli	ikation der Dehnmessstreifen auf die Verbindungsmittel	11		
	3.2	Zugv	ersuch am GFK-Verbindungsmittel	11		
	3.3	Schu	tz der Dehnmessstreifen	13		
4	E	xperim	entelle Untersuchungen	14		
	4.1	Vorve	ersuch zur visuellen Darstellung eines Verdichtungsvorgangs	14		
	4.2	Unte	rsuchung der Wasseraufnahmefähigkeit von Wärmedämmung	15		
	4.3	Groß	versuchsreihe	18		
	4	.3.1	Versuchsprogramm und Messtechnik	18		
	4	.3.2	Versuchsaufbau und Durchführung	20		
	4	.3.3	Versuchsergebnisse und Auswertung	21		
		4.3.3	.1 Kraftverlauf im höchstbelasteten Verbindungsmittel (Versuche GV01 bis GV06)	21		
		4.3.3	.2 Kraftverläufe in allen vier Verbindungsmitteln (Versuche GV01 bis GV06)	22		
		4.3.3	.3 Vergleich von Versuch GV01 und Versuch GV07	23		
		4.3.3	.4 Bewertung des Referenzversuchs GV08 mit beidseitig glatter Schalung	24		
		4.3.3	.5 Vergleich mit höheren Versuchskörpern (Pahn, 2011)	26		
		4.3.3	.6 Vertikale Last am Fußpunkt der Versuchskörper	28		
	4	.3.4	Zusammenfassung	29		
	4.4	Klein	versuchsreihe	30		
	4	.4.1	Konzeption und Herstellung des Versuchsstandes	30		
	4	.4.2	Versuchsprogramm	33		
	4	.4.3	Messtechnik	35		
	4	.4.4	Versuchsdurchführung	36		
	4	.4.5	Versuchsergebnisse und Auswertung	38		
		4.4.5	.1 Druckkraftverläufe im untersten Messpunkt des Versuchsstands	38		
	_	4.4.5	.2 Verteilung des Frischbetondrucks über die Höhe des Versuchsstandes	45		
	4	.4.6	Zusammenfassung	45		
	4.5	Versı	ichsreihe unter praxisnahen Bedingungen	47		
	4	.5.1	Versuchsprogramm	47		
	4	.5.2	Messtechnik	48		
	4	.5.3	Versuchsaufbau	50		
	4	.5.4	Versuchsdurchführung	52		
	4	.5.5	Versuchsergebnisse und Auswertung	54		
		4.5.5	.1 Krattverlaufe in den Verbindungsmitteln	54		
		4.5.5	.2 Kraftverlauf über die Höhe während den Verdichtungsvorgängen	57		

Ho	ochwä	rmedämmende Sandwichaußenwände mit Verbindungsmitteln mit glasfaserverstärktem Kunststoff				
5	F	rischbetondruck auf lotrechte Schalungen (DIN 18218)	60			
	5.1	Theoretische Grundlagen zur DIN 18218	60			
	5.2	Überlegungen zu Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung	62			
	5.3	Effektiver Seitendruckbeiwert λ_o	62			
6	N	achrechnung der Versuchsergebnisse	65			
	6.1	Seitendruckbeiwerte λ_0 für Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung	65			
	6.2	Reduktion des Seitendruckbeiwertes auf $\lambda_{\it 0,eff}$ infolge der Wasseraufnahmefähigkeit von EPS	66			
	6.3	Dynamische Tiefenwirkung der Rüttelflasche	67			
	6.4	Modifizierte Modellvorstellung für Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung	67			
	6.5	Nachrechnung der Versuchsreihe unter praxisnahen Bedingungen	68			
7	z	usammenfassung	72			
8	E	mpfehlungen für die Praxis und Ausblick	74			
Lit	teratı	urverzeichnis	76			
Aı	Anhang A – Diagramme zur Großversuchsreihe 77					
Aı	nhang B – Diagramme zur Kleinversuchsreihe 85					
Aı	Anhang C – Diagramme zu den Versuchen unter praxisnahen Bedingungen 94					

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt:

Seite 3 von 96

1 Einleitung

Außenwände werden zunehmend als Betonfertigteile mit innen liegender Wärmedämmung hergestellt. Grund hierfür ist eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Ortbetonbauweise. Zwischen dem reinen Fertigteil und dem Ortbeton steht die Halbfertigteilbauweise. Hier werden vorgefertigte Wandschalen auf der Baustelle ausbetoniert. Dies erspart den zeit- und kostenintensiven Schalungsvorgang und verringert das Transportgewicht.

Die Wandschalen sind mit Verbindungsmitteln gekoppelt, die den beim Ausbetonieren auftretenden Schalungsdruck mit ausreichender Sicherheit aufnehmen müssen. Der Schalungsdruck ist dabei nach DIN 18218 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" anzunehmen. Die Beeinflussung des Schalungsdruckes durch eine innen liegende Wärmedämmung bleibt bisher allerdings unberücksichtigt. Je nach Dicke der Ortbetonschicht und Art der Wärmedämmung kann damit der Schalungsdruck erheblich überschätzt werden, was zu einem unwirtschaftlichen Bemessungsergebnis führen kann.

Der folgende Bericht beschreibt die Arbeiten und Ergebnisse zum Forschungsprojekt "Hochwärmedämmende Sandwichaußenwände mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff" für den Zeitraum von Januar 2012 bis Januar 2014.

2 Ausgangssituation und Zielsetzung des Forschungsprojekts

2.1. Frischbetondruck in Sandwichwänden

In mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit nachträglicher Ortbetonergänzung werden zur Kopplung von Betonaußen- und Betoninnenschale alternativ zu metallischen Verankerungen stabförmige Verbindungsmittel aus glasfaserverstärktem Kunststoff eingesetzt. Aufgrund ihrer geringeren Wärmeleitfähigkeit gegenüber Verbindungsmitteln aus Metall entsteht eine energieeffizientere Wandkonstruktion, da Energieverluste in Form von Wärmetransmission reduziert werden.

Die maßgebende Einwirkung zur Bemessung von mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln im Bauzustand ist die Beanspruchung der Verbindungsmittel infolge des Frischbetondrucks der Ortbetonergänzung. Um die Anzahl der erforderlichen Verbindungsmittel wirtschaftlich festzulegen, muss demzufolge eine genaue Kenntnis über den Beanspruchungszustand unter Einwirkung des Frischbetondrucks vorhanden sein.

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf den Frischbetondruck in Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung

Einflussfaktoren auf den Frischbetondruck in Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung						
Geometrische	Werkstoffspezifische	Baubetriebliche				
Ortbetondicke	Art des Dämmstoffs	Betoniergeschwindigkeit				
Oberflächenbeschaffenheit der innenliegenden Dämmung	Steifigkeit des Dämmstoffs	Art der Verdichtung				
Oberflächenbeschaffenheit der FT-Tragschale	Rohdichte des Frischbetons	Tiefe der Verdichtung				
Anordnung der Verbindungsmittel zwischen Vorsatz- und Tragschale	Frischbetonkonsistenz	Verdichtungsdauer				
Höhe der Sandwichwand	Zusammensetzung des Betons	Fallhöhe des Frischbetons beim Betonieren				
Dicke des Dämmstoffs	Steifigkeit der Verbindungsmittel zwischen Vorsatz- und Tragschale					
Dicke von FT-Vorsatz- und Tragschale	Steifigkeit der FT-Vorsatz- und Tragschale					
Bewehrungsgrad der ortbetonergänzten Schicht	Frischbetontemperatur					
	Erstarrungszeit des Betons					

Die Höhe des maximalen Frischbetondrucks auf eine Schalung ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Dazu gehören beispielsweise die Rauigkeit der angrenzenden Schalhaut, die Dicke der Ortbetonschicht, die Rohdichte des Betons, die Betonrezeptur, die Betoniergeschwindigkeit, die Bewehrung in der Ortbetonschicht und die Art der Verdichtung (Proske, 2007). Bei mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit nachträglicher Ortbetonergänzung beeinflussen beispielsweise zusätzlich ein innenliegender Dämmstoff, die Steifigkeit der Verbindungsmittel und das Verbindungsmittelraster den Frischbetondruck. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht aller Einflussfaktoren. Für Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung kann zwischen geometrischen, werkstoffspezifischen und baubetrieblichen Einflussfaktoren differenziert werden. Es ist zu beachten, dass nicht alle aufgeführten Einflussparameter einen gleich großen Einfluss auf den horizontalen Frischbetondruck haben. Die einzelnen Einflussparameter können erstrangige, zweitrangige oder drittrangige Auswirkungen haben (Specht, 1981).

2.2. Vorversuche an der TU Kaiserslautern (Pahn, 2011)

Der Grund für die Initiierung des Forschungsvorhabens sind Versuche, die an der TU Kaiserslautern durchgeführt wurden. Tabelle 2 zeigt das Versuchsprogramm.

Tabelle	2:	Versuchsprogramm	zur	Untersuchung	des	Einflusses	der	Ortbetonverfüllung	einer
Sandwichwand (Pahn, 2011)									

Versuch	Gr.	Verbindungs- mittel	Wärme- dämmung	Dämmstoff- dicke	Dicke Ortbeton	Gesamt- dicke
Nr.	Nr.			[mm]	[mm]	[mm]
Wand 1	_	к	EPS	140	100	360
Wand 2		к	XPS	60	80	260
Wand 3	Б	К	EPS	140	80	340
Wand 4	Б	К	XPS	140	80	340
Wand 5	С	R	EPS	60	130	310
¹⁾ K - Kreisquerschnitt, d=12 mm ; E = 60.000 N/mm ² R - Rechteckguerschnitt, h/b = 9.8 x 5.6 mm; E = 40.000 N/mm ²						

Alle Wände haben eine Höhe von 400 cm und eine Breite von 80 cm. Das Raster der Verbindungsmittel beträgt 40x40 cm bei einem Randabstand von 20 cm. Es werden Verbindungsmittel mit kreisförmigem und rechteckförmigem Querschnitt eingesetzt. Im Rahmen der Versuche werden der Dämmstofftyp (weiches EPS und steifes XPS), die Dämmstoffdicke und die Dicke der Ortbetonergänzung variiert.

Die Versuche können in drei Gruppen unterteilt werden. Gruppe A ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen einer sehr dehnsteifen und dehnweichen Dämmstoffschicht (Grenzwertbetrachtung für die Praxis). In Gruppe B befinden sich zwei Versuchskörper mit gleicher Geometrie, nur der Dämmstofftyp wird zwischen einem weichen EPS und einem steifen XPS variiert. Gruppe 3 beinhaltet als einzige einen Versuch mit Verbindungsmitteln mit rechteckförmigem Querschnitt.

Während der Versuchsdurchführung wird der Beton in Chargen zu gleichmäßigen zeitlichen Abständen eingebacht und anschließend verdichtet. Der Frischbetondruck wird mithilfe von auf den Verbindungsmitteln applizierten Dehnmessstreifen (siehe Kapitel 3.1) gemessen (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Geometrie der Versuchswände und Messtechnik



Abbildung 2: Maximale Zugkräfte in den Verbindungsmitteln während der Ortbetonverfüllung

Abbildung 2 zeigt für jeden Versuch die maximal auftretenden Kräfte jedes einzelnen Verbindungsmittels im Versuchskörper. Für jede Wand sind auch die Mittelwerte der Verbindungsmittelkräfte gegeben. Neben den Versuchsergebnissen und deren Mittelwerte ist jeweils auch die nach DIN 18218 ermittelte Maximalkraft dargestellt. Bei Betrachtung der

Gruppen A und B ist zu erkennen, dass beim Einsatz von XPS immer im Schnitt höhere Kräfte in den Verbindungsmitteln entstehen als bei EPS. Im Durchschnitt betragen die maximalen Kräfte in den Verbindungsmittel beim Einsatz von EPS nur rund 60 % als beim Einsatz von XPS. Außerdem ist festzuhalten, dass die gemessenen Kräfte bei allen Versuchen weit unter den berechneten Kräften nach DIN 18218 liegen.

Als Ergebnis der Tastversuche kann eine deutliche Abhängigkeit des maximalen Frischbetondrucks von einem innenliegenden Dämmstoff oder unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten festgestellt werden. Zum Finden einer wissenschaftlichen Erklärung und des mechanischen Hintergrundes dieses Effektes wurde dieses Forschungsvorhaben initiiert.

2.3. Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks nach DIN 18218

Aktuell steht dem Tragwerksplaner zur Ermittlung des horizontalen Frischbetondrucks und zur Bemessung der Verbindungsmittel in Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung die DIN 18218 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" zur Verfügung. Diese ist jedoch für die Bemessung von glatter Schalung vorgesehen und berücksichtigt nur einige der oben genannten Einflussfaktoren.

In die Berechnung des Frischbetondrucks nach DIN 18218 gehen folgende Einflussfaktoren ein:

- das Erstarrungsende des Betons
- die Frischbetonrohdichte
- die Konsistenzklasse des Betons
- die Frischbeton- und Außentemperatur
- die Eintauchtiefe des Rüttlers

Der Frischbetondruck ist als charakteristischer Wert _{hk} zu berechnen und für die Bemessung von Schalung und Rüstung mit einem Sicherheitsbeiwert zu multiplizieren:

hd
$$\gamma_F$$
 hk (1)

mit

- hd Bemessungswert des horizontalen Frischbetondrucks
- hk Charakteristischer Wert des horizontalen Frischbetondrucks
- γ_F Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung

 γ_F wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für ungünstige Einwirkungen mit γ_F = 1,5 und bei günstigen Einwirkungen mit γ_F = 1,0 angesetzt.

Die Berechnung der charakteristischen Werte des maximalen Frischbetondrucks _{hk,max} nach DIN 18218 unterliegt folgenden Randbedingungen:

- die Frischbetonrohwichte γ_c beträgt 25kN/m³
- das tatsächliche Erstarrungsende des eingebauten Frischbetons überschreitet t_E nicht
- der Frischbeton der Konsistenzklassen F1 bis F6 wird mit Innenrüttlern verdichtet
- die Schalung ist dicht

- die mittlere Steiggeschwindigkeit v beträgt bei der Verwendung von Betonen der Konsistenzklassen F1 bis F4 höchstens 7,0m/h
- der Beton wird gegen die Steigrichtung (von oben) eingebracht

Innerhalb dieser Randbedingungen wird der maximale horizontale Frischbetondruck gemäß den Gleichungen der Tabelle 3 berechnet.

Tabelle 3: Charakteristische Werte des maximalen horizontalen Frischbetondrucks σ beiBetoneinbau gegen die Steigrichtung (DIN 18218, 2010)6

Konsistenzklasse	_{hk,max} [kN/m²]
F1	(5 · +21) · K1 ≥ 25
F2	(10 · + 19) · K1 ≥ 25
F3	(14 · + 18) · K1 ≥ 25
F4	(17 · + 17) · K1 ≥ 25
F5	25 + 30 · · K1 ≥ 30
F6	25 + 38 · · K1 ≥ 30
SVB	25 + 33 · · K1 ≥ 30

Die Faktoren K1 können Tabelle 4 entnommen werden und berücksichtigen das Erstarrungsverhalten des Betons. v beschreibt die Betoniergeschwindigkeit.

Kanaiatanzklassa	Faktoren K1					
KUIISISIEIIZKIdSSE	t = 5h	t = 10h	t = 20h	Allgemein ^b		
F1 ^a	1,0	1,15	1,45	1 + 0,03 · (t -5)		
F2 ^a	1,0	1,25	1,80	1 + 0,053 · (t -5)		
F3 ^a	1,0	1,40	2,15	1 + 0,077 · (t -5)		
F4 ^a	1,0	1,70	3,10	1 + 0,14 · (t -5)		
F5, F6, SVB	1,0	2,00	4,00	t /5		
^a Gilt für Betonierabschnitte mit einer Höhe H bis 10m.						
^b Gilt für 5h \leq t \leq 20h; t in h						

Tabelle 4: Faktoren K1 zur Berücksichtigung des Erstarrungsverhaltens (DIN 18218, 2010)

Die Erstarrungszeit t ist die Zeit, welche von der ersten Wasserzugabe bis zu dem Zeitpunkt der Erstarrung des Frischbetons vergeht. Sie kann mit dem Vicat-Penetrationsverfahren nach DIN EN 480-2 oder dem Knetbeuteltest nach DIN 18218 (Anhang A) ermittelt werden. Die Erstarrungszeit ist von der Zusammensetzung (w/z-Wert, Zusatzmittel, etc.) des Betons und den Temperatur-bedingungen (Frischbeton- und Umgebungstemperatur) abhängig. Die Faktoren K1 dürfen durch lineare Interpolation der Erstarrungszeit t_E ermittelt werden. Nach DIN 18218 sind auch Frischbeton- und Außentemperatur, Frischbetondrucks zu berücksichtigen. Die Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe wird gemäß Abbildung 3 angenommen. Bei Beginn der Betonage wirkt der hydrostatischer Druck auf die Schalung, solange bis die hydrostatische Druckhöhe h_s erreicht wird. Diese kennzeichnet die Betonierhöhe, bei der der maximale Frischbetondrucks $h_{k,max}$ erreicht wird.

$$h_S = \frac{-hk ma}{\gamma_C}$$
(2)

Ab dieser Höhe wird der Druck konstant angenommen, bis die Höhe h_E erreicht wird. h_E stellt die Betonierhöhe bei Erreichen des Erstarrungsendes des Betons t_E dar. Nach Erreichen des Erstarrungsendes wird davon ausgegangen, dass der Frischbetondruck den Wert Null annimmt.



Abbildung 3: Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe (DIN 18218, 2010)

Prinzipiell gilt, dass bei gleicher Betoniergeschwindigkeit sehr fließfähige Betone höhere Frischbetondrücke erzeugen als sehr steife Betone. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn man theoretisch sehr hoch betoniert, da der maximale Frischbetondruck erst ab einer Betonierhöhe größer oder gleich der hydrostatischen Druckhöhe h_s erreicht wird. Ist demnach das zu betonierende Bauteil niedriger als die hydrostatische Druckhöhe h_s eines sehr steifen Betons (F1), so macht es nach DIN 18218 keinen Unterschied, ob ein Beton der Konsistenzklasse F1 oder F6 verwendet wird, da h_s ohnehin nie erreicht wird. Der maximale Frischbetondruck ist in diesem Fall immer gleich groß. Grund hierfür ist der Verflüssigungsvorgang des Frischbetons während des Verdichtens, der bei jeder Konsistenz, auf der sicheren Seite liegend, als gleich groß angenommen wird. Für jede Konsistenzklasse wirkt hydrostatischer Druck mit Einbezug der Frischbetonrohdichte des Betons.

Der maximale. horizontale Frischbetondruck wird kleiner. wenn die hk,max Betoniergeschwindigkeit v, das Erstarrungsende t_E, die Konsistenzklasse kleiner oder die Frischbetontemperatur höher wird. Analog wird größer, die wenn hk.max Betoniergeschwindigkeit v, das Erstarrungsende t_{F} , die Konsistenzklasse größer oder die Frischbetontemperatur geringer wird. Nach Gleichung (2) variiert die hydrostatische Druckhöhe h_s je nach Höhe des maximalen, horizontalen Frischbetondrucks. Dies veranlasst den Rückschluss, dass die Tiefe der Verflüssigung des Betons von den Einflussfaktoren der DIN 18218 abhängen, was jedoch nicht der Fall ist. Eine genaue Erklärung dieses Sachverhaltes wird in Kapitel 5 gegeben.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Grundlagen für eine wirtschaftliche und praxisgerechte Dimensionierung der erforderlichen Anzahl an Verbindungsmitteln für Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung zu legen und ein besseres Verständnis für den Frischbetondruck zu bekommen.

3 Eignungsanalyse der Messmethode

Ziel des Forschungsvorhabens ist die wirtschaftliche Dimensionierung des Verbindungsmittelrasters.

Um den Frischbetondruck in Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung praktisch zu untersuchen, muss eine exakte Messmethode angewendet werden. Sinnvollerweise sollte die auftretende Spannung direkt im Verbindungsmittel gemessen werden. Dehnmessstreifen (DMS) bieten die Möglichkeit die Dehnung direkt im Material zu messen. Über das Elastizitätsmodul und die Querschnittsfläche kann die Spannung errechnet werden. Die Eignung zur Messung des Drucks auf diese Weise wird in diesem Kapitel untersucht.

3.1 Applikation der Dehnmessstreifen auf die Verbindungsmittel

Die in den Versuchen verwendeten GFK-Verbindungsmittel besitzen ähnlich wie Betonstahl eine gerippte Oberfläche. Auf einer solch unebenen Oberfläche ist es nicht möglich die Dehnungen im Stab zu messen. Deshalb werden die Stäbe über eine bestimmt Länge abgedreht, damit eine glatte Oberfläche entsteht. Hierauf werden dann die DMS, exakt in Stabrichtung ausgerichtet, appliziert. Durch eine angebrachte Zugentlastung wird verhindert, dass das an dem DMS angelötete Kabel abreißt. In Abbildung 4 ist ein unbehandelter (links), ein abgedrehter (mitte) und ein mit einem DMS beklebtes GFK-Verbindungsmittel dargestellt.



Abbildung 4: Applikation der DMS auf einem GFK-Verbindungsmittel

3.2 Zugversuch am GFK-Verbindungsmittel

Zur Überprüfung, ob eine gemäß Kapitel 3.1 applizierte DMS auch sinnvolle Ergebnisse liefert, werden Zugversuche durchgeführt (siehe Abbildung 5). Neben den am Stab angebrachten DMS werden auch ein Extensometer und zwei Wegaufnehmer angebracht. Diese sollen einen Vergleich zu den gemessenen Dehnungen im DMS liefern.

Abbildung 6 zeigt das Dehnungs-Kraft-Diagramm eines durchgeführten Zugversuchs. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Dehnungen durch DMS und Extensometer fast identisch sind. Die errechneten Dehnungen, resultierend aus den Wegaufnehmern, weichen von DMS und Extensometer ab. Bei gleicher Last treten hier höhere Dehnungen auf. Grund dafür ist die Einspannung des Stabes in der Prüfmaschine. Da die Enden des Stabes in Gewindehülsen eingeklebt sind, wird die daraus resultierende Dehnung mitgemessen.



Abbildung 5: Zugversuch am Verbindungsmittel (links) und applizierte DMS (rechts)



Abbildung 6: Kraft-Dehnungs-Diagramm eines Zugversuchs am Verbindungsmittel

Eine Messung des Frischbetondrucks ist demnach mithilfe von applizierten DMS sehr gut möglich und wird für die Durchführung von Versuchen als geeignet erachtet.

3.3 Schutz der Dehnmessstreifen

Bei der Messung des Frischbetondrucks ist es wichtig äußere Störeinflüsse zu vermeiden. Beim Verfüllen einer Sandwichwand mit nachträglicher Ortbetonergänzung wirken auf ein DMS von außen Feuchte und Druck durch Herabfallen des Frischbetons ein. Mithilfe einer geeigneten Schutzvorrichtung des DMS können diese Einflüsse gering gehalten werden. In einem einfachen Versuch wurde der Feuchteeinfluss auf die Messergebnisse eines DMS untersucht (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Feuchteeinfluss auf die Messergebnisse eines DMS

Für den Versuch wurden auf drei GFK-Stäbe DMS aufgebracht. Der erste Stab wurde mit einer Silikonabdichtung (siehe Abbildung 7, rechts) und der zweite mit einer Kautschuk-Schutzfolie (siehe Abbildung 7, mitte) versehen. Beim dritten Stab wurde keine Abdichtung vorgesehen (siehe Abbildung 7, links). Während der Messung der Dehnungen der DMS wurden die Stäbe in Wasser gelegt. Der ungeschützte DMS und der DMS mit Kautschukabdichtung zeigen sehr schnell eine Dehnungsänderung beim in Kontakt treten mit Wasser. Grund ist eine Widerstandsänderung der DMS und damit eine Verfälschung der Dehnungsmessung. Bei der Silikonabdichtung ist kein Einfluss zu beobachten. Diese Abdichtungsmethode wird in den weiteren Versuchen eingesetzt.

4 Experimentelle Untersuchungen

Es gibt zahlreiche Parameter, die den horizontalen Frischbetondruck in Sandwichelementen mit nachträglicher Ortbetonergänzung beeinflussen können (siehe Tabelle 1). Um alle Einflussgrößen zu untersuchen, wären sehr umfangreiche Versuchsreihen notwendig, was den Rahmen dieses Forschungsprojekts sprengen würde. Zudem haben einige Einflussfaktoren nur einen sehr geringen Einfluss auf den horizontalen Frischbetondruck.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden systematisch mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Kapitel 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4 zeigen Versuchsreihen, bei denen gezielt die Erstarrung des Betons als Einflussfaktor eliminiert wird. Zudem findet hier keine schichtenweise Verdichtung in den Versuchskörpern statt. Da es sich immer um relativ niedrige Versuchskörper handelt, findet immer eine Verdichtung bis zum Fußpunkt statt. Diese Versuchsreihen haben den Nutzen ein Verständnis von der Entstehung des Frischbetondrucks in Sandwichwänden zu bekommen. Kapitel 4.5 beschreibt schlussendlich die Untersuchungen an Wänden unter praxisnahen Bedingungen unter Berücksichtigung der Erstarrung des Betons und einer normgerechten Verdichtung.

- Kapitel 4.1: Vorversuch zur visuellen Darstellung eines Verdichtungsvorgangs
- Kapitel 4.2: Untersuchung der Wasseraufnahmefähigkeit von Wärmedämmung
- Kapitel 4.3 Großversuchsreihe mit Bauteilhöhen von 160cm ohne Berücksichtigung der Erstarrung des Betons und Verdichtung bis zum Fußpunkt
- Kapitel 4.4: Kleinversuchsreihe ohne Berücksichtigung der Erstarrung
- Kapitel 4.5: Versuchsreihe unter praxisnahen Bedingungen mit Bauteilhöhen von 400 cm unter Berücksichtigung der Erstarrung des Betons und praxisnaher Verdichtungsmethode

4.1 Vorversuch zur visuellen Darstellung eines Verdichtungsvorgangs



Abbildung 8: Kleinversuchskörper (links) mit definierten Oberflächenrauigkeiten (rechts)

Im Rahmen eines Kleinversuchs wird der Einfluss von unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten in einem Sandwichelement mit nachträglicher Ortbetonergänzung visuell veranschaulicht werden. Hierzu wird ein Modell mit einer glatten Wärmedämmung und einer rauen Betonoberfläche hergestellt und seitlich mit einer Plexiglasscheibe verschlossen (siehe Abbildung 8).

Um das Verhalten des Frischbetons beim Verdichtungsvorgang visuell sichtbar zu machen, werden zur Durchführung des Versuchs ein grauer und ein rot-pigmentierter Beton verwendet. Die Betone werden in den Versuchskörper eingefüllt und anschließend verdichtet. Nach Erhärtung des Betons wird der Versuchskörper aufgeschnitten (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Kleinversuch vor dem Verdichten (links), nach dem Verdichten (mitte) und nach Erhärten des Betons und Aufschneiden des Versuchskörpers (rechts)

Das Ergebnis des Kleinversuchs deutet darauf hin, dass während des Verdichtungsvorgangs der Beton an der glatten XPS-Dämmung mehr abrutscht, als an der rauen Oberfläche. Ein Aufsaugen von Wasser von der XPS Dämmung kann nicht beobachtet werden. Durch die unterschiedlichen Reibungskräfte an den beiden Oberflächen findet möglicherweise eine Kräfteumlagerung statt, was zu einer Änderung des horizontalen Frischbetondrucks führen kann. Einen genauen Rückschluss, ob dies einen Einfluss auf den horizontalen Frischbetondruck hat, kann an dieser Stelle jedoch noch nicht gegeben werden.

4.2 Untersuchung der Wasseraufnahmefähigkeit von Wärmedämmung

In einer Versuchsreihe von Pahn (2011) konnte festgestellt werden, dass bei der Verwendung von expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) geringere Frischbetondrücke entstehen, als bei der Verwendung von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (XPS) (siehe Kapitel 2.2). Grund dafür könnten u.a. die verschiedenartigen Zellstrukturen und hiermit die unterschiedliche Wasseraufnahmefähigkeit der Dämmstoffe sein. EPS besteht aus einer geschlossenen Porenstruktur. Beim Verdichten wird ein Teil des im Frischbeton enthaltenden Wassers in die Dämmung zwischen die Poren gepresst. Die Struktur von

Dämmstoffen aus XPS ist ebenfalls geschlossen, die einzelnen Zellen sind jedoch so klein, dass kein Wasser eindringen kann (siehe Abbildung 9). Die Wasseraufnahmefähigkeit von EPS wird deshalb in einer Reihe von Kleinversuchen untersucht und bewertet.



Abbildung 10: Versuchsstand zur Untersuchung der Wasseraufnahmefähigkeit von EPS

Der Versuchsstand besteht aus zwei Kammern mit einem Volumen von jeweils 15 l, wovon eine Kammer ausschließlich schalglatte Oberflächen besitzt. In die andere Kammer wird passgenau eine EPS-Dämmung (Rohdichte ca. 15 kg/m³) eingelegt (siehe Abbildung 10).



Abbildung 11: Frischbeton in den Versuchsstand eingefüllt; vor (links) und nach (rechts) der Verdichtung

Der Versuch besteht aus drei Schritten. Zuerst wird eine Frischbetonmischung hergestellt und die Konsistenzklasse mittels Ausbreitmaßversuch nach DIN EN 12350-5 bestimmt. Anschließend wird der Frischbeton in den Versuchsstand eingebracht und unter Verwendung einer Rüttelflasche verdichtet. Unmittelbar danach wird der Frischbeton wieder aus dem Versuchsstand entfernt und es werden die Ausbreitmaße der Frischbetonproben aus den beiden Kammern bestimmt. Eine Veränderung des Ausbreitmaßes nach dem Verdichten lassen Rückschlüsse auf die Wasseraufnahmefähigkeit des EPS zu. Zudem wurde das Gewicht der Dämmung vor und nach der Verdichtung gemessen. In Abbildung 11 ist der mit Beton gefüllte Versuchstand vor und nach der Verdichtung dargestellt. Es wurden insgesamt acht Versuche mit unterschiedlichen Frischbetonkonsistenzen durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 5 dargestellt.

Konsistenz	Au	sbreitmaß [cr	n]	Gewicht der Wärmedämmung [g]		
Runsistenz	ursprünglich	ohne EPS	mit EPS	vorher	nachher	
F2	40	36	32	-	-	
F3	47	37	32	-	-	
F3	48	40	33	84,4	341,0	
F3	46	39	34	86,1	309,6	
F4	53	39	36	84,5	420,0	
F4	51	47	34	80,8	326,0	
F4	55	49	38	82,3	415,5	
F5	60	46	42	86,7	398,9	

Tabelle 5: Versuchsergebnisse zur Wasseraufnahmefähigkeit von EPS

Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Ausbreitmaße nach der Verdichtung jeweils kleiner sind, als die ursprünglich gemessenen. Wie erwartet liegen die Ausbreitmaße des Betons aus der Kammer mit einer Dämmschicht aus EPS unter denen des Betons aus der anderen Kammer. Mit steigendem Wassergehalt des Betons steigt die von der Dämmung aufgenommene Wassermenge. Gleichzeitig reduziert sich das Ausbreitmaß. In Abbildung 12 sind die Ausbreitversuche der Konsistenzklasse F3 dargestellt.



Abbildung 12: Ausbreitversuche für F3 ursprünglich (links), ohne EPS (mitte) und mit EPS (rechts)



Abbildung 13: Schnitt durch die Dämmung nach den Versuchen

Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass sich die Wasseraufnahmefähigkeit des Dämmstoffes auf die Konsistenz des Betons auswirkt. Abbildung 13 zeigt den Dämmstoff in aufgeschnittener Darstellung. Die Dunkelfärbung zeigt den Wassereintrag in den Dämmstoff.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche werden in Kapitel 6 weiter ausgewertet, um eine Modellbildung zu ermöglichen. Hierbei werden Rückschlüsse auf die Änderung des Seitendruckbeiwerts λ_0 infolge eines Wasserentzugs des Betons gezogen.

4.3 Großversuchsreihe

Aufgrund der großen Zahl an Einflussparametern auf den horizontalen Frischbetondruck wurden die Untersuchungen in der ersten Versuchsreihe auf die Variation folgender Parameter begrenzt:

- Oberflächenrauigkeit der FT-Tragschale
- Rauigkeit der innenliegenden Dämmstoffoberfläche
- Dehnsteifigkeit des Dämmstoffs
- Dicke des Dämmstoffs

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe soll ein Verständnis für die einzelnen Einflussparameter geschaffen werden. Dadurch können sehr einflussschwache Parameter in weiteren Versuchsreihen ausgeschlossen und dadurch Zeit und Materialkosten eingespart werden.

4.3.1 Versuchsprogramm und Messtechnik

Das durchgeführte Versuchsprogramm besteht aus acht Großversuchen. Sechs der Versuchskörper wurden klassisch als Halbfertigteil mit nachträglicher Ortbetonergänzung hergestellt (GV01 bis GV06, siehe Abbildung 14, links). Zwei weitere Versuchskörper wurden als Referenzversuche hergestellt. Hierbei wurden die GFK-Verbindungsmittel durch Gewindestangen aus Stahl mit gleicher Dehnsteifigkeit ersetzt und mit den FT-Betonplatten verschraubt (GV07 und GV08, siehe Abbildung 14, mitte und rechts). Dies ermöglicht es, den Frischbetondruck anstatt über Dehnmessstreifen auf den Verbindungsmitteln, über außen angebrachte Kraftmessdosen zu messen. Somit kann die kosten- und zeitintensive Applikation von DMS entfallen.

Im Rahmen von Versuch GV07, der den gleichen Querschnittsaufbau wie GV01 hat, sollte untersucht werden, ob die Messung mit außen angebrachten Kraftmessdosen zu ähnlichen Ergebnissen wie mit DMS auf den Verbindungsmitteln führt. Für zukünftige Untersuchungen würde dies zu einer schnelleren und günstigeren Versuchsvorbereitung führen.

Versuch GV08 stellt den Fall einer beidseitig glatten Schalung dar. Die Ergebnisse dieses Versuchs können sowohl mit den Versuchen GV01 bis GV06 als auch mit der Berechnung nach DIN 18218 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" verglichen werden.

Bei der Versuchsdurchführung werden über die Höhe der Versuchskörper an jeweils vier Messpunkten mit einem Randabstand von 200 mm und einem Abstand untereinander von 400 mm die Kräfte bzw. Dehnungen in den Verbindungsmitteln gemessen. Zusätzlich werden zwei Kraftmessdosen am Fußpunkt der Versuchskörper angeordnet, um den vertikalen Frischbetondruck zu messen. Durch das Messen der vertikalen Kräfte können Aussagen darüber getroffen werden, welcher Teil der Last des Ortbetons über Reibung über die Oberflächen abgetragen werden kann und ob dieser einen Einfluss auf den horizontalen Frischbetondruck hat.



Abbildung 14: Geometrie, Aufbau und applizierte Messtechnik der Versuchskörper

Tabelle 6 zeigt das Versuchsprogramm unter Variation der Oberflächenrauigkeit des Betons, der Rauigkeit der Dämmstoffoberfläche, der Dehnsteifigkeit des Dämmstoffs und der Dicke der wärmedämmenden Schicht.

Die Bezeichnung der Großversuche findet nach folgendem Schema statt:

A-B-C-D-E (z.B. GV06-100-XPS*-60-R)

- Mit A Nummer des Großversuchs
 - B Dicke der Ortbetonschicht in mm
 - C Art des Dämmstoffs (* für eine Dämmung mit profilierter Oberfläche, S für schalglatte Oberfläche (keine Dämmung))
 - D Dämmstoffdicke in mm
 - E Oberflächenbeschaffenheit der FT-Tragschale (R = rau, V = verzahnt, S = schalglatte Oberfläche)

Versuch	Ortbetondicke [mm]	Dämmstofftyp	Dämmstoffdicke [mm]	Oberfläche Beton			
	Konventio	nelle Versuche					
GV01-100-EPS-60-R	100	EPS	60	rau			
GV02-100-EPS-200-R	100	EPS	200	rau			
GV03-100-XPS-60-V	100	XPS (glatt)	60	verzahnt			
GV04-100-XPS-200-R	100	XPS (glatt)	200	rau			
GV05-100-XPS-60-R	100	XPS (glatt)	60	rau			
GV06-100-XPS*-60-R	100	XPS (rau)	60	rau			
Referenzversuche							
GV07-100-EPS-60-R	100	EPS	60	rau			
GV08-100-S-x-S	100	Schalung	-	Schalung			

Tabelle 6: Versuchsprogramm Großversuchsreihe

4.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Für die Durchführung der Großversuche wurde ein Versuchsstand konzipiert, der eine realitätsnahe Lagerung der Sandwichwände während der Verfüllung der Ortbetonergänzung ermöglicht. Abbildung 15 zeigt einen Versuchskörper im Versuchsstand vor der Versuchsdurchführung (links).



Abbildung 15: Versuchskörper vor der Versuchsdurchführung (links) und Messtechnik (rechts)

Bei den Versuchen wurde ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 mit einem Größtkorn von 16 mm (Sieblinie A/B) und einem w/z-Wert von 0,55 verwendet. Der Frischbeton konnte der Konsistenzklasse F2/F3 zugeordnet werden.

Die Betoniergeschwindigkeit bei Elementwänden auf der Baustelle beträgt ca. 0,7 bis 1,6 m/h. Es ist jedoch darauf zu achten, dass es zu Schüttkegeln kommen kann und dadurch lokal viel höhere Betoniergeschwindigkeiten erreicht werden. Um einen realistischen Betoniervorgang unter Baustellengegebenheiten zu simulieren, wird der Frischbeton in den Versuchen in drei Abschnitten zu je ca. 50 cm eingefüllt und anschließend verdichtet.

Um den Einfluss der Erstarrung des Betons auszuschalten und gleichzeitig eine größtmögliche Belastung in den Verbindungsmitteln zu erreichen, wurde in den Versuchen eine relativ hohe Betoniergeschwindigkeit von ca. 3,2 m/h angestrebt. Es ist zu beachten, dass dies nur zu Forschungszwecken gemacht wurde und gemäß Zulassung der verwendeten Verbindungsmittel nicht zulässig wäre.



Abbildung 16: Verdichtungsvorgang während der Versuchsdurchführung

4.3.3 Versuchsergebnisse und Auswertung

Alle gemessenen Dehnungen wurden unter Ansatz eines Elastizitätsmoduls der GFK-Verbindungsmittel von 60.000 N/mm² in Kräfte umgerechnet.

4.3.3.1 Kraftverlauf im höchstbelasteten Verbindungsmittel (Versuche GV01 bis GV06)

Für die Dimensionierung der Verbindungsmittel in Sandwichelementen mit nachträglicher Ortbetonergänzung ist das höchstbelastete Verbindungsmittel bemessungsrelevant. Im Falle des durchgeführten Versuchsprogramms stellt dies immer das unterste Verbindungsmittel dar (DMS 1, siehe Abbildung 15).

Abbildung 17 zeigt die Kraftverläufe im untersten Verbindungsmittel für die Versuche GV01 bis GV06. Da die gemessenen Dehnungen in Versuch GV04 außerhalb des zu erwartenden Bereichs lagen und dies auf einen Fehler in der Messtechnik zurückzuführen ist, wurden diese Messergebnisse in der Auswertung nicht weiter betrachtet.



Abbildung 17: Kraftverlauf im untersten Verbindungsmittel während der Versuche GV01 bis GV06

Der Vergleich zeigt, dass es sowohl qualitativ als auch quantitativ bei den Versuchen keine großen Unterschiede zwischen den Kräfte-Peaks während den Verdichtungsvorgängen gibt.

Tendenziell entsteht im untersten Verbindungsmittel beim Betonieren des ersten Abschnitts eine Druckkraft. Nach dem ersten Verdichten und der damit verbundenen Verflüssigung des Frischbetons entsteht im untersten Verbindungsmittel eine Zugkraft von ca. 0,5 kN. Nach Beenden der Verdichtung fällt die Zugkraft im untersten Verbindungsmitteln wieder ab. Beim Fortsetzen der Betonage mit dem zweiten Abschnitt ist in DMS 1 kein Zuwachs der Dehnung mehr zu verzeichnen. Die Kraft im Verbindungsmittel erhöht sich erst wieder beim nächsten Verdichtungsvorgang. Dabei werden Zugkräfte von ca. 2,0 kN erreicht. Während der Betonage des dritten Abschnitts fällt die Kraft im unteren Verbindungsmittel wieder ab. Beim letzten Verdichtungsvorgang wird das Maximum von ca. 5,0 kN erreicht. Nach Beenden der Betonage fällt die Zugkraft im Verbindungsmittel wieder ab.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die variierten Parameter (Oberflächenrauigkeit des Betons, Rauigkeit der Dämmstoffoberfläche, Dehnsteifigkeit des Dämmstoffs und Dicke der wärmedämmenden Schicht) keinen Einfluss auf den Verlauf des Frischbetondrucks haben, solange eine Erstarrung des Betons noch nicht eingetreten ist und immer eine Verdichtung mit maximal möglicher Tiefe stattfindet. Dies entspricht nicht den Aussagen von Pahn, die auf ähnlich durchgeführte Großversuche gestützt sind. Nach Pahn beträgt der maximale, horizontale Frischbetondruck bei baugleichen Wandkonstruktionen beim Einsatz von Dämmung aus EPS nur rund 60 % im Vergleich zu einer Dämmung aus XPS (siehe Kapitel 2.2). Diese Erkenntnis wurde im Rahmen von Versuchen mit großen Betonierhöhen gemacht. Bei niedrigen Betonierhöhen kann ein Einfluss der untersuchten Einflussparameter auf den Frischbetondruck nach bisherigen Erkenntnissen ausgeschlossen werden.

4.3.3.2 Kraftverläufe in allen vier Verbindungsmitteln (Versuche GV01 bis GV06)

Qualitativ weisen die Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln bei den Versuchen GV01 bis GV06 nur geringe Unterschiede auf. Exemplarisch ist in Abbildung 18 das Kraft-Zeit-Diagramm für die Verbindungsmittel in Versuch GV03 dargestellt.



Abbildung 18: Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln bei Versuch GV03

Charakteristisch für die Verteilung des Frischbetondrucks sind die großen Kraftsprünge in den Verbindungsmitteln während den Verdichtungsvorgängen. Dies ist auf die plötzliche Verflüssigung des Betons zurückzuführen. Je nach Füllstand des Ortbetons können während den Einfüllvorgängen in den Verbindungsmittel teilweise auch Druckkräfte entstehen. Während des dritten Verdichtungsvorgangs wird in allen Versuchen der größte Frischbetondruck erreicht. Dabei wird das unterste Verbindungsmittel im Vergleich zu den darüber liegenden Verbindungsmitteln immer deutlich höher als die restlichen Verbindungsmittel belastet.

4.3.3.3 Vergleich von Versuch GV01 und Versuch GV07

Der Referenzversuch GV07 dient dazu, zwei unterschiedliche Messtechniken zur Bestimmung des Frischbetondrucks zu vergleichen. Beide Versuchskörper haben den gleichen Querschnittsaufbau (siehe Tabelle 6). Bei GV01 wurde die Verteilung des Frischbetondrucks mittels Dehnmessstreifen auf den Verbindungsmitteln, bei GV07 mit außen angebrachten Kraftmessdosen gemessen.



Abbildung 19: Verteilung des Frischbetondrucks bei den Versuchen GV01 und GV07

Abbildung 19 zeigt die Verteilung des Frischbetondrucks bei den Versuchen GV01 und GV07 während den drei Verdichtungsvorgängen. Die Ergebnisse zeigen, dass es zwischen der Messmethode mit DMS und der mit KMD Unterschiede gibt. Bei Versuch GV07 werden im untersten Verbindungsmittel (DMS/KMD 1) während jedem Verdichtungsvorgang immer niedrigere Kräfte als bei Versuch GV01 erreicht. Dahingegen erfährt DMS/KMD 2 bei Versuch GV07 immer höhere Kräfte als bei Versuch GV01.

Der nachgebildete Aufbau mit Stahl-Gewindestangen als Verbindungsmittel kann die Tragwirkung eines klassischen Sandwichelements nicht exakt widerspiegeln. Der Grund dafür ist das verschiedenartige Tragverhalten eines in Beton eingebundenen GFK-Stabs (GV01) und einer Gewindestange, die keinen Verbund mit dem Beton hat, sondern über Muttern befestigt ist (GV07). Das Messen des Frischbetondrucks über außen angebrachte Kraftmessdosen erscheint somit als ungeeignet, da es schwer ist, bei einem nachgebildeten Aufbau das gleiche statische System zu erreichen, wie bei einem klassischen Sandwichelement.

4.3.3.4 Bewertung des Referenzversuchs GV08 mit beidseitig glatter Schalung

Um eine Referenz zu den Versuchen GV01 bis GV06 zu schaffen, wurde ein Versuch mit beiderseits schalglatter Oberfläche durchgeführt (GV08). Dieser entspricht dem Geltungsbereich der aktuellen DIN 18218 (Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen) und kann mit dem rechnerischen Ergebnis (charakteristisch) verglichen werden.



Abbildung 20: Verteilung des Frischbetondrucks bei Versuch GV08 und charakteristischer Frischbetondruck nach Berechnung mit DIN 18218

Abbildung 20 zeigt die Verteilung des Frischbetondrucks über die Bauteilhöhe bei Versuch GV08 vor und nach den drei Verdichtungsvorgängen. Zusätzlich ist für jeden Verdichtungszeitpunkt die berechnete Verteilung des charakteristischen Frischbetondrucks nach DIN 18218 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass in Versuch GV08 der maximale Frischbetondruck im untersten Verbindungsmittel immer geringer ist als nach der Berechnung nach DIN 18218 (charakteristisch Frischbetondruck). Der prozentuale Unterschied zwischen dem maximalen Frischbetondruck im Versuch und nach DIN 18218 nimmt bei zunehmender Betonierhöhe immer weiter ab. So nimmt das Verhältnis von gemessenem und berechnetem Druck von

41 % beim ersten Verdichtungsvorgang auf 64 % beim dritten Verdichtungsvorgang zu. Somit liegt die Berechnung nach DIN 18218 bei niedrigen Betonierhöhen weiter auf der sicheren Seite als bei hohen Betonierhöhen.

Abbildung 21 zeigt die Verteilung des Frischbetondrucks bei beiderseits schalglatter Oberfläche (GV08) und Sandwichelementen mit nachträglicher Ortbetonergänzung (GV01 bis GV06).



Abbildung 21: Verteilung des Frischbetondrucks bei den Versuchen GV01 bis GV06 und GV08

Zwischen den Versuchen GV01 bis GV06 gibt es sowohl qualitativ als auch quantitativ keine großen Unterschiede. Auffallend ist, dass das unterste Verbindungsmittel in den Versuchen GV01 bis GV06 viel mehr Kraft erfährt als im Referenzversuch GV08. Grund dafür ist die Messmethode mit Kraftmessdosen. Der maximale Frischbetondruck reicht sogar bis über die Höhe des charakteristischen Frischbetondrucks nach DIN 18218.

Um die Richtigkeit der Verteilung des Frischbetondrucks in den Versuchen zu überprüfen, wurde ein statisches Ersatzsystem für die Sandwichelemente gebildet und dieses vereinfacht unter der inwirkung "Frischbetondruck" mit einem Stabwerkprogramm berechnet. Die Einwirkung stellt eine hydrostatische Druckverteilung mit der Wichte von Beton bei einer Betonierhöhe von 50 cm, 100 cm und 150 cm dar.

Die Nachrechnung mit einem Stabwerkprogramm zeigt, dass sich kein linearer, sondern ein geknickter Verlauf des Frischbetondrucks einstellt (siehe Abbildung 22). Genau wie bei den Versuchen GV01 bis GV06 ist auch hier die Kraft im untersten Verbindungsmittel im Vergleich zu der Kraft in den darüber liegenden Verbindungsmitteln immer höher.





4.3.3.5 Vergleich mit höheren Versuchskörpern (Pahn, 2011)

Im Rahmen der bisher durchgeführten Versuche konnte keine signifikante Abhängigkeit des horizontalen Frischbetondrucks von den variierten Einflussparametern festgestellt werden. Die Erkenntnisse von Pahn (siehe Kapitel 2.2) konnten damit jedoch nicht bestätigt werden.

Die eigens durchgeführten Versuche (siehe Kapitel 4.3.1) wurden so konzipiert, dass ein direkter Vergleich mit zwei Versuchen von Pahn möglich ist. Der Querschnittsaufbau ist fast identisch (siehe Tabelle 7), das Verbindungsmittelraster und die Steifigkeit der Verbindungsmittel sind gleich und bis auf einen geringen Unterschied bei der Kornverteilung stimmen auch die beiden Betonrezepturen überein.

Da die Versuchskörper von Pahn viel höher sind (400 cm), sind die maximalen Frischbetondrücke nur schwer mit den eigenen Messwerten vergleichbar. Demzufolge wird nicht der maximale Druck, sondern die Verteilung des Frischbetondrucks während zwei Verdichtungsvorgängen in niedriger Höhe verglichen. Der Vergleich findet bei einer Betonierhöhe von ca. 65 cm, die zweite bei ca. 150 cm statt.

Versuch	Oberfläche Beton	Dämmstofftyp	Dämmstoffdicke [mm]	Ortbetondicke [mm]		
		Vergleich 1				
GV02	rau	EPS	200	100		
W1 (Pahn)	rau	EPS	140	100		
Vergleich 2						
GV05	rau	XPS (glatt)	60	100		
W2 (Pahn)	rau	XPS (glatt)	60	80		

Tabelle 7: Vergleich vo	on hohen (400 cn	n) und niedrigen (160	cm) Versuchskörpern
-------------------------	------------------	-----------------------	---------------------

Der einzige Unterschied ist die Betoniergeschwindigkeit, die bei Pahn lediglich 1,6 m/h beträgt. Dies hat jedoch auf die Verteilung des Frischbetondrucks noch keinen Einfluss, da

bei einer Betonierhöhe von 160 cm weder mit 3,2 m/h noch mit 1,6 m/h der Erstarrungsbeginn des Betons während des Betonierens erreicht wird.

Abbildung 23 zeigt den Vergleich der beiden Versuchspaare GV02-W1 und GV05-W2 bei einer Betonierhöhe von 65 cm und 150 cm. Zusätzlich ist die errechnete Druckverteilung nach DIN 18218 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass es bei geringen Betonierhöhen keine großen Unterschiede zwischen GV02 und W1 sowie GV05 und W1 gibt, solange das Erstarren des Betons noch nicht eingetreten ist und immer bis zum Boden der Wand verdichtet wird. Die Dehnsteifigkeit des Dämmstoffs und die Dicke der Wärmedämmung haben keinen signifikanten Einfluss auf die Verteilung des Frischbetondrucks. Auffällig ist auch, dass Frischbetondrücke in den Versuchen erreicht werden, die nahe an der Berechnung nach DIN 18218 (charakteristischer Frischbetondruck) liegen oder diesen sogar übersteigen.



Abbildung 23: Vergleich der Versuche GV02 und GV05 mit W1 und W2 von Pahn

Werden die hohen Versuchskörper (W1 und W2) weiter ausbetoniert, so ist eine zunehmende Abhängigkeit der Frischbetondruckverteilung von der Art und Dicke eines innenliegenden Dämmstoffs zu erkennen. Dies führt zu einem abschließenden Ergebnis von Pahn, dass bei baugleichen Wandkonstruktionen der maximale, horizontale Frischbetondruck beim Einsatz von Dämmung aus EPS nur rund 60 % im Vergleich zu einer Dämmung aus XPS beträgt (siehe Abbildung 24, Pahn (2011)).



Abbildung 24: Verteilung des Frischbetondrucks bei Versuch W1 (EPS, links) und W2 (XPS, rechts) sowie jeweilige Füllhöhe

In Abbildung 24 ist die Verteilung des Frischbetondrucks bei den Versuchen W1 und W2 bis zu einer Betonierhöhe von 400 cm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass erst bei Betonierhöhen ab ca. 200 cm ein innenliegender Dämmstoff die Verteilung des Frischbetondrucks beeinflusst. Beim Einsatz von EPS tritt dieser Effekt viel schneller und einflussreicher ein, als beim Einsatz von XPS (siehe Abbildung 24). Beträgt bei W1 die maximal im Verbindungsmittel gemessene Kraft nur 5,8 kN, so wird bei W2 eine maximale Kraft von 9,2 kN gemessen. Der maximale Druck beim Einsatz von EPS beträgt damit nur 63 % vom Druck beim Einsatz von XPS.

4.3.3.6 Vertikale Last am Fußpunkt der Versuchskörper

Bei allen Versuchen wurde zusätzlich zu der Kraft bzw. Dehnung in den Verbindungsmitteln die vertikale Auflagerkraft infolge der Eigenlast des Frischbetons am Fußpunkt der Wände gemessen (siehe Abbildung 14). Dadurch können Aussagen darüber getroffen werden, welcher Teil der Last des Ortbetons über Reibung über die Oberflächen abgetragen werden kann und ob dieser einen Einfluss auf den horizontalen Frischbetondruck hat. Abbildung 25 zeigt den Vergleich zwischen der gemessenen und der rechnerischen Kraft (Eigenlast der Ortbetonverfüllung) bei allen drei Verdichtungsvorgängen.



Abbildung 25: Rechnerische und im Versuch ermittelte vertikale Auflagerkraft infolge der Ortbetonergänzung

Es ist zu erkennen, dass bei allen Versuchen die gemessene Kraft nahe an der rechnerisch ermittelten Kraft liegt. Die im Versuch ermittelte Kraft liegt, außer bei Versuch GV03, immer zwischen 96% und 99% der rechnerischen Kraft. Somit wird über Reibung des Frischbetons an der angrenzenden Beton und Dämmstoffoberfläche fast keine Last auf die beiden äußeren FT-Betonschalen des Sandwichelements abgetragen. Bei Versuch GV03 (verzahnte Betonoberfläche) wird ein prozentuales Verhältnis von bis zu 107% erreicht.

4.3.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe mit niedrigen Betonierhöhen konnten Eigenschaften wie die Oberflächenrauigkeit des Betons, die Rauigkeit der Dämmstoffoberfläche, die Dehnsteifigkeit des Dämmstoffs oder die Dicke der Wärmedämmung als Einflussparameter für den maximalen Frischbetondrucks ausgeschlossen werden.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse und -auswertung wird deshalb vermutet, dass sich der Einfluss erst ab einer bestimmten Bauteil- bzw. Betonierhöhe - in Zusammenhang mit der Erstarrung des Betons - auswirkt. Auch die Art der Verdichtung spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Je nach Eintauchtiefe des Rüttlers werden unterschiedlich hohe Frischbetondrücke erreicht, da eine Verflüssigung des Betons veranlasst wird. Wird im Wandelement demnach immer so tief wie möglich verdichtet, so entstehen viel höhere Drücke, als bei einer Verdichtung der beiden obersten Betonschichten. Außerdem findet eine Verzögerung der Erstarrung des Betons statt, weil dieser immer wieder verflüssigt wird.

Eine mechanische Begründung kann zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht geliefert werden. Um die Ursache zu finden, werden deshalb zwei weitere Versuchsreihen durchgeführt.

4.4 Kleinversuchsreihe

Mithilfe eines speziell konzipierten Versuchsstands wurden im Rahmen einer Kleinversuchsreihe weitere Einflussparameter getestet. Die bisher nicht berücksichtige Dicke der Ortbetonschicht und Konsistenzklasse des Betons steht hierbei im Vordergrund. Ziel der Kleinversuchsreihe ist es, deren Einfluss in Zusammenhang mit der Art der Wärmedämmung und der Oberflächenrauigkeit der angrenzenden Schalungsflächen zu untersuchen. Der Einfluss der Erstarrung wurde durch eine geringe Betonierhöhe von lediglich 65 cm ausgeschalten.

4.4.1 Konzeption und Herstellung des Versuchsstandes

Im Rahmen der Kleinversuchsreihe wurde ein wiederverwendbarer Versuchsstand konzipiert und hergestellt. Dieser ermöglicht die Variation der Dicke der Ortbetonverfüllung, der Dämmstoffart und Dämmstoffdicke, der Oberflächenrauigkeit der FT-Tragschale und der Konsistenz des Betons. Durch die geringe Größe und Wiederverwendbarkeit des Versuchsstandes ist eine höhere Versuchsanzahl bei geringerem zeitlichen Aufwand möglich.

Bei der Versuchsdurchführung wird in den Versuchsstand der Beton eingefüllt und anschließend verdichtet. Währenddessen wird der maximal entstehende Frischbetondruck gemessen. Vor Erstarren kann der Beton aus dem Versuchsstand entfernt und der nächste Versuch durchgeführt werden.



Abbildung 26: Schematische Darstellung des Kleinversuchsstandes

Als Unterkonstruktion für den Versuchsstand wurde eine stabile Oberfläche mit einem Stahlblech als Oberfläche hergestellt (siehe Abbildung 26, links oben). Auf diese Unterkonstruktion werden zwei Betonplatten aufgestellt - eine Platte mit und eine ohne Öffnungen. Die Betonplatte mit Öffnungen wird über eine Stützkonstruktion fest mit der Unterkonstruktion verbunden (siehe Abbildung 26, rechts oben). Die Platte ohne Öffnungen wird in einem gewissen Abstand parallel zur anderen Platte gestellt. (siehe Abbildung 26, links unten). Der Abstand der Platten wird entsprechend des Abstands "Dämmstoffdicke plus Dicke der Ortbetonverfüllung" eingestellt. Anschließend werden die Betonplatten seitlich durch Schalplatten abgedichtet (siehe Abbildung 26, rechts unten). Um den Einfluss der Beschaffenheit der innen liegenden Betonoberfläche zu untersuchen werden zum einen Betonplatten mit einer rauen und zum anderen Betonplatten mit einer verzahnten Oberfläche hergestellt.

An der Betonplatte mit Öffnungen wird der horizontale Frischbetondruck an den drei Öffnungen gemessen (siehe Abbildung 27). Hierzu werden Betonquader hergestellt. Die Betonquader werden in die Öffnungen der Betonplatten passend hergestellt, wobei umlaufend ein Abstand von 2 mm zwischen Betonguader und Betonplatte bestehen bleibt. In die Betonquader werden mittig Gewindestange einbetoniert. An diesen Gewindestangen werden jeweils mithilfe von zwei Dehnmessstreifen (DMS) während der Versuche die Dehnung und damit die Kraft infolge der Ortbetonverfüllung gemessen. Durch beidseitiges Bekleben der Gewindestangen können auch Biegeeffekte gemessen werden. Die Fuge um die Betonquader wird mit Silikon abgedichtet, um Betonaustritt und Einflüsse auf die horizontale Beweglichkeit der Betonquader während des Betonierens möglichst gering zu halten. Die Haltekonstruktion für die Messtechnik wird aus Vierkant-Stahlprofilen hergestellt und mit der Betonplatte mit Öffnungen verschraubt. Sie bietet eine Art Widerlager, um über Betonguader mit Gewindestange den Druck messen zu können.Die die drei Haltekonstruktion dient also dazu, die Betonquader genau mittig in den Öffnungen der Betonplatte zu platzieren. Um die Reibung in der Öffnung möglichst gering zu halten, wurden die Betonguader mit Teflonfolie umwickelt.



Legende:1. Haltekonstruktion3. Mess-Gewindestange2. Betonquader4. Betonplatte mit Öffnungen

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Mess- und Haltekonstruktion inkl. Betonquader, Mess-Gewindestangen und Betonplatte mit Öffnungen Der horizontale Frischbetondruck im Versuchsstand während der Versuchsdurchführung verursacht eine translatorische Bewegung der Betonquader in Richtung der Haltekonstruktion. Dadurch entsteht eine Dehnung bzw. Stauchung der Gewindestange, welche über einen DMS gemessen wird. Die Applikation von DMS auf der Gewindestange wird durch eine definierte Querschnittreduzierung auf einen Rechteckquerschnitt ermöglicht. Abbildung 28 zeigt zwei Mess-Gewindestangen mit aufgeklebten DMS inklusive angelöteter Kabel.



Legende:

- 1. Gewindestange M10
- 2. Dehnungsmessstreifen

Abbildung 28: Mess-Gewindestangen mit aufgeklebten DMS

Um die empfindlichen Messgitter der Dehnungsmessstreifen vor Beschädigung zu schützen, werden diese mit einer speziellen Kautschukfolie umwickelt. Abbildung 29 zeigt die Messeinrichtung inkl. Betonquader und Haltekonstruktion im fertig eingebauten Zustand.



Legende:

- 1. Betonplatte mit Öffnungen
- 2. Betonquader (M10 einbetoniert)
- 3. Mess-Gewindestange
- 4. Haltekonstruktion
- 5. Verbindungsmutter

Abbildung 29: Konstruktion zur Messung des horizontalen Frischbetondrucks

In Abbildung 30 ist der Versuchsstand mit allen Komponenten kurz vor der Versuchsdurchführung dargestellt.



Legende:

- 1. Betonplatte mit Öffnungen
- 2. Schalbrett zur seitlichen Abdichtung
- 3. Klappe für den Ausbau
- 4. Unterkonstruktion
- 5. Stützkonstruktion
- 6. Haltekonstruktion
- 7. Mess-Gewindestange
- 8. Betonquader (M10 einbetoniert)

Abbildung 30: Versuchsstand vor der Versuchsdurchführung

4.4.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm besteht aus insgesamt 18 Versuchen. Diese können in Gruppen mit jeweils einem bis vier Versuchen eingeteilt werden. Innerhalb einer Gruppe wird meist nur die Konsistenz des verwendeten Frischbetons variiert und die restlichen Parameter konstant gehalten.

Die Bezeichnung der Kleinversuche findet nach folgendem Schema statt:

A-B-C-D-E (z.B. KV01-80-EPS#-F4-R)

- Mit A Nummer des Kleinversuchs
 - B Dicke der Ortbetonschicht in mm
 - C Art des Dämmstoffs (# für eine auf die Dämmung aufgebrachte Folie, V für verzahnte Betonoberfläche (keine Dämmung), S für schalglatte Oberfläche (keine Dämmung))
 - D Konsistenzklasse des Betons
 - E Oberflächenbeschaffenheit der FT-Tragschale (R = rau, V = verzahnt, S = schalglatte Oberfläche)

0.7	Marauah	Ortbetondicke	Dämmstoff	Konsistenz-	Oberfläche		
Gr.	versuch	[mm]	(60mm)	klasse	Beton		
		80	EPS*) +	E۸	rou		
		00	Folie	14	Tau		
1	KV02-80-EPS-F2-R	80	EPS*)	F2	rau		
	KV03-80-EPS-F4-R	80	EPS*)	F4	rau		
	KV04-80-EPS-SVB-R	80	EPS*)	SVB	rau		
	KV05-80-XPS-F2-R	80	XPS**)	F2	rau		
2	KV06-80-XPS-F4-R	80	XPS**)	F4	rau		
	KV07-80-XPS-SVB-R	80	XPS**)	SVB	rau		
	KV08-80-EPS-F2-V	80	EPS*)	F2	verzahnt		
3	KV09-80-EPS-F4-V	80	EPS*)	F4	verzahnt		
	KV10-80-EPS-SVB-V	80	EPS*)	SVB	verzahnt		
1	KV11-80-V-F2-V	80	verzahnt	F2	verzahnt		
4	KV12-80-V-F4-V	80	verzahnt	F4	verzahnt		
5	KV13-80-S-F2-S	80	Schalung	F2	Schalung		
5	KV14-80-S-F4-S	80	Schalung	F4	Schalung		
	KV15-160-EPS-F2-R	160	EPS*)	F2	rau		
6	KV16-160-EPS-F4-R	160	EPS*)	F4	rau		
	KV17-160-EPS-SVB-R	160	EPS*)	SVB	rau		
7	7 KV18-140-x-x-R Wasserversuch (140 mm Abstand zwischen Betonschalen)						
*) EF	PS = expandierter Polystyr	ol-Hartschaum					
** ⁾ XPS = extrudierter Polystyrol-Hartschaum							

Tabelle 8: Versuchsprogramm der Kleinversuchsreihe

Gruppe 1 – EPS Dämmstoff und raue Betonoberfläche

Die Gruppe umfasst die Versuche KV01 bis KV04. Die Versuche werden mit den Betonplatten mit rauen Oberflächen durchgeführt. Bei dieser Versuchsreihe wird eine 60mm dicke Platte aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) in dem Versuchsstand platziert. Sie wird an die Betonplatte ohne Öffnungen geklebt und somit in ihrer Lage gesichert. Die Ortbetondicke bei dieser Gruppe beträgt 80 mm. Der Versuch KV01 unterscheidet sich von den anderen dieser Gruppe, da auf die EPS-Dämmung eine Folie aufgeklebt ist, welche die Wasseraufnahme der Dämmung unterbinden soll.

Gruppe 2 – XPS Dämmstoff und raue Betonoberfläche

Die Versuche KV05 bis KV07 bilden die zweite Gruppe. Diese Gruppe wird ebenfalls mit den Betonplatten mit rauen Oberflächen und einem Ortbetonspalt von 80 mm durchgeführt. Sie unterscheidet sich von Gruppe 1 nur durch den Ersatz der EPS-Dämmung durch XPS-Dämmung.

Gruppe 3 – EPS Dämmstoff und verzahnte Betonoberfläche

Zur dritten Gruppe zählen die Versuche KV08 bis KV10. Die Versuche entsprechen denen der Gruppe 1, weisen jedoch keine raue sondern eine verzahnte Betonoberfläche auf.

Gruppe 4 – Beidseitig verzahnte Oberflächen

Die vierte Gruppe beinhaltet die Versuche KV11 und KV12. Bei beiden Versuchen wird keine Dämmung in den Versuchstand eingebracht. Es werden nur beidseitig die Betonplatten mit
verzahnten Oberflächen verwendet, wobei der Ortbetonspalt 80 mm beträgt. Diese Gruppe stellt eine Grenzbetrachtung dar, da beide Betonflächen innerhalb des Versuchsstandes einen sehr hohen Reibungsbeiwert aufweisen. In dieser Gruppe werden für die Versuche nur die beiden Betone der Konsistenzklassen F2 und F4 untersucht.

Gruppe 5 – Beidseitig schalglatte Oberflächen

Die fünfte Gruppe, bestehend aus den Versuchen KV13 und KV14 und spiegelt genau das Gegenteil zur Gruppe 4 wieder. Hier wird der umgekehrte Grenzfall, von zwei Betonflächen mit einem möglichst geringen Reibungsbeiwert untersucht. Hierzu werden glatte Schaltafeln auf die Betonplatten und -quader geklebt. Die Ortbetondicke beträgt auch in dieser Versuchsreihe 80 mm und es werden ebenfalls nur die beiden Betone der Konsistenzklassen F2 und F4 untersucht.

Gruppe 6 – EPS Dämmstoff, raue Betonoberfläche und doppelte Ortbetondicke

Die Versuche KV15 bis KV17 bilden Gruppe 6. Der Unterschied zur Gruppe 1 besteht nur in einer größeren Ortbetondicke von 160 mm.

Gruppe 7 - Wasserversuch

Gruppe 7 besteht nur aus Versuch KV17, dem sogenannte Wasserversuch. Er dient dazu, vor Durchführung der Versuche die Funktionsfähigkeit und insbesondere die Messgenauigkeit des Versuchsstandes nachzuweisen. Der hydrostatische Wasserdruck innerhalb des Versuchsstandes kann einfach über die Dichte des Wassers genau bestimmt und mit den Messergebnissen verglichen werden.

In Tabelle 9 ist die Betonrezeptur des verwendeten Betons dargestellt. Die gewünschte Konsistenz wurde bei allen Versuchen mithilfe eines Fließmittels (ACE 430) hergestellt. Der Beton kann in die Druckfestigkeitsklasse C50/60 eingeteilt werden und besitzt ein Größtkorn von 16 mm (Sieblinie A/B) und einen w/z-Wert von 0,42.

Stoff	Menge [kg/m³]		
Wasser	187,5		
Zement CEM 42,5 N	450		
Zuschlag 0/2	525		
Zuschlag 2/8	580		
Zuschlag 8/16	530		
Fließmittel für F2	0,82		
Fließmittel für F4	1,5		
Fließmittel für SVB	1,75		

Tabelle 9: Betonrezeptur für die Kleinversuche

4.4.3 Messtechnik

Wie in Kapitel 4.4.1 schon erläutert, wird der horizontale Frischbetondruck während der Versuchsdurchführung über drei Betonquader auf Gewindestangen übertragen, auf welchen DMS aufgebracht sind (siehe Abbildung 31). Der Druck wird demnach indirekt über die gemessene Dehnung, der Querschnittfläche und des E-Moduls des Stahls errechnet.



Legende:

1. Betonplatte mit Öffnungen

2. Betonquader

M.-G. = Mess-Gewindestange

Abbildung 31: Schnitt durch eine Betonplatte mit Öffnungen, inklusive Betonquader und Mess-Gewindestangen (Maße in cm)

Versuch KV18 (Wasserversuch) dient ausschließlich dazu, die Funktionsfähigkeit der eingesetzten Messtechnik zu validieren. Hierzu wird der Versuchsstand abgedichtet, vollständig mit Wasser gefüllt und der horizontale Wasserduck an den drei Messstellen gemessen (siehe Abbildung 32). Die Ergebnisse zeigen, dass die Messung des Drucks über auf die Gewindestangen applizierte DMS trotz sehr geringen Lasten eine ausreichend hohe Genauigkeit aufweisen.



Legende:

- 1. Folie über den Messstellen
- 2. Elastisches Dichtungsband

Abbildung 32: Abdichtung des Versuchsstandes für den Wasserversuch (links) und mit Wasser gefüllter Versuchsstand KV18 (rechts)

4.4.4 Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung kann zwischen dem Einsatz von Rüttelbetonen und selbstverdichtenden Betonen unterschieden werden. Bei Rüttelbetonen wird vor dem Einfüllen in den Versuchsstand das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 und die Frischbetonrohdichte nach DIN EN 12350-6 bestimmt. Anschließend wird die Messung

gestartet und der Versuchsstand bis zur Oberkante mit Beton verfüllt. Im nächsten Schritt erfolgt die Verdichtung des Betons, wobei bei allen Versuchen stets auf eine gleiche Verdichtung geachtet wird. Nach dem Verdichten wird der Abstand des Betonspiegels zur Oberkante des Versuchstandes gemessen und notiert. Abbildung 33 zeigt einen Versuch während der Einfüllung eines Rüttelbetons und nach dem Verdichtungsvorgang.



Abbildung 33: Versuchskörper während des Einfüllens eines Rüttelbetons (links) und nach dem Verdichten (rechts)

Der nach der ersten Verdichtung entstandene Hohlraum wird erneut, möglichst ohne mechanische Verdichtung, bis zur Oberkante mit Frischbeton aufgefüllt und verdichtet. Anschließend wird die Höhendifferenz zwischen Betonspiegel und Oberkante des Versuchsstandes erneut gemessen und dokumentiert. Im Anschluss wird der Frischbeton für 20 bis 30 Minuten in dem Versuchsstand belassen.

Versuche mit selbstverdichtendem Beton unterscheiden sich von Versuchen mit Rüttelbetonen nur hinsichtlich des Einbauvorgangs. Außerdem wird die Frischbetonkonsistenz mit dem Setzfließmaßversuch nach DIN EN 12350-8 bestimmt. Beim Einfüllen des Betons in den Versuchsstand muss der SVB über ein Schalbrett fließen, um diesen zu entlüftet (siehe Abbildung 34).



Abbildung 34: Versuchskörper während des Einfüllen von SVB (links) und komplett gefüllt (rechts)

4.4.5 Versuchsergebnisse und Auswertung

Nachfolgende Tabelle enthält die Ergebnisse des Frischbetontests, die für jeden Versuch durchgeführt wurden.

		Ausbreitmaß		Rohdichte		Betonierhöhe	
Gr.	Versuch		Konsistenz	[kg/m³]		[cm]	
		loui		unverdichtet	verdichtet	1. Verd.	2. Verd.
	KV01	50	F4	2274	2366	61	64
4	KV02	41	F2	2171	2339	59	63
	KV03	55	F4	2329	2372	61	64
	KV04	70	SVB	2297	-	-	-
	KV05	40	F2	2210	-	58	-
2	KV06	53	F4	2275	2375	61	64
	KV07	69	SVB	2319	-	-	-
	KV08	38	F2	2066	2329	57	63
3	KV09	50	F4	2298	2348	61	64
	KV10	51	F4	2325	-	-	-
Λ	KV11	39	F2	2222	2360	59	64
-	KV12	52	F4	2272	2335	62	64
5	KV13	39	F2	2064	2197	60	63
5	KV14	51	F4	2116	2322	62	64
	KV15	40	F2	2262	2335	61	64
6	KV16	50	F4	2285	2357	62	64
	KV17	74	SVB	2354	-	-	-
7	KV18	-	-	-	-	-	-

Tabelle 10: Ergebnisse der Frischbetontests der Kleinversuchsreihe

Im Rahmen der Ergebnisdarstellung und Auswertung werden nur der unterste Messpunkt im Versuchsstand betrachtet. Die gemessenen Dehnungen in den Messgewindestangen werden über die Querschnittsflächen und den E-Modul in Kräfte umgerechnet.

Bei den folgenden Abbildungen werden die Versuchsergebnisse für eine bessere Übersichtlichkeit entsprechend der Frischbetonkonsistenz der verwendeten Betone farblich gekennzeichnet. Dabei wird die folgende Farbgebung gewählt:

 F2
 (rot)

 F4
 (blau)

 SVB
 (grün)

4.4.5.1 Druckkraftverläufe im untersten Messpunkt des Versuchsstands

Die Kurven von KV01, KV02 und KV03 weisen als Rüttelbetone den gleichen charakteristischen Verlauf auf (siehe Abbildung 35). Der Frischbetondruck steigt bei der Einfüllung treppenförmig an und steigt schlagartig während der Verdichtungen.



Abbildung 35: Druckkraftverläufe an der untersten Messstelle von Gruppe 1

Die Maximalwerte der horizontalen Frischbetondrücke vor und nach der Verdichtung sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Versuch	max. Kraft vor 1. Verdichtung [N]	max. Kraft nach 2. Verdichtung [N]	Mittelwert der max. Kraft bei Rüttelbeton [N]
KV01 (F4)	62,6	130,1	
KV02 (F2)	46,0	158,6	144,7
KV03 (F4)	k. A.	145,3	
KV04 (SVB)		96,4	

Tabelle 11: Maximale, horizontale Frischbetondruckkräfte der 1. Gruppe

In Anbetracht der Messgenauigkeit können die gemessenen Drücke der Rüttelbetone nach der 2. Verdichtung als in der gleichen Größenordnung liegend angesehen werden. Der Mittelwert liegt dabei bei 144,7 N. Bei den Versuchen KV02 und KV03 ist jeweils nach der Verdichtung ein Druckabfall, welcher sich durch eine negative Steigung in den Graphen äußert, festzustellen. Bei KV01 (Folie auf EPS) hingegen ist dieser Druckabfall nur leicht ausgeprägt.

Der selbstverdichtende Beton (KV04) unterscheidet sich zu den anderen Versuchen der Gruppe, da keine mechanische Verdichtung vorgenommen wird und somit keine schlagartigen Zuwächse der Druckkräfte zu beobachten sind. Der Maximalwert des horizontalen Frischbetondrucks liegt weit unter denen der Rüttelbetone. Der maximal gemessene, horizontale Frischbetondruck beträgt nur ca. zwei Drittel des Drucks bei Verwendung von Rüttelbeton.

Die maximalen auftretenden Kräfte vor dem ersten Verdichtungsvorgang sind bei der Verwendung eines Betons der Konsistenzklasse F4 um rund ein Drittel höher als bei der Verwendung von Beton der Konsistenzklasse F2.

Betrachtet man den Abfall der Kurven der Gruppe 1 nach Beenden der Verdichtung, so ist ein deutlich niedrigerer Abfall der Druckkräfte bei dem Versuch mit der auf die Dämmung aufgeklebte Folie (KV01) zu beobachten. Grund dafür ist möglicherweise die wasseraufnehmende Eigenschaft der EPS-Dämmung (siehe Kapitel 4.2). Durch das Aufkleben einer Folie wird eine Wasseraufnahme verhindert.



Abbildung 36: Druckkraftverläufe an der untersten Messstelle von Gruppe 2

Abbildung 36 zeigt den Kraftverlauf der Gruppe 2. Die Kurven dieser Gruppe verlaufen ähnlich zu denen der ersten Gruppe. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass die Druckkräfte in der zweiten Gruppe deutlich langsamer nach der Verdichtung abfallen, als die der Gruppe 1, da XPS kein Wasser aufnimmt. Bei Versuch KV06 treten während der Verdichtung deutlich höher Kräfte auf als bei Versuch KV05. Dies ist auf eine fehlerhafte Messung zurückzuführen, die auf eine Verkantung des Betonquaders zurückzuführen war.

In Tabelle 12 sind die Maximalwerte der horizontalen Frischbetondrücke der zweiten Gruppe vor und nach der Verdichtung zusammengestellt.

Versuch	max. Kraft vor 1. Verdichtung [N]	max. Kraft nach 2. Verdichtung [N]	Mittelwert der max. Kraft bei Rüttelbeton [N]	
KV05 (F2)	36,1	136,3	136.3	
KV06 (F4)	36,8	k. A.	150,5	
KV07 (SVB)			102,0	

Tabelle 12: Maximale, horizontale Frischbetondruckkräfte der 2. Gruppe

Der maximale, horizontale Frischbetondruck (bei Rüttelbetonen vor und nach der Verdichtung) weist bei der Verwendung eines Dämmstoffes aus EPS (1. Gruppe) und aus XPS (2. Gruppe) keine signifikanten Unterschiede auf. Die gemessenen Druckkräfte der Versuche liegen jeweils in der gleichen Größenordnung. Dies deutet darauf hin, dass das

Material des Dämmstoffes keine Auswirkungen auf den maximalen, horizontalen Frischbetondruck hat. Der langsamere Druckabfall nach Beendigung des Verdichtungsvorgangs bei der Verwendung von XPS gegenüber der Verwendung von EPS bestätigt die Annahme aus Gruppe 1, dass eine größere Wasseraufnahmefähigkeit der Dämmung zu einem schnelleren Abfall der Frischbetondruckkräfte führt, da sich die Steifigkeit des Betons ändert.



Abbildung 37: Druckkraftverläufe an der untersten Messstelle von Gruppe 3

In Abbildung 37 sind die Kraftverläufe in der höchstbelasteten Mess-Gewindestange der dritten Gruppe dargestellt. Da der Frischbeton in Versuch KV10 nicht die geforderten Eigenschaften von SVB aufweist, wird er in der Auswertung nicht weiter betrachtet. Die Messwerte dieser Gruppe zeigen nach dem Verdichten sowohl qualitativ, als auch quantitativ keine großen Unterschiede zu denen der ersten Gruppe. Auch der Abfall der Kurven nach dem Verdichten ist nahezu gleich groß.

Tabelle 13: Maximale	horizontale	Frischbetondr	uckkräfte	der 3	Grunne
		I IISCIIDEIOIIUI	uchriaite	uei J.	Gruppe

Versuch	max. Kraft vor 1. Verdichtung [N]	max. Kraft nach 2. Verdichtung [N]	Mittelwert der max. Kraft bei Rüttelbeton [N]
KV08 (F2)	24,7	160,9	152.0
KV09 (F4)	47,2	143,0	152,0

Die maximalen Druckkräfte liegen bei dieser Gruppe in der gleichen Größenordnung, wie in Gruppe 1 und Gruppe 2. Dies zeigt, dass weder die Art des Dämmstoffes, noch die Oberflächenbeschaffenheit der Begrenzungsflächen einen Einfluss auf den maximalen, horizontalen Frischbetondruck haben, solange noch kein Erstarren des Betons eingesetzt hat und bis zum Boden verdichtet wird.

Die maximalen Druckkräfte vor der ersten Verdichtung sind in dieser Versuchsreihe bei der Verwendung eines Betons der Konsistenzklasse F4 fast doppelt so groß, wie bei der Verwendung eines Betons der Konsistenzklasse F2. Des Weiteren deuten die insgesamt niedrigeren Kräfte vor dem Verdichten darauf hin, dass eine rauere Oberfläche der Begrenzungsflächen generell kleinere Druckkräfte vor der ersten Verdichtung zur Folge hat (größerer Wandreibungswinkel). Der Abfall der Kurven dieser Gruppe nach dem Verdichten ist beinahe identisch zu denen der ersten Versuchsreihe (ohne Folie). Dies bekräftigt die Annahme, dass eine höhere Wasseraufnahmefähigkeit der Dämmung einen größeren Abfall der Druckkräfte zur Folge hat. Auch die verzahnte Oberfläche erhöht diesen Effekt, da mehr Fläche zur Verfügung steht, um Wasser abzuziehen.



Abbildung 38: Druckkraftverläufe an der untersten Messstelle von Gruppe 4

Gruppe 4 stellt die Grenzwertbetrachtung einer beidseitig verzahnten Oberfläche dar. Der Verlauf der Kurven ist den Versuchen mit einer innen liegenden Dämmung sehr ähnlich. Die maximalen Druckkräfte liegen in der gleichen Größenordnung wie bei den anderen Versuchen mit Rüttelbeton.

	Tabelle 14: Maximale,	horizontale	Frischbetond	druckkräfte	der 4.	Gruppe
--	-----------------------	-------------	--------------	-------------	--------	--------

Versuch	max. Kraft vor 1. Verdichtung [N]	max. Kraft nach 2. Verdichtung [N]	Mittelwert der max. Kraft bei Rüttelbeton [N]
KV11 (F2)	37,6	145,7	144 5
KV12 (F4)	57,5	143,2	144,5

Die maximalen Werte des horizontalen Frischbetondrucks vor der ersten Verdichtung passen zu den Werten der vorgenannten Versuchsreihen. Auch hier ist der entstehende Druck vor der ersten Verdichtung bei der Verwendung eins Betons der Konsistenzklasse F4 deutlich größer als bei der Verwendung eines Betons der Konsistenzklasse F2.

Der Abfall der Kurven liegt bei dieser Gruppe in der gleichen Größenordnung, wie bei Versuchen, in denen ein Dämmstoff aus EPS verwendet wird. Das deutet darauf hin, dass nicht nur die Wasseraufnahmefähigkeit einer Dämmung, sondern auch die Oberflächenbeschaffenheit einen Einfluss auf den zeitlichen Druckabfall haben.



Abbildung 39: Druckkraftverläufe an der untersten Messstelle von Gruppe 5

Die zweite Grenzwertbetrachtung findet in Gruppe 5 statt, da bei den beiden Versuchen beidseitig eine schalglatte Oberfläche vorhanden ist. Die Maximalwerte der Versuche entsprechen den beiden Versuchen mit beidseitig verzahnter Oberfläche. Unterschiede zur Gruppe 4 sind jedoch sowohl bei den Maximalwerten der Druckkräfte vor der ersten Verdichtung, als auch bei dem Druckabfall nach dem Verdichten festzustellen. Die maximalen Druckkräfte vor der ersten Verdichtung sind in dieser Versuchsreihe erheblich höher als bei den zuvor beschriebenen. Grund dafür ist der geringere Wandreibungswinkel und damit eine größere horizontale Druckkomponente.

Versuch	max. Kraft vor 1. Verdichtung [N]	max. Kraft nach 2. Verdichtung [N]	Mittelwert der max. Kraft bei Rüttelbeton [N]
KV13 (F2)	58,6	143,2	1/1 0
KV14 (F4)	102,8	140,5	141,8

Es ist davon auszugehen, dass die Oberflächenbeschaffenheit sowie das Vorhandensein einer innen liegenden Dämmung keinen Einfluss auf den maximalen, horizontalen Frischbetondruck haben, solange der Frischbeton nicht beginnt zu erstarren und immer maximal tief verdichtet wird.

Ein zeitlicher Abfall der Druckkräfte ist in dieser Versuchsgruppe nach der Verdichtung, kaum zu beobachten. Die zuvor getroffene Annahme, dass die wasseraufnehmende

Eigenschaft eines verwendeten Dämmstoffs, sowie die Oberflächenrauigkeit einer Begrenzungsfläche einen Einfluss auf den zeitlichen Druckabfall haben, trifft demnach zu.



Abbildung 40: Druckkraftverläufe an der untersten Messstelle von Gruppe 6

Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse von Gruppe 6. Die Versuche dieser Gruppe unterscheiden sich von denen der ersten Gruppe nur dadurch, dass hier ein Ortbetonspalt der doppelten Breite, also 160 mm, eingestellt wurde. Die Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf auf, die Maximalwerte der Rüttelbetone sind jedoch etwas niedriger (siehe Tabelle 16). Wie bei allen anderen Versuchen liegt auch hier die maximal auftretende Kraft infolge des SVBs knapp unter 100 N.

Versuch	max. Kraft vor 1. Verdichtung [N]	max. Kraft nach 2. Verdichtung [N]	Mittelwert der max. Kraft bei Rüttelbeton [N]
KV15 (F2)	45,4	112,8	116.2
KV16 (F4)	46,9	119,6	110,2
KV17 (SVB)			92,1

Tabelle	16: Maximale.	horizontale	Frischbetond	Iruckkräfte	der 6.	Gruppe
	,					

Die maximalen Druckkräfte bei der Verwendung von Rüttelbetonen dieser Gruppe liegen im Schnitt 20% unter den anderen Gruppen. Dies deutet darauf hin, dass ein größerer Ortbetonspalt bei der Verwendung von Rüttelbetonen geringere maximale horizontale Frischbetondrücke zur Folge hat. Bei der Verwendung von SVB lassen sich keine Unterschiede zu den vorherigen Versuchsreihen feststellen.

Im Hinblick auf die maximalen Druckkräfte vor der ersten Verdichtung, liegen die gemessenen Kräfte wiederum in der gleichen Größenordnung wie bei den vorherigen Versuchsgruppen.

Der Abfall der drei Kurven dieser Gruppe verläuft etwas flacher als der anderen Versuche mit EPS-Dämmung.

4.4.5.2 Verteilung des Frischbetondrucks über die Höhe des Versuchsstandes

Nachfolgende Abbildung 41 zeigt die Verteilung des Frischbetondrucks über die Höhe des Versuchsstandes. Betrachtet werden hierbei die Versuche mit den selbstverdichtenden Betonen und den Betonen der Konsistenzklasse F2. Zum Vergleich ist die hydrostatische Druckverteilung (charakteristisch) nach DIN 18218 dargestellt



Abbildung 41: Verteilung des Frischbetondrucks über die Höhe des Versuchsstandes für die selbstverdichtenden Betone und die Betone der Konsistenzklasse F2 während der Verdichtung

Die Abbildung zeigt deutlich für alle Versuche eine lineare Druckverteilung über die Höhe. Bei den SVBs liegt die Druckkurve leicht unter dem hydrostatischen Verlauf. Dies entspricht sinngemäß der Tatsache, dass der SVB nicht verdichtet und somit nicht vollständig verflüssigt wird. Bei den Rüttelbetonen tritt das Gegenteil ein. Die Drucklinien liegen oberhalb des hydrostatischen Druckverlaufs.

4.4.6 Zusammenfassung

Maximale Druckkräfte während der Verdichtung

Wie schon in Kapitel 4.3 festgestellt hat die Oberflächenbeschaffenheit und Steifigkeit eines innen liegenden Dämmstoffs sowie die Konsistenzklasse des Betons (Rüttelbetone) keinen Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck in Sandwichwänden, solange das Erstarren des Betons noch nicht eingetreten ist und bis zum Boden verdichtet wird. Der maximal gemessene Druck beträgt bei einer Ortbetondicke von 80 mm im Schnitt ca. 143,8 N. Die Schwankungen des maximal gemessenen Drucks liegen dabei innerhalb der Messtoleranzen. Bei den Versuchen mit einer Ortbetondicke von 160 mm konnte im Schnitt ein Druck von ca. 116,2 N gemessen werden, was einer Differenz von 20 % entspricht.

Beim Einsatz von SVB entstehen grundsätzlich niedrigere Frischbetondrücke, welche unabhängig von Geometrie- und Materialparametern der Sandwichwand sind. Der gemessene Druck in den Versuchen schwank dabei kaum und liegt im Mittel bei 96,8 N. Im

Vergleich zu Rüttelbetonen und einer Ortbetondicke von 80 mm sind dies nur ca. zwei Drittel und damit bedeutend weniger.

Zeitlicher Abfall der Druckkräfte nach der Verdichtung

Im Gegensatz zum maximalen Frischbetondruck beeinflussen die variierten Parameter den Abfall des Frischbetondrucks nach den Verdichtungsvorgängen. Die Höhe des Druckabfalls ist dabei von der Wasseraufnahmefähigkeit der innen liegenden Dämmung und der Rauigkeit der innen liegenden Betonoberfläche abhängig. Beim Verdichtungsvorgang dringt durch die Oberflächenstruktur von EPS Wasser ein. Dies führt dazu, dass der Frischbeton im Ortbetonspalt unmittelbar nach der Verdichtung steifer ist als vor der Verdichtung. Der Wasserentzug führt zu einem schnellen Abfall des Drucks. Wird wie in Versuch KV01 eine Folie auf die EPS-Dämmung geklebt, so fällt der Druckabfall geringer und verzögert aus. Bei Einsatz von XPS, welches kein Wasser aufnimmt, ist der Druckabfall viel geringer ausgeprägt als bei EPS. Auch bei einer größeren Ortbetondicke in Gruppe 6 findet im Vergleich zu den anderen Gruppen mit EPS Dämmung ein langsamerer Abfall des Drucks statt.

Bei den beiden Grenzwertbetrachtungen in Gruppe 4 und 5 konnte der Einfluss der angrenzenden Oberflächenbeschaffenheit auf den Druckabfall nach der Verdichtung beobachtet werden. Werden zwei verzahnte Betonoberflächen gegenübergestellt, so findet ein hoher Druckabfall statt, da die Oberfläche viel größer ist und damit mehr Wasser aufnehmen kann. Beim Einsatz von beidseitig schalglatter Oberfläche kann genau das Gegenteil beobachtet werden. Der Druck in der Sandwichwand fällt nach dem Verdichten sehr langsam ab.

Druckkraftverläufe über die Höhe während der Verdichtung

Bei der Verwendung von selbstverdichtendem Beton liegt die Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung bei niedrigen Betonierhöhen auf der sicheren Seite. Grund dafür ist die fehlende Verdichtungswirkung einer Rüttelflasche, die zu einer Verflüssigung des Betons und damit zu einer Druckerhöhung führt.

Beim Einsatz von Rüttelbetonen ist dies nicht ganz der Fall. Durch die Verdichtungswirkung findet eine vollständige Verflüssigung des Betons statt. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Versuchsstandes und der Energieeinwirkung der Rüttelflasche kommt es sogar zu höheren Drücken als der hydrostatische Druck. Die gleiche Beobachtung wurde bereits im Rahmen der Großversuchsreihe (siehe Kapitel 4.3.3.4) gemacht.

4.5 Versuchsreihe unter praxisnahen Bedingungen

Im Rahmen der bereits durchgeführten Versuche (siehe Kapitel 4.3 und 4.4) konnte gezeigt werden, dass bei vollständiger Verdichtung des Betons über die gesamte Höhe und vor Eintritt des Erstarrungsbeginns des Betons Einflussfaktoren wie die Art der Dämmung, die Oberflächenrauigkeiten oder die Dicke der Ortbetonschicht sowie die Konsistenz auf den Frischbetondruck keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf den maximalen, horizontalen Frischbetondruck haben. In einer letzten Versuchsreihe wird deshalb der Betonierdruck unter praxisnahen Bedingungen an hohen Sandwichwänden unter Berücksichtigung der Erstarrung und der Verdichtungsart des Betons untersucht.

4.5.1 Versuchsprogramm

In dieser Versuchsreihe werden drei Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung mit einer Höhe von 400 cm getestet.

Die Bezeichnung der praxisnahen Versuche findet nach folgendem Schema statt:

A-B-C-D-E (z.B. PV01-100-EPS-F4-R)

- Mit A Nummer des Großversuchs
 - B Dicke der Ortbetonschicht in mm
 - C Art des Dämmstoffs (S für schalglatte Oberfläche (keine Dämmung))
 - D Konsistenzklasse des Frischbetons
 - E Oberflächenbeschaffenheit der FT-Tragschale (R = rau, S = schalglatte Oberfläche)

Versuch	Ortbetondicke [mm]	Dämmstoff (60mm)	Konsistenz- klasse	Oberfläche Beton
PV01-100-EPS-F4-R	100	EPS	F4	rau
PV02-100-XPS-F4-R	100	XPS	F4	rau
PV03-100-S-F4-S	100	glatte Schalung*)	F4	glatte Schalung*)
*) die angrenzenden Oberflächen bestehen nicht aus Dämmung und Beton, sondern aus				
glatter Schalung				

Tabelle 17: Versuchsprogramm der Versuche unter praxisnahen Bedingungen

Im direkten Vergleich stehen dabei zwei baugleiche Wände PV01 und PV02, die sich nur in der Art der Dämmung unterscheiden. Zum einen werden ein weicher EPS und zum anderen ein steifer XPS als Dämmstoff eingesetzt. Als Referenz wurde eine dritte Wand PV03 mit beidseitig innen liegender, glatter Schalung hergestellt. Dieser Versuch soll den Grenzwert zu PV01 und PV02 und gleichzeitig zur DIN 18218 darstellen. Geometrie und Aufbau der Versuchskörper ist in Abbildung 42 dargestellt.



Abbildung 42: Geometrie und Aufbau der praxisnahen Versuchskörper (links PV01, mitte PV02, rechts PV03)

Die Dicke der FT-Vorsatzschale und FT-Tragschale beträgt bei allen drei Versuchskörpern 60 mm. Jede Schale ist lediglich mit einer Betonstahlmatte Q188 als Mindestbewehrung bewehrt. Die Breite der Versuchskörper beträgt 80 cm. Als Verbindungsmittel in den Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung werden Stäbe aus GFK verwendet. Das Verbindungsmittelraster ist konstant mit 40x40 cm und einem Randabstand von 20 cm festgelegt. So ergeben sich zwei nebeneinander liegende Verbindungsmittelreihen mit jeweils 10 Stäben.

4.5.2 Messtechnik

Der Frischbetondruck in den Sandwichwänden wird auch in dieser Versuchsreihe mithilfe von auf die GFK-Verbindungsmittel geklebten Dehnmessstreifen gemessen (siehe Kapitel 3.1). In jeden Versuchskörper werden insgesamt 19 DMS angebracht. Auf acht Stäbe einer Verbindungsmittelreihe werden je zwei DMS doppelseitig appliziert (siehe Abbildung 43, "rot"). Grund für die doppelseitige Applikation ist, dass die Verbindungsmittel beim Ausbetonieren nicht exakt unter zentrischem Zug beansprucht werden. Aus den Dehnungswerten der beiden DMS kann dann ein Mittelwert errechnet werden. Damit bei einem technischen Ausfall eines DMS ausreichend Messwerte zur Verfügung stehen, werden auf die drei untersten Stäbe der anderen Verbindungsmittelreihe zusätzlich einseitig je ein DMS geklebt (siehe Abbildung 43, "grün"). Alle weiteren Stäbe werden nicht mit DMS versehen (siehe Abbildung 43, "schwarz").



Abbildung 43: Anordnung der Dehnmessstreifen in den Versuchskörpern

Die DMS wurden gemäß Kapitel 3.1 auf die Verbindungsmittel appliziert. D.h. neben einer doppelten Schutzschicht mit Polyurethanlack (PU140) wurden die DMS mit einem zähen Kitt auf Silikonbasis abgedeckt. Dieser schützt den DMS optimal vor Stößen durch herabfallenden Frischbeton und dem Eindringen der Betonschlempe während des Ausbetonierens der Wand. Um das an den DMS angelötete Kabel zu schützen, wurde dieses zusätzlich mit einem roten Schutzschlauch umhüllt (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44: GFK-Verbindungsmittel mit aufgeklebten DMS und Abdeckmittel auf Silikonbasis

Neben den 19 DMS wurde in jeder Wand ein zusätzlicher Kompensations-DMS angeordnet (siehe Abbildung 45). Dieser befindet sich in der Wand im unbelasteten Zustand und misst ausschließlich die Dehnungen infolge Temperaturänderungen. Bei der Auswertung der

Ergebnisse müssen diese Temperaturdehnungen von den gemessenen Dehnungen der belasteten Verbindungsmittel subtrahiert werden.



Abbildung 45: Kompensations-DMS auf Verbindungsmittel; mit Kabelbindern befestigt

4.5.3 Versuchsaufbau

Die Sandwichwände werden aufgrund der Bauteilhöhe von 400 cm durch ein Deckenloch auf die Bodenplatte des Kellergeschosses aufgestellt. Somit ist es möglich vom Erdgeschoss aus den Beton in die Wände einzufüllen.



Abbildung 46: Sandwichwand beim Einheben in die Deckenöffnung (links); Auf Schalbrett aufgestellte und vertikal ausgerichtete Sandwichwand (rechts)

Die Sandwichwände werden auf eine Schalplatte als Unterlage aufgestellt und exakt vertikal ausgerichtet. Anschließend werden seitlich aus den Wänden die Anschlusskabel der DMS

herausgeführt und die Wände mit Schaumstoff-Fugenband abgedichtet (siehe Abbildung 47, links). Dieses soll das Auslaufen der Betonschlempe beim Ausbetonieren verhindern. Anschließend wurden die Sandwichwände seitlich mit Brettern verschalt und mit Gewindestangen verspannt (siehe Abbildung 47, rechts).



Abbildung 47: Seitlich abgedichtete Sandwichwand (links); Fertig eingeschalte Sandwichwände (rechts)



Abbildung 48: Eingeschalte Sandwichwände vor der Versuchsdurchführung (links PV01, mitte PV02, rechts PV03); Sicht von oben

Nachdem die Sandwichwände aufgestellt und eingeschalt sind, werden die Stahl-Transportanker in der Dämmstoff- bzw. Holzebene durchtrennt. Grund dafür ist der Einfluss des Transportankers auf das statische System des Sandwichelements, wodurch auch der Frischbetondruck beeinflusst wird. Hierbei ist wichtig, dass der Transportanker nicht in der Ortbetonschicht durchtrennt wird. Bei Erhärten des Betons würde dann wieder der Verbund zwischen Stahl und Beton zu einer Kraftübertragung zwischen den beiden FT-Betonschalen führen.

4.5.4 Versuchsdurchführung

In diesen Versuchen wird jede Wand mit den exakt gleichen Randbedingungen nach einem festen Zeitplan ausbetoniert, um eine Betonage zu simulieren. Gleichzeitig werden die entstehenden Frischbetondrücke gemessen:

- Ausbetonieren der Wände in 8 Chargen zur je 40 I (ca. 50 cm Höhe)
- Sicherstellung der gleichen Konsistenzklasse (F4) für alle Chargen
- Einhalten der gleichen Verdichtungstiefe für alle Chargen

Durch die hohe Betonierhöhe wird während der Betonage die Erstarrung des Betons eintreten. Da der einzige Variationsparameter der Dämmstofftyp bzw. die Eigenschaften der an den Frischbeton angrenzenden Oberflächen ist, kann deren Einfluss auf den Frischbetondruck direkt untersucht werden. Für alle drei Wände wurde die gleiche Betonrezeptur verwendet (siehe Tabelle 18).

Tabelle	18:	Betonrezeptur	für die	Versuche	unter	praxisnahen	Bedingungen
		Determonepren	iai aio			praxionanon	_oamgangon

Stoff	Menge [kg/m³]
Wasser	220,0
Zement CEM 32,5 R	315,0
Zuschlag 0/2	724,0
Zuschlag 2/8	586,0
Zuschlag 8/16	530

Der Beton kann in die Druckfestigkeitsklasse C25/30 eingeteilt werden und besitzt ein Größtkorn von 16 mm (Sieblinie B) und einen w/z-Wert von 0,70. Für den verwendeten Beton kann eine Rohdichte von 23 kg/m³, ein Erstarrungsbeginn t_B von 2,0 h und ein Erstarrungsende t_E (Knetbeuteltest, siehe Tabelle 19) von 6,25 h ermittelt werden.

Tabelle 19: Knetbeuteltest

Zeit	Konsistenz	Beschreibung
0:00	flüssig	-
0:30	flüssig	-
1:00	weich	-
1:30	weich	-
2:00	plastisch	Erstarrungsbeginn
2:30	plastisch	-
3:00	steif	-
3:30	steif	-
4:00	halbfest	-
4:30	halbfest	-
5:00	erstarrt	Erstarrungsende

 t_{E} = 1,25 * $t_{E, Knet}$ =1,25*5,0 = 6,25h

Um eine gleichbleibende Konsistenz des Betons zu gewährleisten, wurde für jede Betoncharge das Ausbreitmaß ermittelt (siehe Abbildung 49, links). Nach Prüfung der

Konsistenz des Betons wurde er über einen Trichter in acht Chargen in das Sandwichelement gefüllt (siehe Abbildung 49, rechts). Der Trichter wurde verwendet, um die Fallhöhe des Frischbetons zu begrenzen und dadurch ein Entmischen des Betons zu verhindern. Bei den Verdichtungsvorgängen wurde sichergestellt, dass bei allen Wänden immer gleich tief verdichtet wurde, damit die maximal auftretenden Frischbetondrücke vergleichbar sind. Dabei wird die zu verdichtende Betonschicht inklusive 15 cm bis 20 cm der vorherigen, bereits verdichteten Schicht, verdichtet. Dadurch wird eine gute Verbindung zwischen den einzelnen Schichten gewährleistet.



Abbildung 49: Ermittlung der Konsistenzklasse mit einem Ausbreitmaßtisch (links); Einfüllen einer Betoncharge mit einem Trichter (rechts)

Nach jeder Betoncharge wird nach Verdichtung des Betons die aktuelle Betonierhöhe gemessen, um eine Nachrechnung des Frischbetondrucks zu ermöglichen. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Chargen beträgt 20 min, sodass eine Betonierdauer von ca. 2,5 h und damit eine Betoniergeschwindigkeit von 1,6 m/h erreicht wird.



Abbildung 50: Verdichtungsvorgang (links); Messen der Betonierhöhe nach dem Verdichten (rechts) Abbildung 51 zeigt die drei fertig ausbetonierten Sandwichwände nach dem Erhärten des Betons.



Abbildung 51: Fertig ausbetonierte und erhärtete Sandwichwände

4.5.5 Versuchsergebnisse und Auswertung

Auch in dieser Versuchsreihe wurden bei der Auswertung der Ergebnisse die gemessenen Dehnungen unter Verwendung eines Elastizitätsmoduls der GFK-Verbindungsmittel von 60.000 N/mm² in Kräfte umgerechnet.

4.5.5.1 Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln während der Durchführung der drei Versuche.



Abbildung 52: Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln bei Versuch PV01

Abbildung 52 zeigt die Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln der Sandwichwand mit EPS-Dämmung. Während den acht Verdichtungsvorgängen ist ein deutlicher Anstieg der Kraft in den Verbindungsmitteln zu beobachten. Grund dafür ist die Verflüssigung der Betons beim Verdichten. Direkt nach Beenden des Verdichtungsvorgangs fällt der Druck in den Wänden wieder recht schnell auf ein konstantes Niveau ab. Der maximale Frischbetondruck von 5,3 kN wird im untersten Verbindungsmittel (DMS 1) bei der 3. Verdichtung (Betonierhöhe von 150 cm) erreicht. Ab dem fünften Verdichtungsvorgang (einer Betonierhöhe von 250 cm) erfährt das unterste Verbindungsmittel fast keine Druckänderung mehr und verbleibt bei ca. 2,0 kN.

Bei Versuch PV02 gibt es sowohl qualitativ, als auch quantitativ, bis zu einer Betonierhöhe von ca. 150 cm keine großen Unterschiede zu PV01 (siehe Abbildung 53). Ab der 4. Verdichtung gibt es jedoch signifikante Unterschiede zwischen dem Einsatz von EPS und XPS. Der Frischbetondruck im untersten Verbindungsmittel steigt weiter an und erreicht bei der 5. Verdichtung und eine Betonierhöhe von 250 cm sein Maximum von 8,0 kN. Auffällig ist, dass das unterste Verbindungsmittel selbst beim letzten Verdichtungsvorgang noch eine Druckänderung erfährt, obwohl der Abstand zwischen Verbindungsmittel und Rüttelflasche mehr als 3,0 m beträgt. Der Druck nach den Verdichtungsvorgängen fällt bei PV02 auch viel langsamer ab.



Abbildung 53: Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln bei Versuch PV02

PV03 (siehe Abbildung 54) stellt den Grenzfall mit beidseitig innen liegender Schalung dar. Auch bei diesem Versuch gibt es bei den ersten drei Verdichtungsvorgängen im Vergleich zu PV01 und PV02 kaum einen Unterschied. Der maximale Frischbetondruck im untersten Verbindungsmittel wird auch hier bei der 5. Verdichtung mit 8,6 kN erreicht. Der maximale Frischbetondruck wird mit 9,3 kN erst bei der letzten Verdichtung in DMS 4 gemessen.



Abbildung 54: Kraftverläufe in den Verbindungsmitteln bei Versuch PV03

Bei diesem Versuch fällt der Druck nach den Verdichtungsvorgängen ähnlich schnell wie bei Versuch PV02 ab.

Zwischen den drei Versuchen ist ein deutlicher Unterschied im Kraftverlauf zu beobachten. Bei Versuch PV03 (innen liegende Schalung) entstehen mit Abstand die größten, bei Versuch PV01 die kleinsten Drücke im Sandwichelement. Ein nennenswerter Unterschied im Druckverlauf ist erst ab dem 4. Verdichtungsvorgang, d.h. einem Füllstand von 200 cm, zu erkennen. In welcher Höhe der maximale Frischbetondruck bei den jeweiligen Verdichtungsvorgängen entsteht, ist ebenfalls vom innen liegenden Material der Sandwichwand abhängig. Um genauere Aussagen hierüber treffen zu können, wird im Folgenden die Verteilung des Frischbetondrucks über die Höhe des Bauteils dargestellt.

4.5.5.2 Kraftverlauf über die Höhe während den Verdichtungsvorgängen

Auch in der Darstellung des Drucks über die Bauteilhöhe ist zu erkennen, dass im untersten Verbindungsmittel der höchste Druck von 5,3 kN bei der 3. Verdichtung entsteht. Dieser ist deutlich höher als die nachfolgend gemessenen Drücke. Bei den nachfolgenden Verdichtungsvorgängen schwankt der maximale Druck nur noch zwischen 3,0 kN und 3,7 kN. Der Abstand zwischen der Eintauchtiefe der Rüttelflasche und des Orts des maximalen Drucks liegt hierbei immer unter 60 cm. Auffällig ist ein charakteristischer Knick im Druckverlauf bei einer Höhe von 60 cm.



Abbildung 55: Verteilung des Frischbetondrucks bei Versuch PV01

Dieser Knick ist auch bei Versuch PV02 (siehe Abbildung 56) zu beobachten. Der maximale Druck von 8,0 kN entsteht hier bei der 5. Verdichtung ebenfalls im untersten Verbindungsmittel. Bei Einsatz einer innen liegenden XPS Dämmung ist der Abstand zwischen Rütteltiefe und Ort des maximalen Drucks höher als beim Einsatz von EPS Dämmung und liegt zwischen 100 cm und 120 cm.



Abbildung 56: Verteilung des Frischbetondrucks bei Versuch PV02

Zuletzt ist in Abbildung 57 der Versuch mit innen liegender schalglatter Oberfläche dargestellt.



Abbildung 57: Verteilung des Frischbetondrucks bei Versuch PV03

Auffällig ist, dass sich hier bis zur 6. Verdichtung bzw. einer Betonierhöhe von 300 cm ein nahezu linearer Druckverlauf im Bauteil einstellt. Einen Knick bei einer Höhe von 60 cm stellt sich hier noch nicht ein. Der maximale Frischbetondruck von 9,3 kN wird erst beim letzten

Verdichtungsvorgang in einer Höhe von 140 cm erreicht. Der Abstand zwischen Ort des maximalen Drucks und Tiefe der Verdichtung ist hier noch höher und beträgt im Schnitt ca. 180 cm.

Auffällig bei allen drei Versuchen ist, dass die Druckverläufe bei den ersten drei Verdichtungsvorgängen tatsächlich keine großen Unterschiede aufweisen (siehe Pahn (2011)). In diesem Bereich gibt es keine Unterschiede in der Tiefenwirkung der Rüttelflasche, da die Betonierhöhe zu gering ist. Das Gleiche ist bei vollem Füllstand zu beobachten. Bei den letzten drei Verdichtungsvorgängen (6., 7. und 8. Verdichtung) ist die gemessene Beanspruchung im obersten Verbindungsmittel immer in der gleichen Größenordnung (DMS8 \approx 3,0 kN; DMS7 \approx 1,5 kN; DMS6 \approx 0,2 kN).

Betrachtet man die Summe aller Kräfte über die Höhe für jeden Verdichtungsvorgang, so erhält man die Werte nach Tabelle 20.

	PV01	PV02	PV03
	kN	kN	kN
1. Verdichtung	0,76	1,29	1,64
2. Verdichtung	4,24	4,28	5,73
3. Verdichtung	9,83	8,99	11,41
4. Verdichtung	10,99	16,13	18,67
5. Verdichtung	11,80	23,71	27,21
6. Verdichtung	12,21	28,91	35,88
7. Verdichtung	12,65	32,77	41,03
8. Verdichtung	11,33	28,94	49,00

Tabelle 20: Summe der Verbindungsmittelkräfte für alle Verdichtungsvorgänge

Es ist ersichtlich, dass die Summe der Verbindungsmittelkräfte bei den ersten drei Verdichtungsvorgängen sich ungefähr auf einem Level bewegen. Erst ab der 4. Verdichtung nimmt ein innen liegendes Material einen Einfluss auf den Frischbetondruck. Beim letzten Verdichtungsvorgang verdoppelt sich die Summe zwischen PV01 und PV02, zwischen PV01 und PV03 vervierfacht sich die Summe sogar.

5 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen (DIN 18218)

5.1 Theoretische Grundlagen zur DIN 18218

Das Thema des Frischbetondrucks ist ein sehr komplexes und schwierig zu erfassendes Forschungsgebiet. Das in Kapitel 2.3 beschriebene Verfahren nach DIN 18218 (2010) zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks basiert auf viele Voruntersuchungen und stellt eine einfach handzuhabende und konservative Lösung da. Die Entstehung der DIN 18218 basiert hauptsächlich auf Erkenntnisse von Manfred Specht und wird in Specht (1981) detailliert beschrieben. Grundlage ist ein bodenmechanischer Ansatz mit Berücksichtigung der Erstarrung des Betons.

Während der Betonage eines Betonbauteils kann zwischen zwei Zuständen unterschieden werden; der Zustand während der Verdichtung und nach der Verdichtung des Betons. Eine verdichtete Betonschicht baut einen gewissen Druck über die Schalungshöhe auf. Wie hoch dieser Druck ist, hängt unmittelbar von der Konsistenz und gleichzeitig vom bodenmechanischen Seitendruckbeiwert λ_0 des Betons ab. Laut Specht (1981) ist λ_0 direkt abhängig von dem Wassergehalt bzw. der Konsistenz des Betons.

Der Seitendruckbeiwert zum Zeitpunkt Null nimmt mit Erstarrung des Betons zunehmend ab, bis die Erstarrung des Betons eintritt. Dann wird der Beiwert zu Null. Deshalb ist der Druckverlauf über die Höhe nicht geradlinig sondern gekrümmt. Der zeitliche Verlauf des Seitendruckbeiwerts kann als lineare Funktion beschrieben werden (siehe Abbildung 58):

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E - t}{t_E - t_r}\right) = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_E}\right) \tag{3}$$

λ₀ Seitendruckbeiwert zum Zeitpunkt Null

r, Zeit zum Einbringen einer Betonschicht

t_E Erstarrungszeit des Frischbetons



Abbildung 58: Zeitliche Abnahme des Seitendruckbeiwerts λ bei Erstarrung des Betons

Der Zuwachs des horizontalen Frischbetondruck $d\sigma_h$ im Zeitintervall dt beträgt demnach:

$$d\sigma_h = \gamma_C \cdot \upsilon \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E - t}{t_E - t_r}\right) \cdot dt \tag{4}$$

 γ_{C} Rohwichte des Betons

v Betoniergeschwindigkeit

(c)

Durch zeitliche Integration ergibt sich bei einer Betoniergeschwindigkeit von v und einer Betonierhöhe h ein horizontaler Frischbetondruck von (ohne Verdichtung, siehe Abbildung 59 a)):

$$\sigma_h(h) = \gamma_C \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E \cdot h}{v \cdot (t_E - t_r)} - \frac{h^2}{2 \cdot v^2 \cdot (t_E - t_r)} + C\right)$$
(5)

C Integrationskonstante

Sobald der Beton verdichtet wird, wirkt unabhängig von der Frischbetonkonsistenz und damit dem Seitendruckbeiwert ein hydrostatischer Druck bis zum Punkt der Rütteltiefe. Grund dafür ist, dass bei der Verdichtung die Viskosität des "Schmiermittels des Betons" (Zement und Wasser) zu Null wird (siehe Abbildung 59 b)). Je steifer die Konsistenz des Betons ist, desto höher fällt der Drucksprung in der Hohe h_r aus. Da die Verdichtung räumlich gesehen jedoch einen größeren Wirkungsbereich hat, wird der Druckzuschlag infolge Verdichtung des Betons über die gesamte Betonierhöhe angenommen (siehe Abbildung 59 c)). Vor allem bei sehr hohen Betonierhöhen ist dies eine sehr konservative Annahme, da der Einfluss nach unten hin je nach Randbedingungen stark abfällt.



Abbildung 59: Entwicklung des Frischbetondrucks über die Bauteilhöhe (Grundlage der DIN 18218)

Nach der oben beschriebenen Theorie stellt sich demnach ein hydrostatischer Druckverlauf bis zur Rütteltiefe h_r ein (0 < h < h_r):

$$\sigma_{h1}(h) = \gamma_C \cdot h \tag{6}$$

Von diesem Punkt schließt sich der Druckverlauf nach Gleichung (5) an. Der in Abbildung 59 c) schraffierte Rütteleinfluss stellt die dynamische Tiefenwirkung der Rüttelflasche dar und kann durch die Integrationskonstante C beschrieben werden. Für den horizontalen Frischbetondruck in größeren Tiefen als h_r gilt demnach ($h_r \le h \le h_E$):

$$\sigma_{h2}(h) = h_r \cdot \gamma_C + \gamma_C \cdot \nu \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E \cdot (h - h_r)}{\nu \cdot (t_E - t_r)} - \frac{h^2 - h_r^2}{2 \cdot \nu^2 \cdot (t_E - t_r)}\right)$$
(7)

Das Maximum des horizontalen Frischbetondrucks tritt bei Erstarrungsbeginn des Betons in der Höhe h_E ein und ergibt sich zu:

$$max. \sigma_h = \gamma_C \cdot \nu \cdot \lambda_0 \cdot \left(\frac{t_E}{2} + \frac{t_r^2}{2 \cdot t_E} + \frac{t_r}{\lambda_0} - t_r\right)$$
(8)

Dieser maximale Druck wird vereinfacht als konstant über die Schalungshöhe bis zur hydrostatischen Druckhöhe h_s angenommen, woraus eine Verteilung des Frischbetondrucks nach DIN 18218 (siehe Abbildung 3) entsteht.

5.2 Überlegungen zu Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung

DIN 18218 basiert auf eine Rütteltiefe von 90 cm. Diese ist im Rahmen der Normentwicklung festgelegt worden. Zur Nachrechnung der eigens durchgeführten Großversuche aus Kapitel 4.5 sind die in der Norm gegebenen Berechnungsformeln demnach nicht anwendbar. Zudem liegt die Annahme eines konstanten Druckverlaufs unterhalb der hydrostatischen Druckhöhe zu sehr auf der sicheren Seite.

Ein weiterer, interessanter Aspekt für die Analyse der eigens durchgeführten Versuche ist die bereits von Specht angesprochene "Wasseraufnahmefähigkeit der Schalungsoberfläche". Da bei Wasserentzug vom Beton weniger "Schmiermittel" zur Verfügung steht und somit eine höhere Viskosität entsteht, wird auch der Frischbetondruck geringer. Die Versuche in Kapitel 4.2 haben deutlich gezeigt, dass eine Wärmedämmung aus EPS beim Verdichtungsvorgang eine gewisse Menge Wasser aufnimmt d.h. gleichzeitig dem Frischbeton Wasser entzogen wird. Durch den Wasserentzug stellt sich eine steifere Konsistenz des Betons ein und der Seitendruckbeiwert sinkt.

Ein Wasserentzug vom Beton hat nicht nur eine Änderung der Konsistenzklasse zur Folge. Durch den geringeren Wassergehalt schrumpft auch der Wirkungsbereich der Rütteleinwirkung. Dieser Effekt kann sehr gut im Rahmen der Auswertung der Versuchsergebnisse in Kapitel 4.5.5 gezeigt werden. Die Distanz zwischen Ort der Rüttelflasche und Ort des maximalen Frischbetondrucks beträgt beim Einsatz von EPS weniger als 60 cm, beim Einsatz von XPS zwischen 100 cm und 120 cm und bei schalglatten Holztafeln sogar bis zu 190 cm. Die allgemeine Umsetzung dieses Modellgedankens ist jedoch noch problematisch, da der Wirkungsbereich des Rüttlers in Abhängigkeit der Konsistenzklasse des Betons nicht bekannt ist.

5.3 Effektiver Seitendruckbeiwert λ_0

Die Definition des "richtigen" Seitendruckbeiwertes für die jeweilige Konsistenzklasse hat mehrere Ansätze, da dieser auch von der Steifigkeit der Schalung bzw. in der Bodenmechanik beispielsweise von der Nachgiebigkeit einer mit Erdreich angeschütteten Stützmauer abhängig ist.

Specht ermittelte im Jahr 1973 für die einzelnen Konsistenzen von Frischbetons relativ hohe Seitendruckbeiwerte (siehe Abbildung 60, links). Die gemessenen Werte gelten für eine quasi starre Schalung. In Forschungsarbeiten von Uspenskij (1965) und Hoffmann (1943) konnte bereits herausgefunden werden, dass der Frischbetondruck bei nachgiebiger Schalung geringer ist als bei einer steifen Schalung. Für eine herkömmliche, nachgiebige Schalung kann demnach zwischen einem Wassergehalt von 150 l/m³ und 300 l/m³ ein geradliniger Verlauf angenommen werden.

Im Rahmen der Entstehung der DIN 18218 haben sich die Annahmen zum Zusammenhang zwischen Wassergehalt des Betons und Seitendruckbeiwert etwas verändert (siehe Abbildung 60, rechts). Diese zeigt ebenfalls den linearen Verlauf für eine praktisch nachgiebige Schalung. Zusätzlich ist ein weiterer Verlauf dargestellt, der für den Aufbau von DIN 18218 genutzt wird.



Abbildung 60: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Seitendruckbeiwert (Links: Specht (1973); Rechts: Specht (1981))

Die geringen Seitendruckbeiwerte in der DIN 18218 im Vergleich zu den gemessenen Werten aus dem Jahr 1973 resultieren aus der Konservativität des Modells zur DIN 18218 (siehe Kapitel 5.1) und der Nichtberücksichtigung des Reibungseinfluss zwischen Beton und Schalung im Modell (Proske, 2007).

Abbildung 61 beinhaltet das Verhältnis zwischen Wassergehalt des Frischbetons und dem Seitendruckbeiwert λ_0 für die Berechnung nach DIN 18218.



Abbildung 61: Zusammenhang zwischen der Konsistenz und dem Seitendruckbeiwerts eines Frischbetons

Die Abbildung beinhaltet noch die alten Bezeichnungen für die Konsistenz. Hierbei gilt:

K1 (alt)	F1
K2 (alt)	F2
K3 (alt)	F3
Fließbeton (alt)	F4

Der Beton für die Versuchsreihe unter praxisnahen Bedingungen kann demnach theoretisch in die Konsistenzklasse F4 eingeordnet werden und hätte somit nach DIN 18218 einen Seitendruckbeiwert von 0,27.

DIN 18218 hat den Geltungsbereich einer nachgiebigen, glatten Schalung. Da es sich im Rahmen des Forschungsprojekts jedoch um Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung handelt, kann diese Annahme nicht mehr voll vertreten werden. Selbst bei einer Fertigteil-Trag- und Vorsatzschalendicke von nur 60 mm und relativ weichen Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff, kann nicht mehr von einer Schalung nach DIN 18218 bzw. einer nachgiebigen Schalung gesprochen werden.

6 Nachrechnung der Versuchsergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel wird ein Berechnungsmodell entwickelt, das eine Nachrechnung und Analyse der Versuchsergebnisse ermöglicht. Ziel ist es, die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnen Erkenntnisse in einen mathematischen Zusammenhang zu bringen und dadurch eine Begründung für die unterschiedliche Druckverteilung in Abhängigkeit eines innen liegenden Dämmstoffs von Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung zu finden.

In Gleichungen (6) und (7) sind keine Parameter enthalten, die einen innenliegenden Dämmstoff bzw. Schalung berücksichtigen. Demnach gibt es bei der Nachrechnung der Versuchsergebnisse nach dem Modell der DIN 18218 keine Unterschiede zwischen den drei durchgeführten Großversuchen. Jedoch waren deutliche Unterschiede zu erkennen (siehe Kapitel 4.5.5).

Für die Nachrechnung der Versuchsergebnisse werden demnach drei Modifikationen vollzogen. Dadurch kann der Einsatz von unterschiedlichen, innen liegenden Materialien sinnvoll begründet und berücksichtigt werden:

- der Seitendruckbeiwert λ_0 wird für ein steiferes Schalungssystem (Sandwichwand mit nachträglicher Ortbetonergänzung) korrigiert und kann nicht nach DIN 18218 angenommen werden
- beim Einsatz eines wasseraufnahmefähigen, innen liegenden Materials muss nach der Verdichtung des Frischbetons der Seitendruckbeiwert auf $\lambda_{0,eff}$ in der Berechnung reduziert werden, da dem Beton Wasser entzogen wird
- die Tiefe des Wirkungsbereichs der Rüttelflasche h_w muss an die Konsistenz des Frischbetons (und der "Mitschwingungsanfälligkeit" der an die Frischbetonschicht angrenzenden Schalungsmaterialien) angepasst werden



6.1 Seitendruckbeiwerte λ₀ für Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung

Abbildung 62: Zusammenhang zwischen Wassergehalt des Betons und Seitendruckbeiwert

Abbildung 62 zeigt die Zusammenfassung des Zusammenhangs zwischen dem Wassergehalt und dem Seitendruckbeiwert eines Frischbetons. Die Abbildung beinhaltet die

Ergebnisse von Specht aus dem Jahr 1973 für eine starre Schalung, die lineare Annahme für eine nachgiebige Schalung und die Annahmen zur Entwicklung der DIN 18218. Hieraus wird äquivalent Abbildung 63 erzeugt, welche dem Zusammenhang zwischen dem Ausbreitmaß und dem Seitendruckbeiwert wiedergibt.



Abbildung 63: Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß des Betons und Seitendruckbeiwert

Für einen verwendeten Beton nach Tabelle 18 mit einem Wassergehalt von 220l/m³ und einem durchschnittlich gemessenen Ausbreitmaß von 55 cm ergeben sich für die drei Ansätze folgende Werte:

DIN 18218	$\lambda_0 = 0,32$
Specht (1973) – starre Schalung	$\lambda_0 = 0,79$
Linear – nachgiebige Schalung	$\lambda_0 = 0,47$

Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung weisen relativ starre statische Systeme auf. Deshalb wird als Seitendruckbeiwert der Mittelwert zwischen einer starren und nachgiebigen Schalung angenommen und es ergibt sich:

$$\lambda_0 \left(220 \frac{l}{m^3} bzw.55cm \right) = \frac{1}{2} \cdot (0.47 + 0.79) = 0.63$$

6.2 Reduktion des Seitendruckbeiwertes auf $\lambda_{0,eff}$ infolge der Wasseraufnahmefähigkeit von EPS

Nachfolgende Tabelle zeigt einen Auszug aus den Ergebnissen der Untersuchungen zur Wasseraufnahmefähigkeit von EPS (siehe Kapitel 4.2). Hierbei sind nur die Ergebnisse des in der letzten Versuchsreihe verwendeten Betons aufgeführt.

Tabelle 21: Versuchsergebnisse zur Wasseraufnahmefähigkeit von EPS bei Konsistenzklasse F4

Konsistanz	Ausbreitmaß [cm]			Gewicht der Wärmedämmung [g]	
KUISISIEIIZ	ursprünglich	ohne EPS	mit EPS	vorher	nachher
F4	53	39	36	84,5	420,0
F4	51	47	34	80,8	326,0
F4	55	49	38	82,3	415,5

Bildet man den Mittelwert der drei Versuche, so erhält man eine von der Dämmung aufgenommene Wassermenge von:

$$m_W = \frac{1}{3} \cdot (420,0g - 84,5g + 362,0g - 80,8g + 415,5g - 82,3g) = 304,6g$$

Wasser. Bei einem Kammervolumen von 15 I (siehe Kapitel 4.2) und einem Wassergehalt des Betons von ursprünglich 220 I/m³ reduziert sich der Wassergehalt auf ca. 200 I/m³:

$$G_W = 220l - 0,3046l \cdot \frac{1000l}{15l} = 200l$$

Hieraus ergibt sich gemäß Abbildung 62 ein Seitendruckbeiwert $\lambda_{0,eff}$ von 0,54 (Mittelwert zwischen nachgiebiger und starrer Schalung).

Bei der Auswertung der gemessenen Frischbetonkonsistenzen muss auch die Reduktion des Ausbreitmaßes des Betons aus der Kammer ohne EPS berücksichtigt werden. Im Mittel ergibt sich demnach ein reduziertes Ausbreitmaß nach Wasseraufnahme des EPS von

$$f = \frac{1}{3} \cdot (53cm - (39 - 36)cm + 51cm - (47 - 34)cm + 55cm - (49 - 38)cm) = 44cm$$

Gemäß Abbildung 63 ergibt sich ein effektiver Seitendruckbeiwert $\lambda_{0,eff}$ von 0,52 (Mittelwert zwischen nachgiebiger und starrer Schalung).

Für PV01 ergibt sich nach der Verdichtung des Frischbetons im Mittel eine Reduzierung des Seitendruckbeiwertes auf 0,53 aufgrund der Wasseraufnahmefähigkeit der Wärmedämmung. Der Seitendruckbeiwert von PV02 und PV03 ändert sich rechnerisch nach der Verdichtung nicht.

6.3 Dynamische Tiefenwirkung der Rüttelflasche

Die dynamische Tiefenwirkung der Rüttelflasche in Abhängigkeit der Frischbetonkonsistenz und der umgebenen "Schalungsmaterialien" muss auf Grundlage der Versuchsergebnisse in Kapitel 4.5.5 angenommen werden. Für die Höhe Δ h (siehe Abbildung 64) ergeben sich im Schnitt folgende Werte:

PV01	40 cm
PV02	110 cm
PV03	180 cm

Um allgemeingültige Werte zu erhalten, müssen genaue Untersuchungen zur Schwingungsfähigkeit von verschiedenen Betonen und "Schalungsmaterialien" in Abhängigkeit der Anregung durch ein Verdichtungsgerät gemacht werden.

6.4 Modifizierte Modellvorstellung für Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung

Hieraus entsteht die modifizierte Modellvorstellung gemäß Abbildung 64:

- 1. Der Verlauf von der Betonoberfläche bis zur Rütteltiefe h_r wir als *hydrostatisch* angenommen.
- 2. Von hier an schließt sich ein Druckverlauf nach Gleichung (7) an. Dieser beinhaltet den vollen Rüttelzuschlag wie in DIN 18218. Die Höhe des *vollen Wirkungsbereichs der Rüttelflasche h*_{VW} setzt sich aus der Rütteltiefe h_r und einem Zuschlag Δ h zusammen

(siehe Kapitel 6.3). Der Zuschlag Δh ist von der Konsistenz des Betons und den umgebenen Schalungsmaterialien abhängig.

3. Ab der Tiefe h_{VW} ist es nicht mehr sinnvoll einen vollen Rüttelzuschlag anzusetzen. Der Bereich zwischen voller Verdichtungswirkung und dem Erstarrungsende h_E wird demnach im Folgenden als *reduzierter Wirkungsbereich* h_{RW} bezeichnet. Es findet eine lineare Verbindung bis zur Betonierhöhe bei Erreichen des Erstarrungsendes h_E statt.



Abbildung 64: Modifizierte Modellvorstellung für Sandwichwände mit nachträglicher Ortbetonergänzung

Es ist zu erkennen, dass je nach Randbedingungen (Konsistenzklasse des Betons, Betoniergeschwindigkeit, Erstarrungszeit des Betons,...) das Integral des Frischbetondrucks über die Höhe deutliche Unterschiede zwischen der DIN 18218 und der neuen Modellvorstellung aufweist. Die angenommene Gesamtbelastung der Verbindungsmittel in der Sandwichwand ist nach der modifizierten Modellvorstellung deutlich geringer, als nach Norm angenommen. Die durchgeführten Versuche bestätigen diese Annahme.

6.5 Nachrechnung der Versuchsreihe unter praxisnahen Bedingungen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen den gemessenen Versuchswerten und den Ergebnissen der Nachrechnung mit der modifizierten Modellvorstellung nach Kapitel 6.4.

In Anhang C sind zudem alle Verdichtungsvorgänge der Versuche getrennt dargestellt. Im Vergleich ist hier auch der charakteristische Druckverlauf nach DIN 18218 abgebildet.



Abbildung 65: Versuchsergebnisse und Nachrechnung mit modifizierter Modellvorstellung für PV01

Abbildung 65 zeigt die Ergebnisse für die Sandwichwand mit einer innen liegenden Dämmung aus EPS. Der nahezu lineare Druckverlauf bei den ersten drei Verdichtungsvorgängen kann relativ gut nachgerechnet werden. Die hohe Zugkraft im untersten Verbindungsmittel bei der 3. Verdichtung kann nicht abgebildet werden. Bei den anschließenden Verdichtungsvorgängen ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuchsergebnissen und Rechnung zu erkennen.



Abbildung 66: Versuchsergebnisse und Nachrechnung mit modifizierter Modellvorstellung für PV02

Auch bei einer innen liegenden Dämmung aus XPS (siehe Abbildung 66) können die Druckverläufe relativ gut nachgerechnet werden. Lediglich das unterste Verbindungsmittel erfährt bei den ersten Verdichtungsvorgängen im Versuch höhere Kräfte als bei der Nachrechnung. Bei größeren Betonierhöhen verschwindet dieser Effekt wieder und die Nachrechnung liefert gute Ergebnisse.



Abbildung 67:Versuchsergebnisse und Nachrechnung mit modifizierter Modellvorstellung für PV03

Bei dem Versuch mit innen liegender Holzschalung (siehe Abbildung 67) kann das modifizierte Modell die Realität nicht abbilden.



Abbildung 68: Vergleich zwischen Versuchsergebnissen, Nachrechnung und DIN 18218 für die 8. Verdichtung

Abbildung 68 zeigt sehr gut eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Für eine innen liegende Wärmedämmung liefert die modifizierte Modellvorstellung unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen aus Kapitel 6.1 bis 6.3 eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuchsergebnissen und Rechnung. Der nachgerechnete Druckverlauf "umrahmt" die gemessenen Versuchsergebnisse. Für eine schalglatte Oberfläche sind die nachgerechneten Kräfte zu niedrig, demnach sollte das Modell in diesen Fällen keine
Anwendung finden. Hier liefert DIN 18218 sehr gute Ergebnisse, da diese speziell für schalglatte Oberflächen entwickelt wurde. Grund hierfür ist die Mitschwingung einer Holzschalung während des Verdichtungsvorgangs, welcher in der modifizierten Modellvorstellung aufgrund fehlender Untersuchungen noch nicht berücksichtigt werden kann.

7 Zusammenfassung

Forschungsvorhaben Das "Hochwärmedämmende Sandwichaußenwände mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff" wurde als Reaktion auf eine Versuchsreihe veranlasst, die im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit an der TU Kaiserslautern im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion durchgeführt wurde. Als Ergebnis dieser Versuche konnte bei Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung eine deutliche Abhängigkeit des Frischbetondrucks von einem innen liegenden Dämmstoff festgestellt werden. Hierbei betrug der maximale Frischbetondruck bei baugleichen Wandkonstruktionen beim Einsatz von Dämmung aus EPS nur rund 60 % im Vergleich zu einer Dämmung aus XPS. Die wissenschaftliche Erklärung und der mechanische Hintergrund dieses Effektes sollte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersucht werden. Hierzu wurden zahlreiche theoretische sowie eine Reihe praktischer Untersuchungen durchgeführt.

Zur Messung des horizontalen Frischbetondrucks wurden auf die GFK-Verbindungsmittel der Sandwichwände Dehnmesstreifen appliziert. Diese Messmethode hat sich sowohl hinsichtlich der Messgenauigkeit als auch der geringen Störanfälligkeit gegenüber mechanischen und feuchtetechnischen Einflüssen als geeignet erwiesen.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass expandierte Polystyrol-Hartschaumstoffe (EPS) eine wasseraufnehmende Funktion besitzen. Beim Einsatz solcher Dämmstoffe in Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung resultiert ein Wasserentzug aus Verdichtungsvorgängen. dem Frischbeton während den Hierbei findet eine Konsistenzänderung des Frischbetons statt. die Einflüsse auf den maximalen Frischbetondruck hat. Die Menge des Wasserentzugs ist von der Porengröße und Rohdichte des Dämmstoffs abhängig. Extrudierte Polystyrol-Hartschaumstoffe (XPS) nehmen kein Wasser auf.

Bei der Durchführung von zahlreichen Versuchen mit niedriger Betonierhöhe bis zu 160 cm wurden folgende Einflussfaktoren auf den horizontalen Frischbetondruck variiert:

- Konsistenzklasse des Frischbetons
- Dicke der Ortbetonschicht
- Dicke des Dämmstoffs
- Art des Dämmstoffs
- Oberflächenrauigkeit des Dämmstoffs
- Oberflächenrauigkeit der angrenzenden Betonoberfläche

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass bei niedrigen Betonierhöhen und einer Verdichtung des Frischbetons bis zum Fußpunkt der Bauteile keine signifikanten Unterschiede zwischen dem maximalen Druck und der Druckverteilung über die Bauteilhöhe entstehen. Der Frischbetondruck kann dann gut mithilfe der DIN 18218 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" d.h. über die Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung berechnet werden. Ein Einfluss der oben aufgeführten Parameter auf den maximalen, horizontalen Frischbetondruck ist somit bei niedrigen Betonierhöhen auszuschließen. Die in den Versuchen gemessenen Drücke übersteigen sogar am Fußpunkt geringfügig den hydrostatischen Druck. Ein Unterschied bei Variation der Einflussparameter wird erst nach Abschluss eines Verdichtungsvorgangs ersichtlich. Beim Einsatz einer wasseraufnehmenden Dämmung (wie z.B. EPS) findet nach Beendigung der Betonverflüssigung ein viel schnellerer

Abfall des Frischbetondrucks statt. Ähnliches kann bei einer sehr rauen oder verzahnten, innen liegenden Betonoberfläche beobachtet werden. Eine größere Oberfläche entzieht dem Frischbeton mehr Wasser.

Im Rahmen einer abschließenden Versuchsreihe unter praxisnahen Randbedingungen wurden 400 cm hohe Sandwichwände hergestellt und getestet. Hier wurde auf eine normgerechte Verdichtungsmethode geachtet, bei der immer nur die beiden obersten Betonschichten verdichtet und miteinander verbunden wurden. In dieser Versuchsreihe konnte eine deutliche Abhängigkeit des maximalen Frischbetondrucks von einem innen liegenden Dämmstoff beobachtet werden. Als Begründung hat sich die wasseraufnehmende Eigenschaft von EPS-Dämmung herausgestellt. Durch den Entzug von Wasser aus dem Frischbeton resultiert eine steifere Betonkonsistenz. Dadurch entstehen bei größeren Betonierhöhen geringere Frischbetondrücke. Zusätzlich reduziert sich zum einen der Einflussbereich der dynamischen Tiefenwirkung der Rüttelflasche und zum anderen erhöht sich die Reibung zwischen Frischbeton und den Schalungsflächen (Siloeffekt). Beides führt ebenfalls zu einer Druckminderung. In den Sandwichwänden mit einer Dämmung aus EPS findet somit eine viel geringere Belastung der Verbindungsmittel während der Verfüllung der Ortbetonergänzung statt.

Ein geringerer Frischbetondruck ermöglicht eine wirtschaftlichere Bemessung des Verbindungsmittelrasters. Zusätzlich wird die Dauerhaftigkeit solcher Wandelemente erhöht, da die dauerhafte Zugbeanspruchung in den Verbindungsmitteln reduziert wird. Ein Nachteil bei der Verwendung einer Wärmedämmung aus EPS ist das Eindringen des Zement-Wasser-Gemischs bei der Verdichtung des Betons. Hierdurch kommt es zu einer Reduktion der wärmedämmenden Wirkung der Wandelemente.

8 Empfehlungen für die Praxis und Ausblick

Die Bemessung von Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung erfolgt aktuell DIN 18218 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen". Da in nach dieser Bemessungsnorm der individuelle Aufbau einer Sandwichwand nicht berücksichtigt werden kann, fällt die Dimensionierung des Verbindungsmittelrasters unwirtschaftlich aus. Da Sandwichwände im Bauwesen zunehmenden Einsatz finden, sollte dies verhindert werden. Eine wirtschaftlichere Bemessung in der Praxis ist jedoch nur mit einem wissenschaftlich begründeten Berechnungsmodell möglich, welches dem bauaufsichtlich geforderten Sicherheitsniveau entspricht.

Durch den im Forschungsprojekt gewonnenen Kenntnisstand ist es für die getesteten Randbedingungen möglich, mithilfe von Modifikationen an dem Berechnungsmodell der DIN 18218 die geometrischen und materialspezifischen Besonderheiten einer Sandwichwand mit nachträglicher Ortbetonergänzung zu berücksichtigen. Um das Modell auf beliebige Randbedingungen zu erweitern, bedarf es jedoch noch weiterer intensiver Untersuchungen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass unter den getesteten Randbedingungen

- Betoniergeschwindigkeit 1,6 m/h
- Konsistenzklasse des Betons F4
- Dicke der Ortbetonverfüllung 100 mm
- Oberfläche der FT-Tragschale rau
- Dämmstoff EPS (ρ = 15 kg/m³)

eine viel wirtschaftlichere Dimensionierung des Verbindungsmittelrasters möglich ist. Die im Versuch ermittelten maximalen Frischbetondrücke bei Sandwichwänden mit innen liegender Dämmung aus EPS betragen im Vergleich zum charakteristischen Frischbetondruck nach DIN 18218 nur rund 50 %. Diese Druckminderung ergibt sich ab einer Betonierhöhe von ca. 200 cm. Bei niedrigeren Betonierhöhen kann ein Einfluss der Dämmung auf den maximalen Frischbetondruck ausgeschlossen werden.

Je nach Variation der oben aufgeführten Randbedingungen ändert sich die Betonierhöhe, ab welcher sich der Einfluss einer innen liegenden Dämmung bemerkbar macht. Bei höherer Betoniergeschwindigkeit oder Konsistenzklasse des Betons tritt auch erst bei größeren Betonierhöhen der Effekt der Druckminderung ein. Im Gegensatz dazu tritt eine Druckminderung theoretisch schon in niedrigeren Höhen als 200 cm ein, wenn eine rauere Oberfläche der FT-Tragschale oder ein EPS mit geringerer Rohdichte verwendet wird, da dem Frischbeton eine größere Menge Wasser entzogen werden kann. Auch die Dicke der Ortbetonverfüllung hat einen Einfluss. Bei einem breiteren Ortbetonspalt wird dem Beton prozentual weniger Wasser entzogen und der Einfluss einer innen liegenden Wärmedämmung stellt sich erst bei größeren Betonierhöhen ein.

In weiterführender Forschungsarbeit werden an der TU Kaiserslautern weitere Untersuchungen durchgeführt, um ein Modell zur Beschreibung des Frischbetondrucks in Sandwichwänden mit nachträglicher Ortbetonergänzung zu entwickeln. Forschungsschwerpunkt wird zum einen die Wasseraufnahmefähigkeit von Wärmedämmstoffen sein. Je nach Art und Dichte des Dämmstoffs kann diese erheblich voneinander abweichen. Die genaue Kenntnis über die wasseraufnehmende Eigenschaft der Dämmung bildet die Grundlage für eine Berechnung des Frischbetondrucks. Außerdem hat sie einen Einfluss auf die wärmedämmende Wirkung des Wandelements. Zum anderen soll die dynamische Tiefenwirkung von Verdichtungsgeräten untersucht und quantifiziert werden. In Abhängigkeit der Leistung der Geräte und der Frischbetoneigenschaften ist die verdichtende Wirkung bis in unterschiedliche Tiefen spürbar. Die Tiefenwirkung hat große Auswirkungen auf den maximalen Frischbetondruck. Auch die dem Frischbeton umgebenen Schalungsmaterialien übertragen Schwingungen einer Rüttelflasche in die Tiefe und beeinflussen dadurch den Druck.

Literaturverzeichnis

DAfStb Heft 567 Frischbetondruck fließfähiger Betone [Bericht]. - Berlin : Beuth, 2006.

DIBt Zulassung Z-21.8-1878, TM-Verbundsystem für dreischichtige Stahlbetonwandtafeln. - Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, Juni 2011.

DIBt Zulassung Z-21.8-1894, Schöck ComBAR Thermoanker. - Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, Dezember 2011.

DIN 18218 Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen. - Berlin : Deutsches Institut für Normung, Januar 2010.

DIN EN 12350-5 Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß. - Berlin : Deutsches Institut für Normung, August 2009.

DIN EN 12350-6 Prüfung von Frischbeton. - Berlin : Deutsches Institut für Normung, März 2011.

DIN EN 12878 Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen -Anforderungen und Prüfverfahren. - Berlin : Deutsches Institut für Normung, Februar 2012.

Gastmeyer Ralf Tragverhalten von teilweise vorgefertigten Stahlbetonwänden mit Ortbetonergänzung und integrierter Wärmedämmung [Artikel] // Bautechnik. - Berlin : Ernst & Sohn, 2004. - Heft 11, S.869-873 : Bd. 81.

Pahn Matthias Beitrag zur Ermittlung von Schnitt- und Verformungsgrößen bei mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff. - Kaiserslautern : [s.n.], 2011.

Proske Tilo Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton. - Darmstadt : [s.n.], 2007.

Specht Manfred Der Frischbetondruck nach DIN 18218 - die Grundlagen und wichtigsten Festlegungen [Artikel] // Bautechnik. - Berlin : [s.n.], 1981. - Bd. Heft 8.

Specht Manfred Die Belastung von Schalung und Rüstung durch Frischbeton [Buch]. - Düsseldorf : Werner-Verlag, 1973.

Specht Manfred Theorie des Frischbetondrucks - gegenwärtiger Stand und ungeklärte Probleme [Artikel] // Bautechnik. - Berlin : [s.n.], 1987. - Bd. Heft 3.

Anhang A – Diagramme zur Großversuchsreihe

Kraft-Zeit-Diagramme

























Verteilung des Frischbetondrucks über die Bauteilhöhe

Versuch GV01

















Anhang B – Diagramme zur Kleinversuchsreihe

Kraft-Zeit-Diagramme





































Anhang C – Diagramme zu den Versuchen unter praxisnahen Bedingungen

Verteilung des Frischbetondrucks inklusive Nachrechnung und DIN 18218

Versuchswerte
Nachrechnung mit modifizierter Modellvorstellung
DIN 18218 (charakteristisch)

PV01



PV02



PV03

