

Beitrag zur realitätsnahen Beschreibung des horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Andreas Schmitt

aus Neunkirchen (Saar)

Dekan:	Prof. Dr. O. Kornadt
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Pahn
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. J. Schnell
3. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner
Tag der mündlichen Prüfung:	11.09.2017

Kaiserslautern 2017

(D 386)

Andreas Schmitt

**Beitrag zur realitätsnahen Beschreibung des
horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden
mit integriertem Dämmstoff**

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion im Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn, der mich als erster Berichterstatter bei der Anfertigung meiner Arbeit in den letzten Jahren unterstützt und betreut hat. Durch die frühe Übertragung von Verantwortung in Forschungsprojekten und Arbeitsgruppen sowie durch die Teilnahme an internationalen Tagungen war er maßgeblich an meiner persönlichen und fachlichen Weiterentwicklung beteiligt.

Des Weiteren möchte ich dem zweiten Berichterstatter Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell danken, der die Grundidee zu meiner Dissertation hatte und mich schon während meines Studiums unterstützt und an das Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion herangeführt hat.

Herrn Univ.-Prof. Carl-Alexander Graubner danke ich für die Anfertigung des Drittgutachtens und das Interesse an meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich meinen ehemaligen Arbeitskolleginnen und -kollegen für eine stets beispielhafte Zusammenarbeit und die zahlreichen Anregungen und fachlichen Diskussionen zu meiner Dissertation. Großer Dank gilt auch den ehemaligen Studierenden Andreas Grube, Rabea Sefrin, Christoph Kolka und Niklas Meurer, die im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zudem danke ich meinem Bruder Mathias Schmitt sowie meinen Kollegen und Freunden Michael Weber und Christian Fox für die Korrektur und kritische Hinterfragung meiner Arbeit.

Zuletzt danke ich ganz besonders meinen Eltern, meinen Brüdern und meiner Freundin, da sie mir Rückhalt und Verständnis während meiner Promotionszeit entgegengebracht haben.

Kaiserslautern, im September 2017

Andreas Schmitt

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	vii
Abstract	viii
Begriffe	ix
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	1
2 Grundlagen zu Elementwänden und Frischbetondruck	5
2.1 Elementwände mit integriertem Dämmstoff	5
2.1.1 Vorteile und Einsatzgebiete	5
2.1.2 Querschnittsaufbau	7
2.1.2.1 Deckschichten	7
2.1.2.2 Dämmstoff	8
2.1.2.3 Verbindungsmittel	8
2.1.2.4 Ortbeton	9
2.1.3 Herstellung im Fertigteilwerk	9
2.1.4 Montage und Betonage auf der Baustelle	11
2.2 Frischbeton	12
2.2.1 Zusammensetzung	12
2.2.2 Eigenschaften und Prüfungen	13
2.2.2.1 Verarbeitbarkeit	13
2.2.2.2 Frischbetonkonsistenz	13
2.2.2.3 Wassergehalt und w/z-Wert	14
2.2.2.4 Frischbetonrohddichte	15
2.2.2.5 Luftgehalt	15
2.2.2.6 Frischbetontemperatur	16
2.2.3 Bereiten, Verarbeiten und Verdichten	16
2.2.4 Nachbehandlung	16
2.3 Frischbetondruck auf lotrechte Schalung	17
2.3.1 Modellvorstellungen und Berechnungsansätze	17
2.3.1.1 Hydrostatischer Ansatz	17
2.3.1.2 Bodenmechanischer Ansatz	18
2.3.1.3 Ansatz nach Silotheorie	21
2.3.1.4 Empirisch abgeleitete Berechnungsansätze	23
2.3.2 Normen und Regelwerke	25
2.3.2.1 DIN 18218: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen	26

2.3.2.2	CIRIA Report No. 108: Concrete Pressure on Formwork	30
2.3.2.3	CIB-CEB-FIP: Manuel de Technologie "Coffrage"	31
2.3.2.4	ACI 347-14: Guide to Formwork for Concrete	32
2.3.2.5	CAN/CSA S269.3: Concrete Formwork	35
2.3.2.6	Vergleich der Berechnungsmethoden	35
2.3.3	Stand der Wissenschaft	36
3	Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter	39
3.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	39
3.2	Theoretische Betrachtungen zum Ausschluss von Parametern	44
3.2.1	Statisches System und Einwirkung	44
3.2.2	Untersuchte Einflussparameter	45
3.2.3	Ergebnisse und Auswertung	46
3.2.4	Fazit der Parameterstudie und Ausschluss weiterer Parameter	48
3.3	Bezeichnungsschema der experimentellen Untersuchungen	49
3.4	Untersuchungen am Kleinversuchsstand (KV)	50
3.4.1	Aufbau des Versuchsstands und Messtechnik	50
3.4.2	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	51
3.4.3	Ergebnisse und Auswertung	52
3.4.4	Fazit	55
3.5	Untersuchungen am Großversuchsstand (GV)	56
3.5.1	Aufbau und Entwicklung von Versuchsstand und Messtechnik	56
3.5.2	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	57
3.5.3	Ergebnisse und Auswertung	59
3.5.4	Fazit	61
3.6	Untersuchungen an hohen Elementwänden (HE)	62
3.6.1	Versuchsprogramm und Messtechnik	62
3.6.2	Versuchsdurchführung	63
3.6.3	Ergebnisse und Auswertung	64
3.6.4	Fazit	67
3.7	Einfluss der Zementleimaufnahme des Dämmstoffs auf das Ausbreitmaß	68
3.7.1	Aufbau des Versuchsstands und Versuchsdurchführung	68
3.7.2	Ergebnisse und Auswertung	68
3.8	Zusammenfassung und Diskussion	70
3.8.1	Niedrige Bauteile	70
3.8.2	Hohe Bauteile	71
4	Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser	73
4.1	Entwicklung und Marktbedeutung	73
4.2	Produktionsprozess, Produkte und Kennzeichnung von EPS-Dämmstoffen	74

4.2.1	Herstellung von expandierbarem Polystyrol (Polystyrol-Granulat)	74
4.2.2	Produktion von Dämmstoffen aus EPS	76
4.2.3	Zusammenstellung von Produkten zur Herstellung von EPS	78
4.2.4	CE-Kennzeichnung und Etikettierung	79
4.3	Eigenschaften von EPS und deren Einfluss auf die Wasseraufnahme	81
4.3.1	Porenstruktur und Ausbildung der Oberfläche	81
4.3.2	Druckfestigkeit, Rohdichte und Porengröße	83
4.3.3	Wärmeleitfähigkeit und Feuchtegehalt	85
4.4	Wasseraufnahme bei Beanspruchung durch drückendes Wasser	89
4.4.1	Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem und langfristigem Eintauchen	89
4.4.2	Experimentelle Untersuchung der Wasseraufnahme von Polystyrol-Dämmstoffen bei kurzzeitiger, hoher Druckbelastung	91
4.4.2.1	Aufbau des Versuchsstands und Versuchsdurchführung	91
4.4.2.2	Ergebnisse und Auswertung	93
4.5	Ansatz für eine automatisierte Porenerkennung	95
4.6	Zusammenfassung	97
5	Untersuchung der Zementleimaufnahme von Dämmstoffen aus EPS	99
5.1	Einfluss der Zementleimaufnahme auf Frischbetondruck, Dämmstoff und Ortbeton	99
5.2	Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter (S)	100
5.2.1	Aufbau des Versuchsstands	100
5.2.2	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	101
5.2.3	Ergebnisse und Auswertung	105
5.2.3.1	Druckhöhe und Ausbildung der Oberfläche des Dämmstoffs	106
5.2.3.2	Verdichtungsdauer des Frischbetons	107
5.2.3.3	Wassergehalt und Konsistenz des Betons	108
5.2.3.4	Mittlerer Porendurchmesser des Dämmstoffs und w/z-Wert des Frischbetons	109
5.2.3.5	Hydratation des Ortbetons	111
5.2.3.6	Druckfestigkeit des Ortbetons und der Normprobewürfel	112
5.2.3.7	Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs	112
5.2.4	Fazit	113
5.3	Quantifizierung der eingedrungenen Zementleimmenge (F)	114
5.3.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	114
5.3.2	Versuchsprogramm	114
5.3.3	Ergebnisse und Auswertung	115
5.3.3.1	Wassermenge im Dämmstoff (Variante A und Variante B)	116
5.3.3.2	Zementmenge im Dämmstoff	118
5.3.3.3	Druckfestigkeit des Ortbetons	119

5.3.4	Fazit	121
5.4	Zusammenfassung	121
5.4.1	Beeinflussung des Frischbetondrucks	121
5.4.2	Beeinflussung des Ortbetons	122
5.4.3	Beeinflussung des Dämmstoffs	123
5.4.3.1	Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts	123
5.4.3.2	Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Zementgehalts	123
5.4.3.3	Erhöhter Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	126
6	Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang	127
6.1	Verdichtung von Frischbeton mit Innenrüttlern	127
6.2	Theoretische Grundlagen zur Übertragung von Rüttelschwingungen in Frischbeton	129
6.2.1	Rüttelgeräte und Rüttelmechanik	129
6.2.2	Ausbreitung mechanischer Wellen im Frischbeton	131
6.2.3	Herleitung mathematischer Zusammenhänge zur Beschreibung von Rüttelschwingungen in Frischbeton	134
6.3	Schwingungsübertragung in Elementwänden	137
6.4	Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen	140
6.4.1	Schwingungsfrequenz und -amplitude der verwendeten Innenrüttler	140
6.4.2	Dämpfungskonstanten von Frischbeton (DS1)	142
6.4.2.1	Experimentelle Untersuchungen	142
6.4.2.2	Theorie zur Wellenüberlagerung und Dämpfungskonstanten	145
6.4.3	Dynamische Tiefenwirkung in Wandbauteilen (DS2)	149
6.5	Zusammenfassung	158
7	Realitätsnahes Modell zur Berechnung des Frischbetondrucks	159
7.1	Der Weg zum Berechnungsmodell	159
7.2	Entwicklung des Berechnungsmodells	161
7.2.1	Allgemeines	161
7.2.2	Modellvarianten	161
7.2.3	Reduzierter Seitendruckbeiwert	164
7.2.4	Dynamische Tiefenwirkung	168
7.3	Darstellung des Berechnungsmodells	171
7.4	Verifikation und Validierung des Berechnungsmodells	174
7.4.1	Versuchsprogramm, Messtechnik und Versuchsdurchführung (HEII)	174
7.4.2	Versuchsergebnisse (HEII)	176
7.4.3	Nachrechnung der Versuchsreihe HEII	178
7.4.4	Nachrechnung der hohen Elementwände (HE) aus Kapitel 3.6	183
7.5	Zusammenfassung	186

8	Empfehlungen für die Bemessung und Berechnungstool	189
8.1	Berechnungsvorschlag Frischbetondruck	189
8.1.1	Maximaler Druck und Druckverteilung über die Schalungshöhe	189
8.1.2	Behandlung der Zuverlässigkeit des Berechnungsmodells	197
8.1.2.1	Allgemeines	197
8.1.2.2	Charakteristischer Wert des Frischbetondrucks	198
8.1.2.3	Teilsicherheitsbeiwert für den Frischbetondruck	198
8.1.2.4	Bemessungswert des Frischbetondrucks	202
8.1.3	Berechnungsbeispiele zur Darstellung der Wirtschaftlichkeit	203
8.2	Druckfestigkeit des Ortbetons	206
8.3	Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs	207
8.4	Berechnungstool zur Ermittlung des Frischbetondrucks	209
9	Zusammenfassung und Ausblick	211
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	211
9.2	Ausblick	213
	Literaturquellen	215
	Normen, Regelwerke, Zulassungen und Produktdatenblätter	221
	Anhang A – Theoretische Betrachtungen und Kleinversuchsstand	227
	Anhang B – Untersuchungen am Großversuchsstand	233
	Anhang C – Untersuchungen an hohen Elementwänden (HE)	237
	Anhang D – Sensitivitätsanalyse	239
	Anhang E – Quantifizierung der Zementleimaufnahme	241
	Anhang F – Betonrezepturen	243
	Anhang G – Bauphysikalische Betrachtungen	247
	Anhang H – Untersuchungen zur Schwingungsübertragung	255
	Anhang I – Untersuchungen zum Ausbreitmaß des Frischbetons	263
	Anhang J – Untersuchungen zur Validierung des Berechnungsmodells	264
	Anhang K – Berechnungsvorschlag für die Praxis	277

Zusammenfassung

Betonfertigteile mit integriertem Dämmstoff aus Polystyrol bieten eine ausgezeichnete Lösung zur baulichen Ausführung von Außenwandbauteilen. Die Vorteile gegenüber der Ortbetonbauweise, wie bspw. die Erfüllung hoher Qualitätsansprüche aufgrund der Vorfertigung im Fertigteilwerk oder das Entfallen von Arbeitsschritten auf der Baustelle, ermöglichen einen wirtschaftlichen Bauprozess. Bei der Halbfertigteilbauweise werden nur die äußeren Betonschalen vorgefertigt. Anschließend werden die Wände auf die Baustelle transportiert und mit Ortbeton zum Endquerschnitt verfüllt. Dies erspart den zeit- und kostenintensiven Schalungsvorgang und verringert gleichzeitig das Transportgewicht. Der beim Ausbetonieren der Halbfertigteile auftretende Frischbetondruck muss von Verbindungsmitteln, die zur Kopplung der Betonschalen dienen, mit ausreichender Sicherheit aufgenommen werden. Der Frischbetondruck ist derzeit nach *DIN 18218* „Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen“ anzunehmen. Die Beeinflussung durch einen integrierten Dämmstoff oder weitere Parameter einer Elementwand bleibt bisher allerdings unberücksichtigt. In Abhängigkeit der Randbedingungen wird der Frischbetondruck stark überschätzt, was zu einem unwirtschaftlichen Bemessungsergebnis im Bauzustand führt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die realitätsnahe Beschreibung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff.

Angesichts der Vielzahl an Einflussparametern werden die theoretischen und experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit systematisch geplant und durchgeführt. In Voruntersuchungen werden bereits einflusssschwache Einflussparameter ausgeschlossen und maßgebende Einflussparameter für weiterführende Untersuchungen bestimmt. Neben zahlreichen kleinmaßstäblichen Versuchsreihen, die größtenteils zur Analyse und Beschreibung von einzelnen geometrischen oder werkstoffspezifischen Eigenschaften dienen, werden auch großmaßstäbliche Elementwände untersucht. Diese verfolgen das Ziel, ein besseres Verständnis für die Entstehung des Frischbetondrucks unter Einbeziehung von bauausführungstechnischen Randbedingungen zu entwickeln.

Auf Grundlage der theoretisch und experimentell gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit wird ein realitätsnahes Berechnungsmodell zur Ermittlung des horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff abgeleitet. Nach Validierung des Modells an Großversuchen und vereinfachenden Annahmen für einen praxisingerechten Einsatz kann der Frischbetondruck analog zur *DIN 18218* mithilfe von einfachen Gleichungen, Tabellen und Diagrammen ermittelt werden. Die Anwendung und der wirtschaftliche Vorteil des Berechnungsmodells werden am Ende der Arbeit anhand von zwei Berechnungsbeispielen demonstriert.

Neben der Beeinflussung des Frischbetondrucks wirkt sich die Umlagerung von Zementleim aus dem Frischbeton in den Dämmstoff auch auf die Eigenschaften des Ortbetons und des Dämmstoffs der Elementwand aus. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich zwar die wärmedämmende Wirkung des Dämmstoffs verschlechtert, dies jedoch bei hohen Dämmstoffstärken zur Sicherstellung des Wärmeschutzes nach *EnEV 2016* vernachlässigt werden kann. Die Druckfestigkeit des Ortbetons infolge des Zementleimentzugs wird durch die Verringerung des w/z -Werts und die nachbehandelnde Wirkung des feuchten Dämmstoffs positiv beeinflusst.

Abstract

External wall elements are increasingly produced as precast concrete elements with an integrated insulation made of polystyrene. The advantages compared to in-situ concrete construction, such as the compliance of high quality requirements due to prefabrication in precast factories or the elimination of operational steps on construction site, enable an economic construction process. In semi-precast construction, just the outer concrete layers of the wall element are prefabricated. Afterwards, the walls are carried to the construction site and filled with in-situ concrete to accomplish the final cross section of the wall. This saves the time and cost consuming setup of formwork and reduces the transport weight. The fresh concrete pressure occurring during casting of concrete must be absorbed by the fasteners, which provide the connection between the concrete layers with a sufficient safety. Currently, the fresh concrete pressure is assumed by *DIN 18218* "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen". The influence of an integrated insulation or of other properties of the element wall has not been taken into account so far. Depending upon the boundary conditions, the fresh concrete pressure is overestimated, which leads to an uneconomic design. The aim of the present work is the realistic characterization of the fresh concrete pressure in element walls with an integrated insulation.

In view of the variety of influencing factors, the theoretical and experimental investigations of this work are systematically planned and conducted. In pre-investigations, unimportant factors are eliminated and important influencing factors are identified for further examinations. Beside numerous small-scale test, which are used for the analysis and characterization of individual geometric and material specific properties, also large-scale test are examined. These are aimed for the development of a better understanding of the formation of the fresh concrete pressure under consideration of operational boundary conditions.

Based on the gained knowledge of this work, a realistic calculation model for the determination of the fresh concrete pressure with integrated insulation is derived. After validation of the model with experimental full-scale tests and several simplifying assumptions for a practice-oriented application, the fresh concrete pressure can be calculated referring to *DIN 18218* with the aid of simple equations, tables and diagrams. At the end of the work, the application and economic advantages of the calculation model are demonstrated with two sample calculations.

In addition to influencing the fresh concrete pressure, the transfer of cement paste from fresh concrete to the insulation also affects the properties of the in-situ concrete and the insulation of the element wall. The results show that, in fact, the heat-insulation effect of the insulation is deteriorated. Anyway, this can be neglected as far as high insulation thicknesses are existent, which fulfill the requirements of *EnEV 2016*. Due to the reduction of the w/c and the curing effect of the moist insulation, the compressive strength of the in-situ concrete is positively influenced.

Begriffe

Große lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Flächeninhalt, Querschnittsfläche
<i>B</i>	Biegesteifigkeit
<i>C</i>	Koeffizient zur Berechnung des Frischbetondrucks
<i>D</i>	Dehnsteifigkeit, Federkonstante
<i>E</i>	Energie, E-Modul, Einwirkung
<i>F</i>	prozentualer Anteil an Flugasche oder Hochofenzement am gesamten Zementgehalt, Fließkraft
<i>H</i>	Höhe der Schalung
<i>I</i>	Flächenträgheitsmoment
<i>K</i>	Konsistenzklasse von Frischbeton, Kompressionsmodul, Anpassungskoeffizient
<i>K1</i>	Faktor zur Berücksichtigung der Erstarrung von Frischbeton
<i>K2</i>	Faktor zur Berücksichtigung der Rohwichte von Frischbeton
<i>R</i>	Oberflächenrauheit, Wärmedurchlasswiderstand, Bauteilwiderstand
<i>T</i>	Temperatur, Periodendauer einer Schwingung
<i>U</i>	Wärmedurchgangskoeffizient
<i>V</i>	Volumen, Variationskoeffizient

Kleine lateinische Buchstaben

<i>a</i>	Ausbreitmaß, Beschleunigung, Abstand, Achsabstand Verbindungsmittel
<i>b</i>	Querschnittsdicke eines zu betonierenden Bauteils, Bogenlänge, Randabstand Verbindungsmittel
<i>c</i>	Ausbreitungsgeschwindigkeit, Abstand
<i>d</i>	Dicke, Durchmesser
<i>e</i>	Exzentrizität
<i>f</i>	Festigkeit, Frequenz
<i>h</i>	Betonierhöhe, Höhe
<i>k</i>	Korrekturfaktor, Temperaturkoeffizient, Faktor zur Durchführung einer statistischen Auswertung
<i>m</i>	Masse, Mittelwert
<i>p</i>	Wahrscheinlichkeit

Begriffe

q	Wärmestromdichte
r	Radius
s	Setzmaß, Standardabweichung, Schwingungsamplitude, Stichprobe
t	Zeit
u	massenbezogener Feuchtegehalt
v	Betoniergeschwindigkeit, Geschwindigkeit
x	Ort, Abstand
y	Ort, Abstand

Griechische Buchstaben

α	Wichtungsfaktor, Winkel
β	Zuverlässigkeitsindex, Winkel
Δ	Differenz
γ	Teilsicherheitsbeiwert, Rohwichte
λ	Wärmeleitfähigkeit, Seitendruckbeiwert, Wellenlänge
ρ	Bewehrungsgrad, Rohdichte
σ	horizontaler Frischbetondruck, Spannung
ω	Kreisfrequenz
Ω	Dämpfungskonstante, Absorptionskoeffizient
φ	innerer Reibungswinkel von Frischbetondruck
ψ	volumenbezogener Feuchtegehalt

Indizes

0	zu Beginn, Anfangswert
a	aktiver Erddruck
A	Außenluft, Grundmodell A, Variante A
B	Berührungspunkt, Grundmodell B, Variante B
c	concrete, Zusatzstoffe und Zusatzmittel (concrete additives)
d	Bemessungswert
D	Dämmstoff, Nennwert
E	Erstarrungsende des Frischbetons, Einwirkung, Einfamilienhaus
f	feucht
F	Frischbetondruck, fallender Frischbeton, Frischbeton

x

grenz	Grenzwert
h	horizontal
hydro	hydrostatisch
I	Industriehalle
k	charakteristischer Wert
kin	kinetisch
m	Mittelwert
max	Maximalwert
min	Mindestwert
M	Messung
OB	Ortbeton
pot	potenziell
P	Dämmstoffpore
r	Erdruchdruck
red	reduzierter Wert
ref	Referenzwert
R	Rüttler
S	hydrostatisch, Schalung
t	trocken, tension
TS	Tragschale
U	Unwucht
v	vertikal
V	vollständig verdichtet, Rüttler (Vibrator), Verdichtung
VBM	Verbindungsmittel
VS	Vorsatzschale
w	Wasser, Wirkungsbereich
x	Einzelwert
Z	Zement, Einfluss der Zementleimaufnahme
Ü	Übergang

Abkürzungen

AbZ	Allgemein bauaufsichtliche Zulassung
ACI	American Concrete Institute
AW	Automatenware
BW	Blockware
CEB	Comité Euro-International du Béton (Euro-International Committee for Concrete)
CIB	International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association
CSA	Canadian Standards Association
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
EPS	Expandierter Polystyrol-Hartschaumstoff
FIB	Fédération internationale du béton (International Federation for Structural Concrete)
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte (International Federation for Prestressing)
FM	Fließmittel
FT	Fertigteil
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GV	Großversuchsstand
HE	Hohe Elementwände
HP	Horse Power
KMD	Kraftmessdose
KV	Kleinversuchsstand
PU	Polyurethan
SVB	Selbstverdichtender Beton
VBM	Verbindungsmittel
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
XPS	Extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Bauwirtschaft ist geprägt von Komplexität, knappen Zeitplänen und hohem Kostendruck. Unzureichende Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten führt schnell zu einer mangelhaften Bauplanung und zu Schwierigkeiten während der Bauausführung. Um Fehlern entgegenzuwirken, hat sich im Betonbau zunehmend der Fertigteilbau verbreitet. Im Vergleich zur konventionellen Ortbetonbauweise werden Bauteile in Fertigteilwerken vorproduziert, wodurch eine gewisse Kosten- und Qualitätssicherheit entsteht. Zudem werden Fehler bei der Bauausführung vermieden und gleichzeitig der Bauprozess beschleunigt.

Zwischen der Fertigteilbauweise und der Ortbetonbauweise steht der Halffertigteilbau. Im Werk vorgefertigte Halffertigteile werden auf die Baustelle transportiert, montiert, ausgerichtet und mit Ortbeton zum fertigen Bauteil ergänzt. Dies erspart zum einen den zeit- und kostenintensiven Schalungsvorgang auf der Baustelle, der je nach Komplexität des herzustellenden Bauteils bis zu 60 % der Gesamtkosten betragen kann, und verringert zum anderen das Transportgewicht der Fertigteile. Ein Beispiel für Halffertigteile sind Elementwände, deren Ortbetonergänzung zwischen zwei Fertigteil-Betonschalen liegt. Die Betonschalen sind mit Verbindungsmitteln unterschiedlicher Art gekoppelt. Diese müssen den beim Ausbetonieren auftretenden Frischbetondruck, der die maßgebende Belastung im Bauzustand darstellt, mit ausreichender Sicherheit aufnehmen. Die äußeren Betonschalen einer Elementwand in Kombination mit deren Verbindungsmitteln wirken wie ein verlorenes Schalungssystem. Bei Außenwandbauteilen ist ein zusätzlicher Einsatz eines in der Wand integrierten Dämmstoffs unverzichtbar, da die Energieeinsparverordnung (*EnEV 2016*) eine Begrenzung der Transmissionswärmeverluste und des Primärenergiebedarfs fordert.

Aktuell ist der Frischbetondruck bei der Bemessung von Elementwänden mit integriertem Dämmstoff nach *DIN 18218* „Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen“ anzunehmen. Diese basiert auf der Annahme von schalglatten Oberflächen, wobei die Beeinflussung des Drucks durch einen integrierten Dämmstoff oder die Eigenschaften der Schalungsflächen (Dämmstoff und Beton) bisher unberücksichtigt bleiben. Untersuchungen bestätigen, dass der Frischbetondruck je nach geometrischen, werkstoffspezifischen oder bauausführungstechnischen Randbedingungen damit erheblich überschätzt wird. Wirtschaftlich gesehen bedeutet eine Überschätzung des Frischbetondrucks ein übermäßiger Einsatz von Verbindungsmitteln oder eine Verzögerung im Bauablauf aufgrund langer Betoniervorgänge. Umgekehrt kann es zum Versagen der Schalung kommen, wenn der Frischbetondruck unterschätzt wird. Eine genaue Kenntnis der Frischbetondruckbeanspruchung ist deshalb von großer Bedeutung, um wirtschaftlich bemessen zu können.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die realitätsnahe Beschreibung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff. Hierfür wird ein Berechnungsmodell erarbeitet, das alle maßgebenden Einflussparameter berücksichtigt und eine

Bestimmung des maximalen Frischbetondrucks und der Frischbetondruckbeanspruchung über die Wandhöhe ermöglicht.

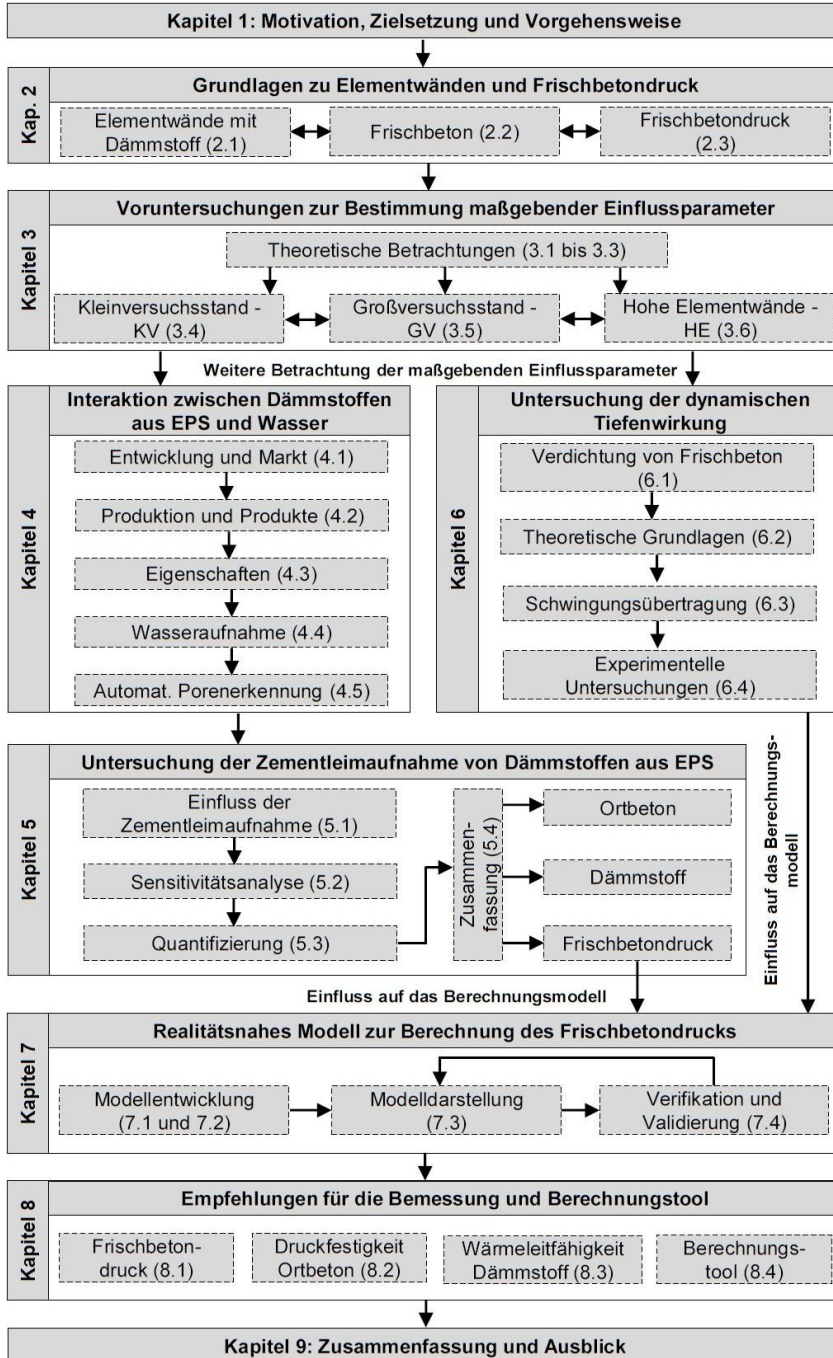


Abb. 1-1: Gliederungspunkte der vorliegenden Arbeit

Zudem wird geklärt, welche Auswirkungen die gegenseitige Beeinflussung von Ortbetonergänzung und Dämmstoff auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Wand im Endzustand haben.

Die Gliederung der vorliegenden Arbeit und die Vorgehensweise zur Ableitung eines Berechnungsmodells für den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff sind in Abb. 1-1 dargestellt. Zuerst werden in Kapitel 2 wichtige Grundlagen zusammengefasst. Hierzu gehören die Vorstellung der Elementbauweise, die Einführung in das Thema Frischbeton sowie der Stand der Technik zum Thema Frischbetondruck.

In Kapitel 3 werden die durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der maßgebenden Einflussparameter vorgestellt und ausgewertet. Neben theoretischen Betrachtungen beinhaltet das Kapitel experimentelle Untersuchungen an einem Kleinversuchsstand, einem Großversuchsstand und an hohen Elementwänden. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Ableitung des Berechnungsmodells, da sich hieraus die weiteren Untersuchungsschwerpunkte ergeben.

Bei der Berechnung des Frischbetondrucks spielen vor allem Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS) eine entscheidende Rolle. Deshalb werden in Kapitel 4 der Produktionsprozess, aktuell verfügbare Produkte und deren Kennzeichnung sowie wichtige Eigenschaften und das Verhalten bei Kontakt mit Wasser beschrieben. Zudem wird der Ansatz für eine automatisierte Porenerkennung bei EPS-Dämmstoffen mithilfe eines Algorithmus aus der Bildverarbeitung erarbeitet.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Zementleimaufnahme von EPS-Dämmstoffen bei der Verfüllung der Ortbetonergänzung und den resultierenden Einflüssen auf das Wandbauteil. Die Einflüsse können in die drei Bereiche „Ortbeton“, „Dämmstoff“ und „Frischbetondruck“ unterteilt werden.

Der Fokus von Kapitel 6 liegt auf der Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff. Diese beschreibt den vertikalen Wirkungsbereich eines Innenrüttlers im Bereich der Ortbetonergänzung. Neben der Erläuterung des Verdichtungsvorgangs von Frischbeton und der Schwingungsübertragung in Frischbeton beinhaltet das Kapitel auch Ergebnisse experimenteller Untersuchungen.

Auf Grundlage der Kapitel 3 bis 6 wird in Kapitel 7 ein realitätsnahes Modell zur Berechnung des Frischbetondrucks entwickelt und dargestellt. Mithilfe einer abschließenden Versuchsreihe an hohen Elementwänden mit integriertem Dämmstoff wird eine Verifikation und Validierung des Berechnungsmodells durchgeführt.

Zur Verwendung des Berechnungsmodells in der Praxis findet in Kapitel 8 eine Anpassung des Modells statt. Zudem werden Berechnungsdiagramme und -tabellen sowie ein Berechnungstool zur Bestimmung des Frischbetondrucks vorgestellt. Außerdem werden Empfehlungen für die Berücksichtigung einer veränderten Druckfestigkeit des Ortbetons und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs gegeben. Am Ende werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben.

2 Grundlagen zu Elementwänden und Frischbetondruck

Um einen Einblick in die Thematik zu bekommen, werden in diesem Kapitel wichtige Grundlagen und der Stand der Technik zusammengefasst (siehe Abb. 2-1).

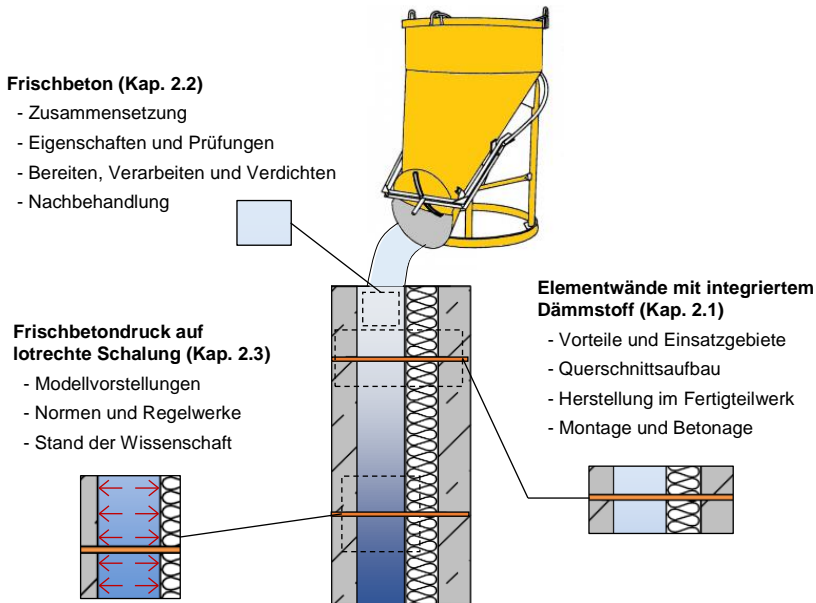


Abb. 2-1: Überblick über Elementwände und Frischbetondruck

In Kapitel 2.1 werden zuerst die Vorteile und Einsatzgebiete der Elementbauweise erläutert. Im Anschluss wird auf den Querschnittsaufbau und die Herstellung solcher Wandelemente im Fertigteilwerk eingegangen. Zum Schluss werden die Grundlagen zur Montage und Betonage von Elementwänden mit integriertem Dämmstoff zusammengefasst. Im darauf folgenden Kapitel 2.2 werden die Zusammensetzung von Frischbeton beschrieben und wichtige Frischbetoneigenschaften vorgestellt. Außerdem werden die Regeln für das Bereiten, Verarbeiten und Verdichten sowie für die Nachbehandlung von Frischbeton erläutert. Das Kapitel 2.3 beschäftigt sich mit dem Frischbetondruck auf lotrechte Schalung. Es wird ein Überblick über vorhandene Modellvorstellungen, Normen und Regelwerke gegeben und der Stand der Wissenschaft dargestellt.

2.1 Elementwände mit integriertem Dämmstoff

2.1.1 Vorteile und Einsatzgebiete

Wandbauteile in Elementbauweise mit integriertem Dämmstoff weisen gegenüber der konventionellen Ortbetonbauweise zahlreiche Vorteile auf. Abb. 2-2 zeigt die Unterschiede im Querschnittsaufbau zwischen einer Ortbetonwand, einer Elementwand mit nachträglich angebrachtem Dämmstoff und einer Elementwand mit

integriertem Dämmstoff. Die Verbindungstechnik zwischen den Betonschalen wurde nicht abgebildet, da es am Markt unterschiedlichste Systeme gibt. Einige davon werden in Kapitel 2.1.2.3 vorgestellt. Elementwände werden in Fertigteilwerken vorgefertigt, wodurch die hergestellten Bauteile hohen Qualitätsansprüchen gerecht werden können. Auf Baustellen herrscht üblicherweise ein höheres Fehleranfälligkeitspotenzial, was zu Folgekosten durch aufwendige Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen führen kann. Außerdem ist der Schalungsvorgang auf Baustellen meist sehr kosten- und zeitintensiv (Bauer 1994, Puente u. a. 2010) und lässt sich nicht wie in Fertigteilwerken automatisieren. Die beiden FT-Betonschalen einer Elementwand dienen als verlorene Schalung zur Verfüllung der Ortbetoneingängung. Bei der Ortbetonbauweise oder einer konventionellen Elementwand muss der Dämmstoff als Wärmedämmverbundsystem (WDVS) an die Wand angebracht und nachträglich verputzt werden. Eine fehlerhafte Ausführung kann zu gravierenden Bauschäden und zur Beeinträchtigung der Energiebilanz führen. Im Falle eines in der Elementwand integrierten Dämmstoffs ist dieser automatisch durch die FT-Vorsatzschale vor äußeren Witterungseinflüssen geschützt und bietet gleichzeitig eine Sichtbetonoberfläche.

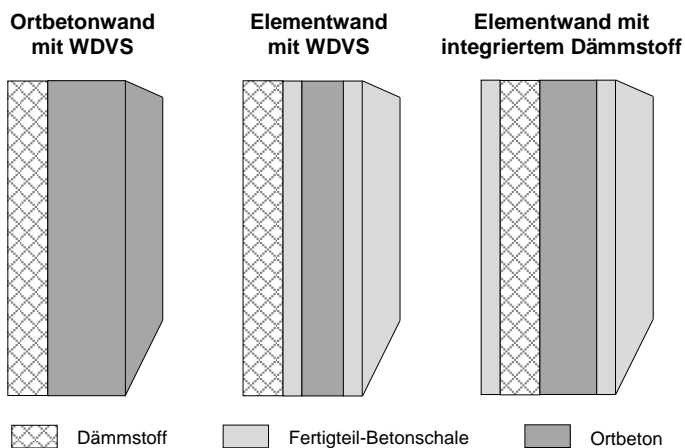


Abb. 2-2: Vergleich von verschiedenen Bauweisen für eine gedämmte Außenwand

Die Elementbauweise, ob mit oder ohne Dämmstoff, zeichnet sich in vielen Einsatzgebieten durch ihre überzeugende Wirtschaftlichkeit aus (Syspro 2009). Im Geschossbau sind solche Wandelemente vor allem für Außenwände, Trennwände, Kellerwände und Brandschutzwände von Bedeutung. Auch im Ingenieurbau werden sie zum Bau von Silos, Industriebauten, wasserundurchlässigen Bauwerken, Tiefgaragen oder Stützwänden eingesetzt. Elementwände bieten außerdem eine Alternative zur aufwendigen Schalungstechnik bei Lückenbebauung.

2.1.2 Querschnittsaufbau

Elementwände mit integriertem Dämmstoff bestehen in der Regel aus zwei außen liegenden Fertigteil-Betonschalen (FT-Vorsatzschale und FT-Tragschale), einem innen liegendem Dämmstoff sowie einem Luftspalt, der zur Verfüllung der Ortbetonergänzung auf der Baustelle vorgesehen ist (siehe Abb. 2-3).

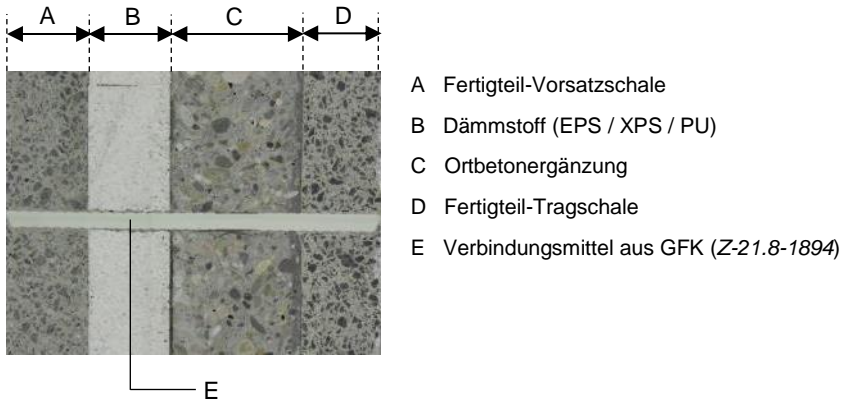


Abb. 2-3: Querschnitt einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff und Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)

Die beiden äußeren Betonschalen sind mit Verbindungsmitteln gekoppelt, die den Frischbetondruck beim Verfüllen der Ortbetonergänzung mit ausreichender Sicherheit aufnehmen müssen. Die FT-Tragschale und die Ortbetonergänzung ergeben im Endzustand die Tragschale, die zum Lastabtrag dient. Die FT-Vorsatzschale wird für den Lastabtrag nicht herangezogen und hat die Funktion, den Dämmstoff vor äußeren Einwirkungen zu schützen.

2.1.2.1 Deckschichten

Gemäß *DIN EN 1992-1-1* muss sowohl in der FT-Tragschale als auch in der FT-Vorsatzschale vertikal und horizontal eine Mindestbewehrung von $1,3 \text{ cm}^2/\text{m}$ zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens angeordnet werden. Die Mindestdicke der FT-Vorsatzschale beträgt 70 mm. Dies ist auf die festgelegten Expositionsklassen nach *DIN EN 1992-1-1/NA* (Abschnitt 10.9.9) für Sandwichtafeln zurückzuführen, da die an den Dämmstoff grenzenden Betonoberflächen der Klasse XC3 (mäßige Feuchte) zugeordnet werden müssen. Die FT-Tragschale kann deshalb in der Regel dünner ausgeführt werden. Die Betongüte beider Deckschichten richtet sich ebenfalls nach der Expositionsklasse des Bauteils.

Tab. 2-1: Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton (*DIN 1045-2*)

Expositionsklasse	XC1 / XC2	XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
Höchstzulässiger w/z-Wert	0,75	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C35/45
Mindestzementgehalt [kg/m ³]	240	260	280	300	320	320

Tab. 2-1 zeigt die Grenzwerte für die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Beton nach *DIN 1045-2*. Die Expositionsklasse XC3 fordert eine Mindestbetonfestigkeitsklasse C20/25. Dies korreliert mit den Anforderungen für zugelassene Verbindungsmittel (siehe Kapitel 2.1.2.3). Außerdem sind für die Betonrezeptur ein höchstzulässiger w/z-Wert von 0,65 und ein Mindestzementgehalt von 260 kg/m³ einzuhalten.

2.1.2.2 Dämmstoff

In der Praxis kommen in Elementwänden fast ausschließlich folgende drei Dämmstofftypen zum Einsatz:

- Expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS) nach *DIN EN 13163*
- Extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS) nach *DIN EN 13164*
- Polyurethan-Hartschaum (PU) nach *DIN EN 13165*

Druckfeste Dämmstoffe wie XPS oder PU kommen meist nur in erdberührenden Bauteilen oder im Bereich von Grundwasser zur Anwendung, da sie im Vergleich zu EPS relativ teuer sind. Eine starke Verwendung ist daher nur bei Dämmstoffen aus EPS festzustellen. Auf diese wird in Kapitel 4 ausführlich eingegangen. Die Mindestdicke des Dämmstoffs richtet sich nach dessen Einsatzgebiet (Wohngebäude, Bürogebäude, Halle usw.) und Wärmeleitfähigkeit (siehe *EnEV 2016*).

2.1.2.3 Verbindungsmittel

Als Verbindungsmittel (VBM) zur Kopplung von FT-Vorsatzschale und FT-Tragschale in mehrschichtigen Wänden sind nach *DIN EN 1992-1-1* ausschließlich korrosionsbeständige und zugelassene Verbindungsmittel einzusetzen. Beispiele für Verbindungsmittel sind:

- Filigran-Gitterträger nach *Z-15.2-40*
- Schöck Thermoanker® nach *Z-21.8-1894*
- TMDW-Anker für dreischichtige Stahlbeton-Wandtafeln nach *Z-21.8-1911*
- HALFEN Sandwichplattenanker SPA nach *Z-21.8-1926*
- HALFEN Sandwichanker MVA und FA nach *Z-21.8-1979*
- Syspro-Perfect-Verbindungsstäbe nach *Z-21.8-1927*

In der Regel werden metallische Verbindungsmittel, wie Gitterträger oder Verbundnadeln, eingesetzt. Eine Alternative bieten stabförmige Verbindungsmittel aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Diese werden aufgrund der stetig steigenden Anforderungen der Energieeinsparverordnung immer häufiger verwendet, um Transmissionswärmeverluste am Gebäude zu minimieren. Es ist zu beachten, dass die beiden oben genannten Produkte der Fa. HALFEN nicht in Elementwänden, sondern nur in Vollfertigteilwänden eingesetzt werden dürfen.

Hinsichtlich der Form kann zwischen stabförmigen Verbindungsmitteln, die in einem festgelegten Raster angeordnet werden, und linienförmigen Verbindungsmitteln, wie

dem Gitterträger, unterschieden werden. Da sich stabförmige Verbindungsmittel hervorragend zur Bestimmung des Frischbetondrucks bei experimentellen Untersuchungen eignen (siehe Abb. 3-12), wird im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf solche Verbindungsmittel gelegt. Eigenschaften und Materialkennwerte der Verbindungsmittel können den entsprechenden Zulassungen entnommen werden.

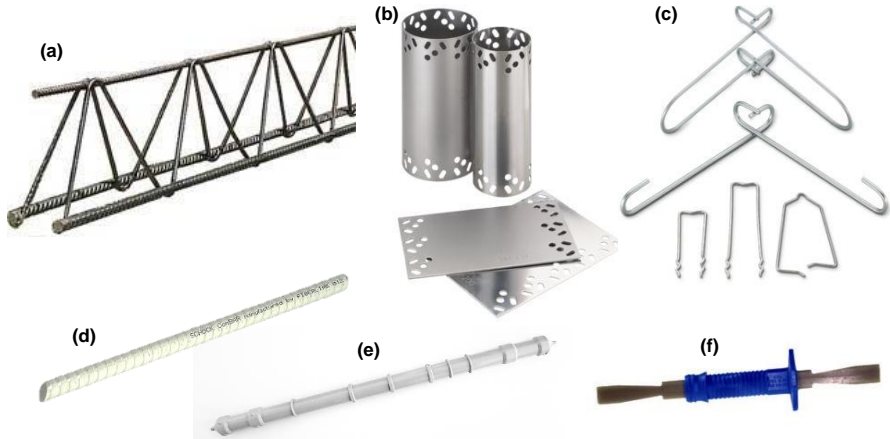


Abb. 2-4: Auswahl von am Markt verfügbaren Verbindungsmitteln: Filigran-Gitterträger (a), HALFEN Sandwichanker MVA und FA (b), HALFEN Sandwichplattenanker SPA (c), Schöck Thermoanker® (d), Syspro-Perfect-Verbindungsstab (e) u. TMDW-Anker (f)

2.1.2.4 Ortbeton

Für die Zusammensetzung und Eigenschaften des Ortbetons gelten die gleichen Grenzwerte wie für die Deckschichten. Die Mindestdicke der Ortbetonerfüllung beträgt je nach Zulassung zwischen 80 und 100 mm, um eine fachgerechte Verdichtung mit Innenrüttlern zu ermöglichen. Bei der Ausführung der Ortbetonerfüllung in Elementwänden müssen steife Betone der Konsistenzklasse F1 ausgeschlossen werden. Auch sehr fließfähige Betone oder selbstverdichtende Betone (SVB) werden gemieden, da diese sehr hohe Frischbetondrücke erzeugen und oft nur mit Betonzusatzmitteln herzustellen sind. Üblich sind weiche und fließfähige Rüttelbetone der Konsistenzklassen F3 bis F5. Ausführliche Erläuterungen zu den Frischbetoneigenschaften sind in Kapitel 2.2.2 zu finden.

2.1.3 Herstellung im Fertigteilwerk

Die Herstellung von Elementwänden mit integriertem Dämmstoff erfolgt im Fertigteilwerk in mehreren Arbeitsschritten. Im ersten Schritt wird die Schalung der FT-Vorsatzschale vorbereitet und die benötigte Bewehrung unter Sicherstellung der Mindestbetondeckung eingebaut. Anschließend wird der Beton in die Schalung eingefüllt, verdichtet und die Frischbetonoberfläche grob abgezogen. Im nächsten Schritt wird der Dämmstoff in den noch frischen Beton eingedrückt. Vorher müssen die Dämmstoffplatten vorbereitet werden, indem die Aussparungen für die Verbindungsmittel eingebracht werden. Im Falle von stabförmigen Verbindungsmitteln aus GFK werden hierzu, möglichst senkrecht zur Oberfläche, Löcher mit dem

Durchmesser des Verbindungsmittels vorgebohrt. Danach werden die Verbindungsmittel durch die Löcher in den frischen Beton eingebracht und der Beton durch Klopfen oder Rütteln nachverdichtet. Hierdurch wird ein sachgerechtes Einbinden der Verbindungsmittel in den Beton gewährleistet.



Abb. 2-5: Herstellung von Elementwänden mit integriertem Dämmstoff: Bewehren (a) und Betonieren (b) der FT-Vorsatzschale, Auflegen des Dämmstoffs (c), Installation der Verbindungsmittel (d), Bewehren und Betonieren der FT-Tragschale sowie Einwenden der FT-Vorsatzschale (e), stehende Lagerung nach der Herstellung (f)

Nach Erhärtung des Betons der FT-Vorsatzschale wird die Schalung und Bewehrung für die FT-Tragschale analog vorbereitet. Anschließend wird die FT-Vorsatzschale inklusive Dämmstoff und Verbindungsmittel in den frischen Beton der FT-Tragschale angewendet. Es ist auf eine ausreichende Rauheit der Oberfläche der FT-Tragschale zu achten, um im Endzustand einen optimalen Verbund zwischen Ortbeton und Fertigteil zu gewährleisten. Der Abstand zwischen Dämmstoff und FT-Tragschale, d. h. die Dicke der Ortbetongänzung, wird bei Verwendung von Verbindungsmitteln aus GFK meist direkt durch deren Länge gesteuert. Nach vollständiger Erhärtung werden die fertigen Elemente je nach Erfordernis zwischengelagert und anschließend

auf die Baustelle transportiert. Beim Aufrichten und Transport der Elementwände ist ein gegenseitiges Verschieben der Betonschalen zu verhindern.

2.1.4 Montage und Betonage auf der Baustelle

Während des Transports und der Montage von Elementwänden ist unbedingt darauf zu achten, dass diese nicht beschädigt werden und keine Risse in den Betonschalen entstehen. Nach Anlieferung auf der Baustelle müssen die Elementwände an der vorgesehenen Stelle montiert werden. Die an die Wand anschließende Arbeitsfuge am Fußpunkt ist vorher besenrein und möglichst verzahnt vorzubereiten. Der Grundriss der Wände muss vollständig eingemessen werden, um die Lagegenauigkeit sicherzustellen. Elementwände sind nach *DIN EN 14992* mindestens 30 mm aufzuständern (siehe Abb. 2-6). Hierzu können Montageplättchen aus Kunststoff oder Faserzement mit unterschiedlichen Höhen eingesetzt werden. Die Aufständering dient zur Herstellung einer Druckfuge bei tragenden Wänden. Bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff muss deshalb lediglich unter der FT-Tragschale eine Aufständering sichergestellt werden. Dämmstoff und FT-Vorsatzschale sind dementsprechend länger ausgeführt, um ein Kippen der Wand zu vermeiden.

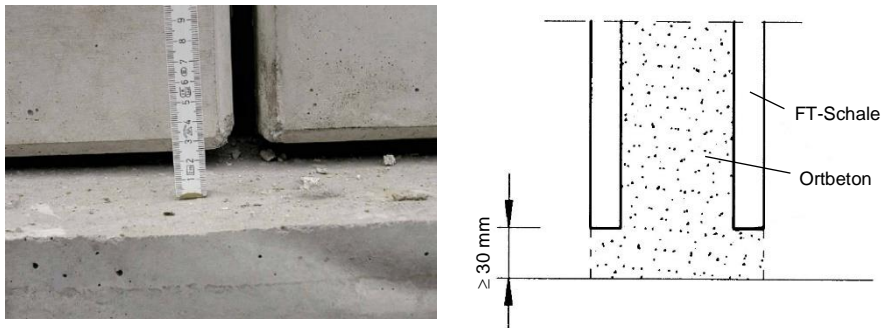


Abb. 2-6: Fachgerechte Aufständering einer Elementwand (links: *Hohmann 2011b*; rechts: *DIN EN 14992*)

Nach Aufstellen und Ausrichten der Elementwand mit Schrägstützen muss die Innenseite der FT-Tragschale und die horizontale Arbeitsfuge am Fußpunkt vorgenässt werden. Hierdurch wird verhindert, dass dem Ortbeton Wasser entzogen wird, das beim Hydratationsprozess benötigt wird. Die Aufsetzfuge am Fußpunkt muss aufgrund der Aufständering vor der Betonage verschlossen werden (siehe Abb. 2-7).

Eine besondere Sorgfalt ist beim Einbringen und Verdichten des Ortbetons gefordert. Bei der Betonage muss unbedingt auf eine Begrenzung der Fallhöhe geachtet werden. Bei einer Überschreitung von 2 m (*Beton 2013*) sollte deshalb der Beton über Rohre oder Schläuche eingefüllt werden, da sonst Entmischungsgefahr besteht. Der Ortbeton ist in Betonierlagen von maximal 50 cm einzubringen und mit Innenrüttlern bis in die darunterliegende Lage zu verdichten, um eine Verbindung der einzelnen Lagen zu erreichen (*Hohmann 2011b*). Die maximal zulässige Betoniergeschwindigkeit nach dem Ausführungsplan ist unbedingt zu beachten. Umfangreiche Informationen zum Verdichten von Frischbeton sind in Kapitel 6.1 gegeben. Nach der Betonage sind

horizontale Arbeitsfugen und vertikale Stoßfugen zwischen den Wandelementen zu verschließen.



Abb. 2-7: Vornässen der Elementwand (links: Hohmann 2011a) und Verschalung der Aufsetzfuge (rechts: Hohmann 2011b)

Hersteller bieten üblicherweise eine Montageanleitung für ihre zugelassenen Elementwände an. Beispiele hierfür sind in *FBG 2006*, *Syspro 2009*, *ELEMENTA 2013* und *Spürgin 2016* zu finden. Je nach Wandsystem können sich Besonderheiten ergeben, die beachtet werden müssen.

2.2 Frischbeton

2.2.1 Zusammensetzung

Frischbeton besteht aus den Hauptbestandteilen Zement, Gesteinskörnung und Wasser. Die Zusammensetzung des Frischbetons ist so zu wählen, dass er mit den gängigen Verfahren für das Fördern, Einbringen und Verdichten verarbeitet werden kann und die gewünschten Festbetoneigenschaften erreicht werden. Ein fertig gemischter Beton wird als Frischbeton bezeichnet, solange noch eine fachgerechte Verarbeitung und Verdichtung möglich ist (*Beton 2007*). Durch den Einsatz von Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen können die Frisch- und Festbetoneigenschaften einer Betonmischung gezielt eingestellt werden.

Betonzusatzmittel werden dem Frischbeton in kleinen Mengen in flüssiger, pulverförmiger oder granularer Form hinzugefügt, wobei sich die Mengenangaben meist auf den Zementgehalt beziehen. Zu den sog. Wirkungsgruppen gehören Betonverflüssiger, Fließmittel, Luftporenbildner, Verzögerer, Stabilisierer, Erstarrungsbeschleuniger, Schaumbildner und Schwindreduzierer (*Beton 2014*). Dabei kommen sowohl chemische als auch physikalische Wirkungsmechanismen zum Einsatz. Für eine erfolgreiche Anwendung müssen die Betonzusatzmittel bei der Mischungszusammensetzung, der Verarbeitbarkeit und der Nachbehandlung berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen Zugabemengen müssen sie jedoch nicht bei der Stoffraumrechnung einkalkuliert werden.

Betonzusatzstoffe sind feine anorganische oder organische Stoffe, die hauptsächlich die Verarbeitbarkeit des Frischbetons sowie die Dichtigkeit und Festigkeit des Festbetons beeinflussen. *DIN EN 206* unterscheidet zwei Arten von Zusatzstoffen:

- Typ-I nahezu inaktive Zusatzstoffe (z. B. Quarzmehl und Kalksteinmehl)
- Typ-II puzzolanische oder latenthdraulische Zusatzstoffe (z. B. Trass, Flugasche, Silikastaub und Hüttensandmehl)

Wegen der vergleichsweise hohen Zugabemengen sind Betonzusatzstoffe in der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen. Zusatzstoffe des Typ-II müssen auf den Zementgehalt und den w/z-Wert unter Beachtung der aufgestellten Regelungen der *DIN 1045-2* angerechnet werden.

Weitere Informationen zu Betonzusatzmittel und -stoffen können in einschlägigen Literaturquellen wie *Neroth u. Vollenschaar 2011* oder *Heidelberg 2014* nachgeschlagen werden.

2.2.2 Eigenschaften und Prüfungen

2.2.2.1 Verarbeitbarkeit

Die Verarbeitbarkeit ist ein Sammelbegriff für die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons (z. B. Viskosität, Fließgrenze oder innere Reibung), die das Verhalten beim Bereiten, Fördern, Einbringen und Verdichten beeinflussen. Sie ist keine physikalisch messbare Größe und wird überwiegend von der Sieblinie der Gesteinskörnung sowie der Menge und Konsistenz des Zementleims bestimmt. Um die erwünschten Eigenschaften des Festbetons zu erreichen, muss der Frischbeton ein gutes Zusammenhaltevermögen aufweisen. Ein Fördern ohne wesentliche Entmischung und eine vollständige Verdichtbarkeit sollte unbedingt gewährleistet sein. Die Verarbeitbarkeit von Frischbeton hat im Betonbau einen hohen Stellenwert und muss individuell je nach Einbauverfahren, Verdichtungsart, Bauteilabmessungen und Bewehrungsgrad eingestellt werden.

2.2.2.2 Frischbetonkonsistenz

Die Konsistenz ist eine übergeordnete Frischbetoneigenschaft mit der die Verarbeitbarkeit des Frischbetons klassifiziert werden kann (*Beton 2007*). Zur Bestimmung der Konsistenzklasse werden in *DIN EN 206* vier verschiedene Prüfverfahren vorgeschlagen:

- Setzzeitklassen V0 bis V4 nach *DIN EN 12350-3*
- Verdichtungsklassen C0 bis C4 nach *DIN EN 12350-4*
- Ausbreitmaßklassen F1 bis F6 nach *DIN EN 12350-5*
- Setzmaßklassen S1 bis S5 nach *DIN EN 12350-7*

In Deutschland wird bei der Bestimmung der Konsistenz fast ausschließlich das Ausbreitmaß oder, meist bei sehr steifen Betonen, das Verdichtungsmaß ermittelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Ausbreitmaß zur Definition der

Konsistenzklasse herangezogen. Eine Einstufung der Konsistenzklasse hinsichtlich des Ausbreitmaßes nach *DIN EN 12350-5* erfolgt in Tab. 2-2.

Tab. 2-2: Konsistenzklassen des Frischbetons (in Anlehnung an *Beton 2007*)

Konsistenzklasse	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Ausbreitmaß [cm]	≤ 34	35 bis 41	42 bis 48	49 bis 55	56 bis 62	≥ 63
Beschreibung	steif	plastisch	weich	sehr weich	fließfähig	sehr fließfähig
Eigenschaften des Feinmörtels	erdfeucht und etwas nasser	weich	flüssig	sehr flüssig		
Eigenschaften Frischbeton beim Schütten	lose / schollig	schollig bis zusammenhängend	schwach fließend	fließend		
Verdichtungsart	kräftig wirkende Rüttler	Rütteln		„Entlüften“ durch Stochern oder leichtes Rütteln		

Die Klassifizierung der Frischbetonkonsistenz ermöglicht die Überprüfung einer gleichbleibenden Zusammensetzung des Betongefüges. Eine Veränderung der Frischbetonkonsistenz kann somit auf eine unplanmäßige Veränderung der Mischungszusammensetzung zurückgeführt werden. Zum Zeitpunkt des Betoneinbaus muss die Konsistenz innerhalb der Grenzen der geplanten Konsistenzklasse liegen. Die Abweichungen dürfen hierbei maximal ± 3 cm betragen (*Heidelberg 2014*). Bei Transportbeton muss eine Stichprobe zur Überprüfung der Konsistenz genommen werden.

Der Marktanteil von Rüttelbetonen der Konsistenzklassen F1 bis F4 im Ortbetonbau betrug im Jahr 2010 ca. 85 bis 90 % (*Dehn u. a. 2010*). Der Anteil von sehr fließfähigen (F5 und F6) sowie selbstverdichtenden Betonen steigt in Deutschland jedoch immer mehr an. Für die Ausführung der Ortbetonergänzung in Elementwänden werden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Betone der Konsistenzklassen F2 bis F5 untersucht.

2.2.2.3 Wassergehalt und w/z-Wert

Mit dem Wassergehalt kann die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dichtigkeit eines Betons gesteuert werden. Maßgebend ist hierbei nicht der reine Wassergehalt, sondern das Verhältnis zwischen Wasser- und Zementgehalt, der sog. w/z-Wert. Die Summe aus dem Zugabewasser, der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung und dem Wasseranteil in verwendeten Zusatzmitteln und Zusatzstoffen wird als wirksamer Wassergehalt bezeichnet (*Beton 2007*). Bei poriger Gesteinskörnung muss zusätzlich deren Kernfeuchte berücksichtigt werden, woraus sich der Gesamtwassergehalt ergibt. Die Kernfeuchte kann einen positiven Einfluss auf den Hydratationsprozess haben, da sie wie eine innere Nachbehandlung wirkt. Porige Gesteinskörnung kann jedoch auch negative Auswirkungen haben, wenn sie Teile des Zugabewassers entzieht und eine steifere Konsistenz verursacht. In diesem Fall ist mit Verbundstörungen zum Festbeton zu rechnen. Im Zugabewasser dürfen keinesfalls Bestandteile enthalten sein, die einen Einfluss auf den Korrosionsschutz der Bewehrung, die Eigenschaften oder die Hydratation des Zements haben (*DIN EN 1008*).

Der w/z-Wert eines Betons steuert maßgeblich die Frisch- und Festbetoneigenschaften (siehe Abb. 2-8). Bei der Bestimmung des w/z-Wertes müssen deshalb anrechenbare Betonzusatzstoffe berücksichtigt werden.

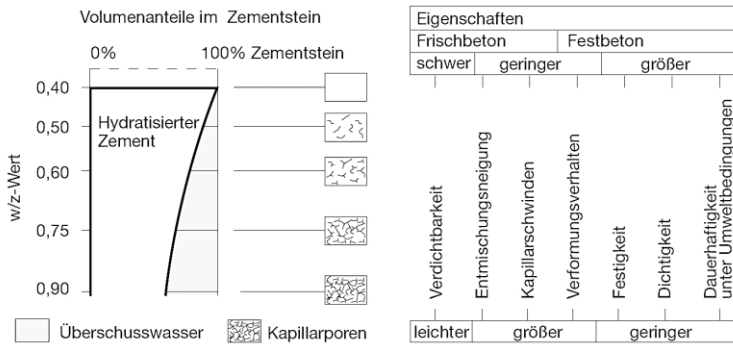


Abb. 2-8: Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit des w/z-Werts (*Beton 2007*)

Zement kann aus physikalischen und chemischen Bedingungen eine Wassermenge von maximal 40 % seiner eigenen Masse binden. Bei größeren w/z-Werten als 0,4 wird ungebundenes Wasser im Beton als Überschusswasser bezeichnet. Dieses führt zu Kapillarporen, die sich negativ auf Festigkeit und Dichtigkeit des Festbetons auswirken.

Je nach Einsatzbereich und maßgebender Expositionsklasse werden in *DIN 1045-2* höchstzulässige w/z-Werte definiert (siehe Tab. 2-1). Diese müssen beim Entwurf der Betonrezeptur unbedingt berücksichtigt werden. Mit der Höhe des w/z-Wertes können auch gleichzeitig eine Mindestdruckfestigkeitsklasse und ein Mindestzementgehalt abgeleitet werden. In der Baupraxis übliche w/z-Werte liegen zwischen 0,4 und 0,7.

2.2.2.4 Frischbetonrohddichte

Die Frischbetonrohddichte errechnet sich aus dem Quotienten zwischen Masse und Volumen des verdichteten Frischbetons. In Deutschland findet die Bestimmung der Rohddichte auf Grundlage der *DIN EN 12350-6* statt. Der Vergleich zwischen experimentell und theoretisch ermittelter Rohddichte bietet eine sehr gute Möglichkeit die Zusammensetzung des Betons zu kontrollieren. Anhand der Rohddichte wird zwischen Leichtbeton, Normalbeton und Schwerbeton unterschieden.

2.2.2.5 Luftgehalt

Durch den Luftgehalt können Rückschlüsse über die Verdichtbarkeit des Frischbetons gezogen werden. Außerdem beeinflusst er die Festigkeit sowie Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit des Festbetons. In der Regel besitzt ein vollständig verdichteter Frischbeton einen Luftporengehalt von 1 bis 2 %. Die Regeln zur Ermittlung des Luftporengehalts in Frischbeton sind in *DIN EN 12350-7* hinterlegt. Um den Frostwiderstand eines Betons zu erhöhen, können mithilfe von Luftporenbildnern gezielt Luftporen eingebracht werden. Neben einer besseren Verarbeitbarkeit resultiert hieraus jedoch auch ein Festigkeitsabfall.

2.2.2.6 Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur muss sich in einem bestimmten Bereich befinden, der weder unterschritten noch überschritten werden darf. Hohe Frischbetontemperaturen führen zu einer schlechten Verarbeitbarkeit, einem geringeren Frischbetondruck (siehe Kapitel 2.3.2), einem schnellen Erstarren und einer erhöhten Frühfestigkeit. Im Allgemeinen dürfen jedoch 30°C nicht überschritten werden. Niedrige Temperaturen führen zu gegenteiligen Auswirkungen. Die Mindesttemperatur des Frischbetons beträgt je nach Randbedingungen 5°C. Möglichkeiten zur Steuerung der Frischbetontemperatur sind die Temperierung des Zugabewassers oder der Gesteinskörnung sowie die Zugabe von Eis.

2.2.3 Bereiten, Verarbeiten und Verdichten

Für eine Übersicht über das Bereiten und Verarbeiten von Frischbeton wird auf das Zement-Merkblatt *Betontechnik B7 (Beton 2013)* verwiesen. Dieses enthält Informationen über das Anliefern, Lagern und Dosieren der Ausgangsstoffe, das Mischen und Befördern des Betons, die Verarbeitbarkeitszeit, die Vorbereitung des Betonierens, das Einbringen des Frischbetons in die Schalung und die Verdichtung. Da der Verdichtungsprozess eine wichtige Rolle für die Höhe des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff spielt, wird dieses Thema in Kapitel 6.1 ausführlich behandelt.

2.2.4 Nachbehandlung

Je nach Bauteil und Expositionsklasse ist die Nachbehandlung von jungem Beton ein sehr wichtiger Schritt bei der Betonherstellung. Erst durch die richtige Nachbehandlung werden die gewünschten Festbetoneigenschaften in oberflächennahen Bereichen erreicht. Die Nachbehandlung dient zum Schutz des jungen Betons vor vorzeitigem Austrocknen, extremen Temperaturen, Regen, mechanischen Beanspruchungen und chemischen Angriffen. Durch die Sicherstellung eines langsamen Austrocknens werden Eigenspannungen im Betongefüge vermieden. Besonders empfindlich reagiert ein junger Beton auf hohe Lufttemperaturen, geringe Luftfeuchten und hohe Windgeschwindigkeiten. Schutzmaßnahmen zur Nachbehandlung sind das Belassen des Betons in der Schalung, das Abdecken mit Folien oder wasserspeichernden Materialien, das Aufbringen von Nachbehandlungsmitteln oder Wasser sowie eine Unterwasserlagerung. Wie lange eine Nachbehandlung notwendig ist, richtet sich nach der Expositionsklasse, der Festigkeitsentwicklung und der Oberflächentemperatur des Betons.

2.3 Frischbetondruck auf lotrechte Schalung

In den Kapiteln 2.1 und 2.2 wurden Grundlagen zu Elementwänden mit integriertem Dämmstoff erarbeitet und das Thema Frischbeton behandelt. Ein Verständnis für beide Themengebiete ist Voraussetzung für die Untersuchung des Frischbetondrucks.

Die äußeren Betonschalen einer Elementwand in Kombination mit deren Verbindungsmitteln wirken wie ein in sich geschlossenes, verlorenes Schalungssystem. Schalungen stellen temporäre Konstruktionen dar und haben die Aufgabe, den Frischbeton in die gewünschte Form zu bringen und den Frischbetondruck sicher aufzunehmen. Bei einer Überschätzung des Frischbetondrucks können überhöhte Kosten entstehen, da die Schalung zu massiv ausgeführt wird. Wird der Frischbetondruck jedoch unterschätzt, kann es zum Versagen der Schalung kommen. Gleiches gilt für eine Elementwand mit integriertem Dämmstoff. Daher ist eine genaue Kenntnis des Frischbetondrucks in solchen Wandelementen wichtig, um die Verbindungsmittel als auch die Betonschalen wirtschaftlich dimensionieren zu können.

Im Folgenden findet die allgemeine Betrachtung von Modellen zur Beschreibung einer Frischbetondruckbeanspruchung statt. Anschließend werden Berechnungsmethoden aus vorhandenen Normen und Regelwerken erläutert und miteinander verglichen. Am Ende wird eine kurze Zusammenfassung über den Stand der Wissenschaft gegeben.

2.3.1 Modellvorstellungen und Berechnungsansätze

Generell kann bei Modellvorstellungen zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks zwischen zwei Arten unterschieden werden. Zum einen gibt es theoretische Modelle, die auf den mechanischen und rheologischen Eigenschaften des Frischbetons basieren. Zum anderen existieren empirische Modelle, welche auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen entwickelt wurden. Die Kapitel 2.3.1.1 bis 2.3.1.3 beinhalten theoretische Modelle ohne Berücksichtigung der Verdichtungswirkung von Innenrüttlern. Kapitel 2.3.1.4 fasst empirisch abgeleitete Berechnungsansätze zusammen, die eine Verdichtungswirkung beachten.

2.3.1.1 Hydrostatischer Ansatz

Bei dem hydrostatischen Berechnungsansatz wird der Frischbeton als eine homogene Flüssigkeit angenommen. Der Seitendruckbeiwert λ stellt das Verhältnis zwischen Horizontal- und Vertikalspannung dar. Bei einer Newtonschen Flüssigkeit, wie z. B. Wasser, oder bei durch Vibrationen vollständig verflüssigtem Beton sind Horizontal- und Vertikalspannung immer gleich. D. h. der Seitendruckbeiwert beträgt 1,0. Man spricht von einem hydrostatischen Verhalten. Der Druck baut sich von der Oberfläche des Frischbetons linear mit der Frischbetonrohweite in die Tiefe auf.

$$\sigma_h = \sigma_v = \gamma_{OB} \cdot h \quad (2-1)$$

mit: γ_{OB} Rohweite des Ortbetons
 h Betonierhöhe

Der hydrostatische Ansatz liegt immer auf der sicheren Seite, solange der Frischbeton von oben eingefüllt wird und keine übermäßig starke Verdichtung mit Innenrüttlern stattfindet. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei dünnen Bauteilen sogar bereichsweise höhere Drücke auftreten können (CIRIA 1985). Auch eigene Untersuchungen in den Kapiteln 3 und 7 bestätigen dies. Bei Verwendung von Außenrüttlern ist nach *DIN 18218* immer hydrostatischer Druck über die Bauteilhöhe anzusetzen. Die Erstarrung des Frischbetons wird bei diesem Ansatz auf der sicheren Seite liegend nicht berücksichtigt.

2.3.1.2 Bodenmechanischer Ansatz

Ohne Erstarrung

Bei dem bodenmechanischen Ansatz ohne Berücksichtigung der Erstarrung wird der Frischbeton als ein Material, in diesem Fall Boden, mit einem inneren Reibungswinkel φ angenommen. Die Berechnung des Frischbetondrucks erfolgt nach der Erddrucktheorie, bei der sich der Seitendruckbeiwert λ in Abhängigkeit des inneren Reibungswinkels und der Nachgiebigkeit der Stützfläche (Schalung) ergibt. Die Kohäsion des Materials wird nicht berücksichtigt.

$$\sigma_h = \lambda \cdot \gamma_{OB} \cdot h \quad (2-2)$$

Nach *DIN 4085* muss bei den Erddruckansätzen zwischen nachgiebigen, wenig nachgiebigen, annähernd unnachgiebigen und unnachgiebigen Stützkonstruktionen unterschieden werden. Auch russische Vorschriften machen einen Unterschied zwischen nachgiebiger und starrer Schalung (Toussaint 1973). Sinngemäß muss für nachgiebige Stützkonstruktionen mit dem aktiven und für unnachgiebige Stützkonstruktionen sogar in Ausnahmefällen mit dem Erdruhedruck gerechnet werden. Die Reibung zwischen Frischbeton und der Stützkonstruktion (Schalung) wird nicht berücksichtigt. Mit der zusätzlichen Annahme einer lotrecht zum Boden verlaufenden Schalung ergeben sich für den Seitendruckbeiwert bei aktivem Erddruck λ_a und bei Erdruhedruck λ_r folgende Gleichungen:

$$\lambda_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2-3)$$

$$\lambda_r = 1 - \sin \varphi \quad (2-4)$$

Das Hauptproblem bei der Anwendung des bodenmechanischen Ansatzes ist die Bestimmung des inneren Reibungswinkel φ des Frischbetons. In der Literatur werden verschiedene Werte angegeben. *Ritchie 1962* hat für mehrere Betone den inneren Reibungswinkel bestimmt. Bei einem Setzmaß von 127 mm (Setzmaßklasse S3) betrug der innere Reibungswinkel bspw. 8° und bei einem Setzmaß von 20 mm (Setzmaßklasse S1) sogar 34° . Genauere Erläuterungen hierzu und ergänzende Forschungsergebnisse aus *Specht 1973* werden in Kapitel 7 zusammenfassend dargestellt.

Mit Erstarrung

Neben den zuvor getroffenen Annahmen wird bei dem bodenmechanischen Ansatz mit Erstarrung eine zeitliche Veränderung des Seitendruckbeiwerts λ angenommen. Durch die Erstarrung des Betons verringert sich der Seitendruckbeiwert bzw. der innere Reibungswinkel des Frischbetons φ vergrößert sich. Auch hier findet die Reibung zwischen Frischbeton und Schalung keine Berücksichtigung.

Ausgehend vom Seitendruckbeiwert von Frischbeton zum Zeitpunkt Null λ_0 nimmt dieser mit der Erstarrung des Betons zunehmend ab, bis diese zum Zeitpunkt t_E abgeschlossen ist. Dann wird λ zu Null. Der zeitliche Verlauf des Seitendruckbeiwerts kann nach *Specht 1981* als lineare Funktion beschrieben werden:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \frac{t_E - t}{t_E - t_r} = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_E}\right) \quad (2-5)$$

- mit: t_E Erstarrungsende des Frischbetons
 t_r Zeit zum Einbringen einer nicht gerüttelten Betonschicht
 λ_0 Seitendruckbeiwert von Frischbeton zum Zeitpunkt Null

Bei dem bodenmechanischen Ansatz mit Erstarrung wird grundsätzlich zwischen zwei Modellen unterschieden. Bei **Grundmodell A** wird der Druck durch Integration der stetigen Horizontaldruckzuwächse $\Delta\sigma_h$ über die Betonierhöhe dh bestimmt:

$$\sigma_{h,A} = \int_0^{h_E} \lambda(t) \cdot \gamma_{OB} \cdot dh = \int_0^{t_E} \lambda(t) \cdot \gamma_{OB} \cdot v \cdot dt \quad (2-6)$$

Mit jedem weiteren Zeitschritt werden die Druckzuwächse immer kleiner. Der absolute Frischbetondruck wird jedoch stets größer, da die Zuwächse kontinuierlich aufaddiert werden. Nach Lösung von Gleichung (2-6) mithilfe von Gleichung (2-5) ergibt sich zur Errechnung des horizontalen Drucks in einer beliebigen Höhe folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{h,A} = \gamma_{OB} \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E \cdot h}{v \cdot (t_E - t_r)} - \frac{h^2}{2 \cdot v^2 \cdot (t_E - t_r)}\right) \quad (2-7)$$

Der maximale Druck entsteht in der Höhe h_E bei Erreichen des Erstarrungsendes t_E des Frischbetons:

$$\begin{aligned}\sigma_{h,A,\max} &= \gamma_{OB} \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E \cdot h_E}{v \cdot (t_E - t_r)} - \frac{h_E^2}{2 \cdot v^2 \cdot (t_E - t_r)}\right) \\ \Leftrightarrow \sigma_{h,A,\max} &= \gamma_{OB} \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E^2 \cdot v}{v \cdot (t_E - t_r)} - \frac{t_E^2 \cdot v^2}{2 \cdot v^2 \cdot (t_E - t_r)}\right) \\ \Leftrightarrow \sigma_{h,A,\max} &= \gamma_{OB} \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t_r}{t_E}\right) \cdot \left(\frac{t_E^2}{2 \cdot (t_E - t_r)}\right) \\ \Leftrightarrow \sigma_{h,A,\max} &= \gamma_{OB} \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot \frac{t_E}{2}\end{aligned}\quad (2-8)$$

Grundmodell A wurde u. a. für die Entwicklung der *DIN 18218* herangezogen (siehe Kapitel 2.3.2.1).

In **Grundmodell B** wird angenommen, dass sich der Frischbetondruck aus dem Produkt aus dem in der Höhe h entstehenden Vertikaldruck und dem zum gleichen Zeitpunkt vorhandenen Seitendruckbeiwert $\lambda(t)$ berechnet.

$$\sigma_{h,B} = \lambda(t) \cdot \gamma_{OB} \cdot v \cdot t \quad (2-9)$$

Aus dem Produkt zweier linearer Funktionen entsteht eine parabelförmige Verteilung des Frischbetondrucks. Aus Gleichung (2-9) ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung (2-5):

$$\sigma_{h,B} = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_E}\right) \cdot \gamma_{OB} \cdot v \cdot t = \gamma_{OB} \cdot \lambda_0 \cdot \left(h - \frac{h^2}{v \cdot t_E}\right) \quad (2-10)$$

Der maximale Frischbetondruck entsteht bei Grundmodell B bereits in der Höhe $0,5 \cdot h_E$:

$$\begin{aligned}\sigma_{h,B,\max} &= \gamma_{OB} \cdot \lambda_0 \cdot \left(\frac{h_E}{2} - \frac{h_E^2}{4 \cdot v \cdot t_E}\right) \\ \Leftrightarrow \sigma_{h,B,\max} &= \gamma_{OB} \cdot \lambda_0 \cdot \left(\frac{v \cdot t_E}{2} - \frac{v^2 \cdot t_E^2}{4 \cdot v \cdot t_E}\right) \\ \Leftrightarrow \sigma_{h,B,\max} &= \gamma_{OB} \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot \frac{t_E}{4}\end{aligned}\quad (2-11)$$

Der maximale Druck nach Grundmodell B entspricht genau der Hälfte des maximalen Drucks nach Grundmodell A. Nach *DAfStb 567* ist eine ausreichende Verformbarkeit des Schalungssystems eine wichtige Voraussetzung zur Anwendung von Grundmodell B.

Die Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe nach beiden Grundmodellen ist in Abb. 2-9 exemplarisch dargestellt. Die Abbildung bestätigt, dass bei Anwendung von Grundmodell B wesentlich geringere Drücke auftreten als bei Grundmodell A.

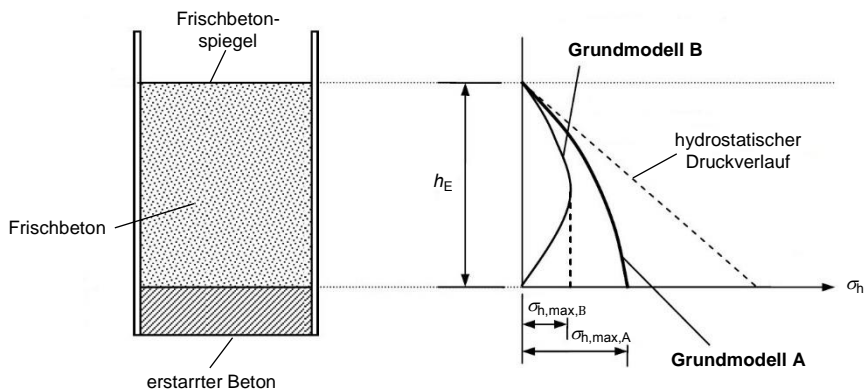


Abb. 2-9: Verteilung des Frischbetondrucks bei den bodenmechanischen Ansätzen mit Erstarrung (Grundmodell A und Grundmodell B) (in Anlehnung an Proske 2007)

Da bei der Betonage von Elementwänden fast nie die Betonierhöhe zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes erreicht wird, hängt der prozentuale Unterschied zwischen Grundmodell A und Grundmodell B von den gegebenen Randbedingungen ab. Abb. 2-10 zeigt beispielhaft den Vergleich der beiden Modelle bei einer hohen und bei einer niedrigen Betoniergeschwindigkeit. Es ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen beiden Modellen bei einer niedrigen Betoniergeschwindigkeit deutlich höher ausfällt als bei einer hohen Betoniergeschwindigkeit.

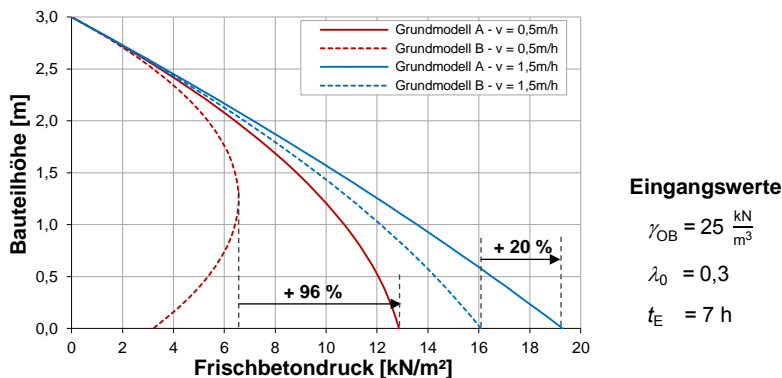


Abb. 2-10: Einfluss der Betoniergeschwindigkeit bei Grundmodell A und B

2.3.1.3 Ansatz nach Silotheorie

Ohne Erstarrung

Die Silotheorie basiert auf der Annahme, dass durch Reibungskräfte zwischen Schalungsoberfläche und Frischbeton eine Reduktion des horizontalen

Frischbetondrucks hervorgerufen wird. Vor allem bei sehr engen Schalungen ist eine beträchtliche Abminderung des Frischbetondrucks festzustellen, weil der prozentuale Anteil der Reibungsfläche im Vergleich zum Frischbetonvolumen viel höher ist (Toussaint 1973).

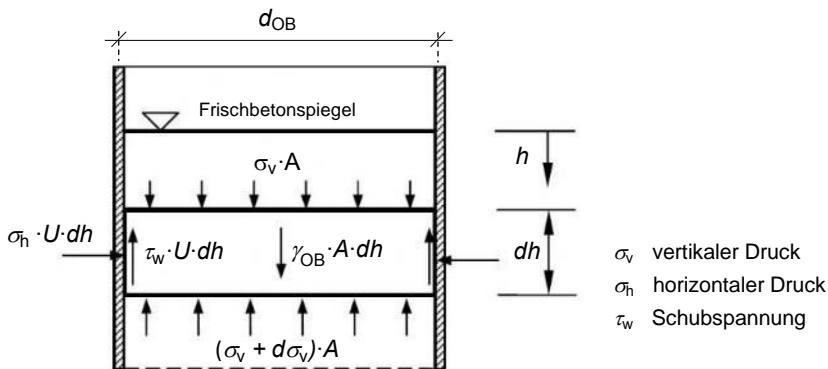


Abb. 2-11: Kräftegleichgewicht im Silo- bzw. Schalungsschaft (in Anlehnung an DAfStb 567)

Wie hoch der Einfluss der Silowirkung ist, hängt von dem Verhältnis zwischen der Ortbetondicke d_{OB} und dem Reibungskoeffizienten μ (unter der Annahme, dass die Kohäsion bzw. Adhäsion gleich Null ist (Proske 2007)) zwischen Frischbeton und Schalung ab. Bei gleichem Verhältnis dieser beiden Einflussparameter resultiert auch die gleiche Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe. Abb. 2-11 zeigt eine schematische Darstellung des Kräftegleichgewichts im Silo- bzw. Schalungsschaft nach der Silotheorie nach Janssen 1895 bzw. nach dem sog. Scheibenelementverfahren. Es ist ersichtlich, dass der vertikale Druck und gleichzeitig der horizontale Druck in einer Schalung durch die Reibung des Frischbetons an den Schalungsflächen verringert werden.

Nach Bildung des Kräftegleichgewichts am Scheibenelement und Umformung der Gleichung errechnet sich der horizontale Frischbetondruck zu:

$$\sigma_h = \frac{\gamma_{OB} \cdot A}{U \cdot \mu} \cdot \left[1 - e^{-\frac{U \cdot \mu \cdot \lambda}{A} \cdot h} \right] \quad (2-12)$$

$$\sigma_h = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{OB} \cdot d_{OB}}{\mu} \cdot \left[1 - e^{-\frac{2 \cdot \lambda \cdot \mu}{d_{OB}} \cdot h} \right] \quad (2-13)$$

- mit:
- λ Seitendruckbeiwert des Frischbetons
 - μ Reibungskoeffizient zwischen Frischbeton und Schalung
 - d_{OB} Dicke der Ortbetonergänzung
 - h Betonierhöhe
 - A Querschnittsfläche der Schalung
 - U Umfang der Schalung

Der maximale Frischbetondruck nach Silotheorie ergibt sich, wenn die Betonierhöhe gegen unendlich strebt:

$$\sigma_{h,\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{OB} \cdot d_{OB}}{\mu} \quad (2-14)$$

Mit Erstarrung

Beispiele für den Ansatz der Silotheorie unter Berücksichtigung der Erstarrung sind die in den Kapiteln 2.3.2.2 und 2.3.2.3 beschriebenen Verfahren nach *CIRIA 1985* und *CIB-CEB-FIP 1977*. Ein weiteres Beispiel ist das Verfahren nach Proske/Schuon, welches in *DAfStb 567* detailliert erläutert wird. Alle drei Verfahren haben gemein, dass für den maximalen Frischbetondruck drei theoretisch mögliche Grenzwerte definiert werden.

Das Minimum aus den drei Grenzwerten entspricht dem maximalen Frischbetondruck:

- Grenzwert infolge Erstarren des Frischbetons
- Grenzwert aus dem Siloeffekt
- Hydrostatischer Grenzwert aus der tatsächlichen Betonierhöhe

Zur Anwendung der Silotheorie sind genaue Angaben über den Reibungskoeffizienten μ zwischen Frischbeton und Schalung notwendig. Für glatte Schalungen wurden in *Proske 2007* und *Specht 1973* Werte für μ ermittelt. In Hinblick auf Elementwände mit integriertem Dämmstoff ergeben sich jedoch völlig andere Werte, da die beiden Schalungsoberflächen aus Dämmstoff und Beton bestehen. Für die Entwicklung eines realitätsnahen Modells zur Berechnung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff wird deshalb die Weiterverfolgung eines Ansatzes nach Silotheorie als nicht sinnvoll erachtet. Das Reibungsverhalten zwischen Frischbeton und Schalungsoberfläche wird somit in den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen nicht gesondert betrachtet.

2.3.1.4 Empirisch abgeleitete Berechnungsansätze

Bei empirischen Berechnungsansätzen handelt es sich um Modelle, die auf Grundlage von vorliegenden Frischbetondruckmessungen an Bauteilen abgeleitet wurden. Da die durchgeführten Druckmessungen meist bestimmten Randbedingungen unterliegen, sind diese nicht allgemeingültig anwendbar. Es werden vier verschiedene Ansätze vorgestellt.

Ansatz nach Rodin 1952

Rodin veröffentlichte bereits im Jahr 1952 ein einfaches Modell, das die Berechnung des Frischbetondrucks in Abhängigkeit der Betoniergeschwindigkeit v ermöglicht und zwischen Rüttelbeton und gestochertem Beton (siehe Tab. 2-2) unterscheidet.

$$\sigma_{h,\max} = \min \left| \begin{array}{l} \sigma_{h,\max,1} \\ \sigma_{h,\max,2} \end{array} \right. \quad (2-15)$$

$$\sigma_{h,\max,1} = 39,2 \cdot v^{\frac{1}{3}} \quad \text{für Rüttelbeton} \quad (2-16)$$

$$\sigma_{h,\max,1} = 29,2 \cdot v^{\frac{1}{3}} \quad \text{für gestocherten Beton} \quad (2-17)$$

$$\sigma_{h,\max,2} = \gamma_{\text{OB}} \cdot h \quad (2-18)$$

Der Ansatz basiert auf eine Frischbetonrohichte von $23,5 \text{ kN/m}^3$, eine Frischbetontemperatur von 21°C und ein Setzmaß des Frischbetons von 150 mm .

Ansatz nach *Ertinghausen 1965*

Ertinghausen 1965 verfolgt einen ähnlichen Ansatz wie *Rodin 1952*, bei dem sich der maximale Frischbetondruck aus dem Minimum zweier Grenzwerte errechnet (siehe (2-15)). Es wird jedoch nicht zwischen der Konsistenz des Betons, sondern der Betoniergeschwindigkeit unterschieden:

$$\sigma_{h,\max,1} = 30 \cdot v^{\frac{1}{4}} \quad \text{für } v \leq 4 \text{ m/h} \quad (2-19)$$

$$\sigma_{h,\max,1} = 36 \cdot v^{\frac{1}{4}} \quad \text{für } 5 \text{ m/h} \leq v \leq 6 \text{ m/h} \quad (2-20)$$

Als zweiter Grenzwert gilt auch hier der hydrostatische Druck nach Gleichung (2-18).

Ansatz nach *ACI 347-14*

Das Verfahren nach dem „American Concrete Institute“ (ACI) aus dem Jahr 2014 ist ebenfalls ein empirisch abgeleitetes Berechnungsverfahren. Vorgängerversionen stammen aus den Jahren 1978 und 2004. Der Ansatz berücksichtigt die Rohichte des Ortbetons, die Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen, die Betoniergeschwindigkeit, die Betonierhöhe und die Frischbetontemperatur beim Einbau. Eine detaillierte Erläuterung des Ansatzes wird in Kapitel 2.3.2.4 gegeben.

Ansatz nach *Gardner 1985*

Nach *Gardner 1985* werden ebenfalls zwei Grenzwerte unterschieden. Bei der Berechnung wird die Eintauchtiefe des Rüttlers h_v , die kleinste Querschnittsdicke b , die Betoniergeschwindigkeit v , die Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{\text{OB, Einbau}}$, die Verwendung von Flugasche oder Hüttensand und das Setzmaß des Frischbetons s berücksichtigt. Die Gleichungen gelten für eine Frischbetonrohichte von 24 kN/m^3 .

$$\sigma_{h,max,1} = 24 \cdot h_v + \frac{3 \cdot HP}{b} + \frac{b}{0,04} + \frac{400 \cdot v^{\frac{1}{2}}}{18 + T} \cdot \left(\frac{100}{100 - \%F} \right) + \frac{s - 75}{10} \quad (2-21)$$

$$\sigma_{h,max,2} = 24 \cdot h \quad (2-22)$$

- mit: *HP* Leistung des Innenrüttlers in PS (sofern kein Wert vorliegt, kann dieser zu 0,75 angenommen werden)
- b* kleinste Querschnittsdicke des zu betonierenden Bauteils in m
- F* Anteil an Flugasche oder Hochofenzement am gesamten Zementgehalt in Prozent

Der Ansatz von *Gardner 1985* ist die Grundlage für die Berechnung des Frischbetondrucks nach der kanadischen Norm *CAN/CSA S269.3* (siehe Kapitel 2.3.2.5).

2.3.2 Normen und Regelwerke

Aktuell gibt es mehrere Methoden, mit unterschiedlicher nationaler Gültigkeit, zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks, welche aus den vergangenen Jahrzehnten von nationalen Normungsinstituten oder von wissenschaftlichen Vereinigungen stammen. Alle Dokumente beziehen sich auf die Berechnung des Frischbetondrucks auf glatte Schalungen und berücksichtigen damit nicht die gegebenen Randbedingungen einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff. Die wichtigsten Dokumente sind:

- DIN 18218 (2010)
 - CIRIA Research Report No. 108 (1985)
 - CIB-CEB-FIP Manuel de Technologie "Coffrage" (1977)
 - ACI 347-14 (2014)
 - CAN/CSA S269.3 (1992)
- } **Europa**
- } **USA**
- } **Kanada**

Der Entwurf und die Bemessung von Traggerüsten wird in Europa in der europäischen Norm *DIN EN 12812* geregelt, welche vom Technischen Komitee CEN TC/53 „Temporäre Konstruktionen für Bauwerke“ erarbeitet wurde. Traggerüste werden in der Regel eingesetzt, um die vom eingebauten Frischbeton erzeugten Lasten so lange aufzunehmen, bis die Konstruktion die Last selbst aufnehmen kann. Nach Abschnitt 8.2.3.2 der genannten Norm ist neben Einwirkungen wie der Eigenlast, Schnee- und Eislasten oder Lasten infolge des Arbeitsbetriebs auch der senkrecht zur Schalhaut wirkende Frischbetondruck in der Bemessung zu berücksichtigen. Zur Bestimmung des Frischbetondrucks sind die drei erstgenannten Dokumente zugelassen (*Proske u. a. 2014*). Für die USA bzw. Kanada sind die Regelungen zur Bestimmung des horizontalen Frischbetondrucks in der *ACI 347-14* bzw. der *CAN/CSA S269.3* festgehalten. Neben den oben genannten Normen und Regelwerken gibt es noch weitere, die u. a. in *Proske 2007*, *Proske u. a. 2014* und

DAfStb 567 genannt und erläutert werden. Diese sind jedoch meist sehr alt. Durch betontechnologische und baubetriebliche Entwicklungen in den vergangenen Jahrzehnten entsprechen diese Regelwerke meist nicht mehr dem Stand der Technik und werden deshalb in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Im Folgenden werden die fünf wichtigsten Dokumente kurz erläutert.

2.3.2.1 DIN 18218: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen

Allgemein

Aktuell steht dem Tragwerksplaner in Deutschland zur Ermittlung des horizontalen Frischbetondrucks und zur Bemessung der Verbindungsmittel in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff die *DIN 18218* „Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen“ zur Verfügung. Diese ist für die Bemessung von glatter Schalung vorgesehen und berücksichtigt folgende Einflussparameter:

- Erstarrungsende des Ortbetons t_E
- Konsistenzklasse des Ortbetons K
- Betoniergeschwindigkeit v

Die Berechnung des charakteristischen Werts des maximalen Frischbetondrucks $\sigma_{hk,max}$ nach *DIN 18218* unterliegt folgenden Randbedingungen:

- Die Ortbetonrohichte γ_{OB} beträgt 25 kN/m³.
- Das tatsächliche Erstarrungsende des in die Schalung eingebauten Frischbetons überschreitet t_E nicht.
- Der Frischbeton der Konsistenzklassen F1 bis F6 wird mit Innenrüttlern verdichtet.
- Die Schalung ist dicht.
- Die mittlere Betoniergeschwindigkeit v beträgt bei der Verwendung von Betonen der Konsistenzklassen F1 bis F4 höchstens 7,0 m/h.
- Der Beton wird gegen die Betonierrichtung (von oben) eingebracht.

Innerhalb dieser Randbedingungen wird der maximale, horizontale Frischbetondruck gemäß der Angaben in Tab. 2-3 berechnet.

Tab. 2-3: Charakteristische Werte des maximalen, horizontalen Frischbetondrucks in Abhängigkeit der Konsistenzklasse (in Anlehnung an *DIN 18218*)

Konsistenzklasse	$\sigma_{hk,max}$ [kN/m ²]
F1	$(5 \cdot v + 21) \cdot K1 \geq 25$
F2	$(10 \cdot v + 19) \cdot K1 \geq 25$
F3	$(14 \cdot v + 18) \cdot K1 \geq 25$
F4	$(17 \cdot v + 17) \cdot K1 \geq 25$
F5	$25 + 30 \cdot v \cdot K1 \geq 30$
F6	$25 + 38 \cdot v \cdot K1 \geq 30$
SVB	$25 + 33 \cdot v \cdot K1 \geq 30$

Der Parameter v charakterisiert die Betoniergeschwindigkeit. Der Faktor $K1$ kann der Tab. 2-4 entnommen werden und berücksichtigt das Erstarrungsverhalten des Betons.

Tab. 2-4: Faktoren $K1$ zur Berücksichtigung der Erstarrung (in Anlehnung an DIN 18218)

Konsistenzklasse	Faktoren $K1$			
	$t_E = 5h$	$t_E = 10h$	$t_E = 20h$	Allgemein **)
F1 *)	1,0	1,15	1,45	$1 + 0,03 \cdot (t_E - 5)$
F2 *)	1,0	1,25	1,80	$1 + 0,053 \cdot (t_E - 5)$
F3 *)	1,0	1,40	2,15	$1 + 0,077 \cdot (t_E - 5)$
F4 *)	1,0	1,70	3,10	$1 + 0,14 \cdot (t_E - 5)$
F5, F6, SVB	1,0	2,00	4,00	$t_E / 5$

*) Gilt für Betonierhöhen h bis 10 m

***) Gilt für $5 h \leq t_E \leq 20 h$; t_E in h

Das Erstarrungsende des Ortbetons t_E 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 ermittelt werden. Die Erstarrungszeit ist von der Betonrezeptur und den Temperaturbedingungen (Frischbeton- und Umgebungstemperatur) abhängig. Zur Abschätzung des Erstarrungsendes in Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung und Temperatur des frischen Ortbetons werden in DIN 18218 Angaben gemacht (siehe Tab. 2-5).

Tab. 2-5: Abschätzung des Erstarrungsendes t_E nach Angaben der DIN 18218

Randbedingungen		Erstarrungsende t_E
Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 206	Frischbetontemperatur	
„schnell“	> + 15°C	5 h
„mittel“	> + 20°C	
„schnell“	> + 10°C	7 h
„mittel“	> + 15°C	
„langsam“	> + 20°C	

Hinweise:
Die Angaben gelten nur, sofern keine verzögernd wirkenden Zusatzmittel eingesetzt werden und die Festigkeitsklasse mindestens C20/25 beträgt. Bei Betonen mit der Festigkeitsentwicklung „sehr langsam“, niedrigeren Frischbetontemperaturen und dem Einsatz von verzögernd wirkenden Zusatzmitteln ist eine Abschätzung von t_E nur schwer möglich, insbesondere bei Verwendung von Fließmitteln.

Zu Beginn einer Betonage wirkt immer hydrostatischer Druck auf die Schalung, bis die sog. Druckhöhe h_S erreicht wird. Diese kennzeichnet die Betonierhöhe, bei der der maximale Frischbetondruck erreicht wird.

$$h_S = \frac{\sigma_{hk,max}}{\gamma_{OB}} \tag{2-23}$$

Ab der Höhe h_S wird der Druck konstant angenommen, bis die Höhe h_E erreicht wird. h_E stellt die Betonierhöhe zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes des Ortbetons t_E dar. Nach Erreichen des Erstarrungsendes wird davon ausgegangen, dass der Frischbetondruck den Wert Null annimmt (siehe Abb. 2-12). Es ist zu beachten, dass bei Betoneinbau von unten mit einer Betonpumpe immer hydrostatischer Druck über die gesamte Schalungshöhe angesetzt werden muss.

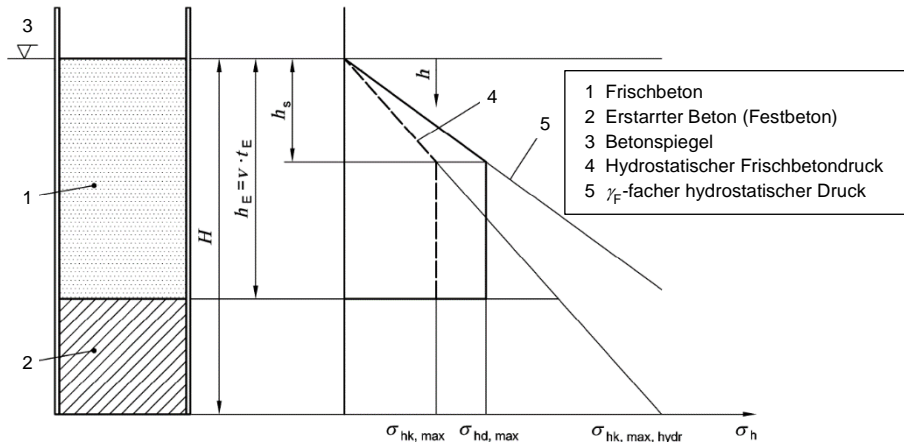


Abb. 2-12: Verteilung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe nach *DIN 18218*

Der charakteristische Wert des Frischbetondrucks ist für die Bemessung von Rüstung und Schalung mit einem Teilsicherheitsbeiwert zu multiplizieren:

$$\sigma_{hd} = \gamma_F \cdot \sigma_{hk} \quad (2-24)$$

mit: σ_{hd} Bemessungswert des horizontalen Frischbetondrucks
 σ_{hk} Charakteristischer Wert des horizontalen Frischbetondrucks
 γ_F Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung „Frischbetondruck“
 1,5 für ungünstige Einwirkungen im GZT
 1,0 für günstige Einwirkungen im GZT

Berücksichtigung der Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{OB, Einbau}$

Nach *DIN 18218* ist die Frischbetontemperatur beim Einbau des Betons $T_{OB, Einbau}$ zu berücksichtigen, wenn diese von der Frischbetontemperatur $T_{OB, ref}$, die der Bestimmung des Erstarrungsendes t_E zugrunde liegt, abweicht:

$T_{OB, Einbau} > T_{OB, ref}$ Verringerung von $\sigma_{hk, max}$ um 3 % je 1 K (F1 bis F6, SVB)
 (maximal 30 %)

$T_{OB, Einbau} < T_{OB, ref}$ Erhöhung von $\sigma_{hk, max}$ um 3 % je 1 K (F1 bis F4)
 (maximal 10 K)

Erhöhung $\sigma_{hk, max}$ um 5 % je 1 K (F5, F6, SVB)
 (maximal 5 K)

Berücksichtigung der Außenlufttemperatur T_A

Der Einfluss von im Vergleich zur Frischbetontemperatur niedrigeren Außenlufttemperaturen T_A muss bei der Bestimmung des Frischbetondrucks nicht berücksichtigt werden, wenn sich die Frischbetontemperatur T_{OB} durch wärmedämmende Maßnahmen im Vergleich zu $T_{OB, Einbau}$ nicht verringert. Andernfalls gilt:

$T_{OB} < T_{OB, Einbau}$ Erhöhung von $\sigma_{hk, max}$ um 3 % je 1 K (F1 bis F4)
(maximal 10 K)

Erhöhung $\sigma_{hk, max}$ um 5 % je 1 K (F5, F6, SVB)
(maximal 5 K)

Der Einfluss von im Vergleich zur Frischbetontemperatur höheren Außenlufttemperaturen T_A darf nicht berücksichtigt werden.

$T_{OB} > T_{OB, Einbau}$ keine Verringerung von $\sigma_{hk, max}$ zulässig

Berücksichtigung der Rohwichte des Ortbetons γ_{OB}

Der errechnete Frischbetondruck nach Tab. 2-3 basiert auf einer Rohwichte von 25 kN/m³. Weicht die vorhandene Rohwichte von diesem Wert ab, so ist $\sigma_{hk, max}$ mit dem Faktor K_2 zu multiplizieren:

$$K_2 = \frac{\gamma_{OB}}{25} \quad (2-25)$$

Berücksichtigung der Verdichtung

Die beschriebenen Regeln zur Berechnung des Frischbetondrucks gelten für leistungsstarke Rüttler des üblichen Hochbaus (Rüttlergruppe 3 nach *DIN 4235-1*). Eine Verminderung des Drucks für leistungsschwächere Rüttler (Rüttlergruppe 1 und 2) darf nicht vorgenommen werden. Beim Einsatz von Außen- und Schalungsrüttlern ist hydrostatischer Druck bis zum Erreichen des Erstarrungsendes anzusetzen.

Die Berechnungen nach *DIN 18218* gelten bei Betonen der Konsistenzklassen F1 bis F4 für Eintauchtiefen des Innenrüttlers h_V bis zur hydrostatischen Druckhöhe h_S . Der Zuwachs der hydrostatischen Druckhöhe beim schnelleren Betonieren entspricht deshalb gleichzeitig einem tieferen Eintauchen der Rüttelflasche. Bei den Konsistenzklassen F5 und F6 darf die planmäßige Eintauchtiefe des Rüttlers 1 m nicht übersteigen. Beim Übersteigen der Eintauchtiefe ist hydrostatischer Druck bis zum Erreichen des Erstarrungsendes anzusetzen.

Die Rütteldauer ist nach den Angaben der *DIN 4235-2* einzuhalten.

2.3.2.2 CIRIA Report No. 108: Concrete Pressure on Formwork

Für Großbritannien stellt die "Construction Industry Research and Information Association" (CIRIA) in ihrem Report No. 108 (Concrete Pressure on Formwork) eine Möglichkeit zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks zu Verfügung (CIRIA 1985). Die Voraussetzung für die Anwendung ist eine Frischbetontemperatur $T_{OB, Einbau}$ zwischen 5 und 15°C. Folgende Einflussparameter finden dabei eine Berücksichtigung:

- Rohwichte des Ortbetons γ_{OB}
- Schalungsart (Wand oder Stütze)
- Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen
- Betoniergeschwindigkeit v
- Höhe der Schalung H
- Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{OB, Einbau}$

Die allgemeine Gleichung zur Berechnung lautet:

$$\sigma_{CIRIA} = \gamma_{OB} \cdot \left[C_1 \cdot \sqrt{v} + C_2 \cdot k \cdot \sqrt{H - C_1 \cdot \sqrt{v}} \right] \leq \gamma_{OB} \cdot h \quad (2-26)$$

mit:

C_1	Koeffizient zur Berücksichtigung der Schalungsart (Einheit: $\sqrt{m \cdot h}$)
	1,0 für Wände
	1,5 für Stützen
C_2	Koeffizient zur Berücksichtigung der Zusammensetzung des Frischbetons nach Tab. 2-6 (Einheit: \sqrt{m})
H	Höhe der Schalung
h	Betonierhöhe
k	Temperaturkoeffizient $\left(\frac{36}{T_{OB, Einbau} + 16} \right)^2$

Beim Eintreten der Bedingung

$$C_1 \cdot \sqrt{v} > H \quad (2-27)$$

muss hydrostatischer Frischbetondruck für die gesamte Betonierhöhe angesetzt werden. Der Term in Gleichung (2-27) vereint die Einflüsse aus der Verdichtung und Verarbeitbarkeit des Frischbetons, da diese maßgeblich von der Form und Größe der Schalung sowie der Betoniergeschwindigkeit abhängen. Die Auswirkungen infolge der Betonierhöhe, der Zementart, von Betonzusatzstoffen und -mitteln oder der Frischbetontemperatur sind in folgendem Term verankert:

$$C_2 \cdot \left(\frac{36}{T_{OB, Einbau} + 16} \right)^2 \cdot \sqrt{H - C_1 \cdot \sqrt{v}} \quad (2-28)$$

Tab. 2-6: Koeffizient C_2 zur Berücksichtigung von Betonzusatzstoffen und -mitteln (in Anlehnung an CIRIA 1985)

Zementart oder -mischung	$C_2 [\sqrt{m}]$
Portlandzement (normal (OPC) und schnell (RHPC) erhärtend) oder sulfatbeständiger Zement (SRPC) ohne Zusatzmittel und Zusatzstoffe	0,30
Portlandzement (normal (OPC) und schnell (RHPC) erhärtend) oder sulfatbeständiger Zement (SRPC) mit Zusätzen, außer Verzögerungsmittel *)	0,30
Portlandzement (normal (OPC) und schnell (RHPC) erhärtend) oder sulfatbeständiger Zement (SRPC) mit Verzögerungsmitteln *)	0,45
Hochofenzement (PBFC), Hochofenzement mit niedriger Hydratationswärme (LHPBFC) oder Portlandflugaschezement (PPFAC) mit weniger als 70 % Hüttensand oder 40 % Flugasche ohne Zusatzmittel und Zusatzstoffe	0,45
Hochofenzement (PBFC), Hochofenzement mit niedriger Hydratationswärme (LHPBFC) oder Portlandflugaschezement (PPFAC) mit weniger als 70 % Hüttensand oder 40 % Flugasche mit Zusätzen, außer Verzögerungsmittel *)	0,45
Hochofenzement (PBFC), Hochofenzement mit niedriger Hydratationswärme (LHPBFC) oder Portlandflugaschezement (PPFAC) mit weniger als 70 % Hüttensand oder 40 % Flugasche mit Verzögerungsmitteln *)	0,60
Zementmischungen mit mehr als 70 % Hüttensand oder 40 % Flugasche	0,60
*) Verzögerungsmittel beinhalten alle Beimischungen, wie Erstarrungsverzögerer oder verzögernd wirkende Fließmittel, welche den zeitlichen Verlauf der Frischbetoneigenschaften hemmen.	

Die Verteilung des Frischbetondrucks über die Höhe der Schalung gleicht den Annahmen der *DIN 18218*. Es wird ein hydrostatischer Druckverlauf angenommen, bis der maximale Druck erreicht ist. Ab dieser Tiefe wird der Druck als konstant über die Schalungshöhe angenommen (siehe Abb. 2-12). Ein Abfall des Drucks in der Tiefe beim Erreichen des Erstarrungsendes des Frischbetons wird jedoch nicht berücksichtigt. Teilsicherheitsbeiwerte zur Bestimmung des Bemessungswerts des Frischbetondrucks werden nicht angegeben.

2.3.2.3 CIB-CEB-FIP: Manuel de Technologie “Coffrage”

Eines der ältesten Regelwerke zur Bestimmung des horizontalen Frischbetondrucks ist die „Manuel de Technologie – Coffrage“ aus Frankreich aus dem Jahr 1977 (*CIB-CEB-FIP 1977*). Es werden folgende Einflussparameter berücksichtigt:

- Rohwichte des Ortbetons γ_{OB}
- Betoniergeschwindigkeit v
- Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{OB, Einbau}$
- Setzmaß des Frischbetons s

Für die Berechnung des Frischbetondrucks gelten folgende Annahmen:

- Setzmaß des Frischbetons beträgt 100 mm (entspricht der Setzmaßklasse S3 nach *DIN EN 12350-7* und der Konsistenzklasse F3 nach *DIN EN 12350-5*) oder weniger.
- Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel, die die Erstarrung des Frischbetons beeinflussen, dürfen nicht verwendet werden.

Bei Erfüllung der Annahmen errechnet sich der Frischbetondruck zu:

$$\sigma_{\text{CIB}} = (24 \cdot v \cdot K + 5) \cdot \frac{\gamma_{\text{OB}}}{24} \quad (2-29)$$

mit: K Koeffizient zur Berücksichtigung der Temperatur und des Setzfließmaßes des Frischbetons nach Tab. 2-7

Tab. 2-7: Koeffizient K zur Berücksichtigung der Temperatur und des Setzfließmaßes des Frischbetons nach *CIB-CEB-FIP 1977*

Setzmaß s nach <i>DIN EN 12350-7</i>	Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{\text{OB, Einbau}}$		
	5°C	15°C	25°C
25	1,45	0,80	0,45
50	1,90	1,10	0,60
75	2,35	1,35	0,75
100	2,75	1,60	0,90

Beträgt die Querschnittsdicke des zu betonierenden Bauteils maximal 50 cm und das Setzmaß des Frischbetons maximal 80 mm, so darf eine Gewölbewirkung im Ortbetonspalt berücksichtigt werden, die zu einer Reduzierung des Frischbetondrucks führen kann:

$$\sigma_{\text{CIB, red}} = (15 + 100 \cdot b + 3 \cdot v) \cdot \frac{\gamma_{\text{OB}}}{24} \leq \sigma_{\text{CIB}} \quad (2-30)$$

mit: b kleinste Querschnittsdicke des zu betonierenden Bauteils in m

Beim Einfüllen des Frischbetons aus Höhen über 2 m ist ein pauschaler Druckzuschlag von 10 kN/m² anzusetzen, da der Frischbeton durch die höhere Aufprallgeschwindigkeit einen höheren Druck auf die Schalung erzeugt. Für fließfähige Betone mit der Konsistenzklasse F4 oder höher werden in der *CIB-CEB-FIP 1977* keine Angaben gemacht. Deshalb ist deren Anwendung für fließfähigere Betone nicht zulässig. Teilsicherheitsbeiwerte zur Bestimmung des Bemessungswerts des Frischbetondrucks werden ebenfalls nicht angegeben.

2.3.2.4 ACI 347-14: Guide to Formwork for Concrete

Eine weitere Methode zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks bietet das „American Concrete Institute“ (ACI) in der *ACI 347-14*. Diese ist ebenfalls für die Bemessung von glatter Schalung vorgesehen und berücksichtigt folgende Einflüsse:

- Rohwichte des Ortbetons γ_{OB}
- Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen
- Betoniergeschwindigkeit v
- Betonierhöhe h
- Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{\text{OB, Einbau}}$

Im Gegensatz zur *DIN 18218* findet keine Unterscheidung zwischen den Konsistenzklassen in der Berechnung statt. Für die Berechnung des Frischbetondrucks gelten folgende Annahmen:

- Setzmaß des Frischbetons beträgt 175 mm (entspricht der Setzmaßklasse S4 nach *DIN EN 12350-7* und der Konsistenzklasse F4 nach *DIN EN 12350-5*) oder weniger.
- Maximale Eintauchtiefe des Rüttlers h_v beträgt 1,2 m oder weniger.

Je nach Betoniergeschwindigkeit und Betonierhöhe stehen zwei verschiedene Gleichungen zur Verfügung:

Für $v < 2,1$ m/h und $h < 4,2$ m

$$\sigma_{ACI,I} = C_W \cdot C_C \cdot \left[7,2 + \frac{785 \cdot v}{T_{OB, Einbau} + 17,8} \right] \quad (2-31)$$

Für $v < 2,1$ m/h und $h > 4,2$ m oder $2,1$ m/h $< v < 4,5$ m/h

$$\sigma_{ACI,II} = C_W \cdot C_C \cdot \left[7,2 + \frac{1156}{T_{OB, Einbau} + 17,8} + \frac{244 \cdot v}{T_{OB, Einbau} + 17,8} \right] \quad (2-32)$$

- mit: C_W Koeffizient zur Berücksichtigung der Rohwichte des Ortbetons γ_{OB} nach Tab. 2-8
- C_C Koeffizient zur Berücksichtigung von Betonzusatzstoffen und Betonzusatzmitteln nach Tab. 2-9

Tab. 2-8: Koeffizient C_W zur Berücksichtigung der Rohwichte (in Anlehnung an *ACI 347-14*)

Rohwichte des Ortbetons γ_{OB}	C_W
$< 22,00$ kN/m ³	$0,5 \cdot \left[1 + \frac{\gamma_{OB}}{22,75} \right]$
22,00 kN/m ³ bis 23,50 kN/m ³	1,0
$> 23,50$ kN/m ³	$\frac{\gamma_{OB}}{22,75}$

Tab. 2-9: Koeffizient C_C zur Berücksichtigung von Betonzusatzstoffen und -mitteln (in Anlehnung an *ACI 347-14*)

Zementart oder -mischung	C_C
CEM I, CEM II und CEM III ohne Verzögerungsmittel *)	1,0
CEM I, CEM II und CEM III mit Verzögerungsmittel *)	1,2
Andere Zementarten oder Zementmischungen mit weniger als 70 % Hüttensand oder 40 % Flugasche (ohne Verzögerungsmittel *)	1,2
Andere Zementarten oder Zementmischungen mit weniger als 70 % Hüttensand oder 40 % Flugasche (mit Verzögerungsmittel *)	1,4
Zementmischungen mit mehr als 70 % Hüttensand oder 40 % Flugasche	1,4
*) Verzögerungsmittel beinhalten alle Beimischungen, wie Erstarrungsverzögerer oder verzögernd wirkende Fließmittel, welche den zeitlichen Verlauf der Frischbetoneigenschaften hemmen.	

Zusätzlich ist für den Frischbetondruck immer ein Mindestwert von

$$\sigma_{ACI, \min} = 30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot C_W \quad (2-33)$$

sowie ein Höchstwert gleich dem hydrostatischen Druck anzusetzen. Sofern die Bedingungen zur Anwendung der Gleichungen (2-31) und (2-32) nicht erfüllt sind, muss nach *ACI 347-14* immer ein hydrostatischer Druck für die volle Betonierhöhe angenommen werden:

$$\sigma_{ACI, \text{hydro}} = \gamma_{OB} \cdot h \quad (2-34)$$

mit: γ_{OB} Rohwichte des Ortbetons
 h Betonierhöhe

Bei Betoneinbau von unten ist nach *ACI 347-14* hydrostatischer Druck plus ein Druckzuschlag von mindestens 25 %, resultierend aus dem Betonpumpendruck, anzunehmen.

Für die Bemessung von Rüstung und Schalung werden Teilsicherheitsbeiwerte angegeben, die je nach Schalungskomponente und Art der Konstruktion variieren (siehe Tab. 2-10).

Tab. 2-10: Teilsicherheitsbeiwerte zur Bemessung der Schalungskomponenten *)

Schalungskomponente	Teilsicherheitsbeiwert	Art der Konstruktion
Schalungsanker	2,0	alle
Ankerscheibe	2,0	Schalungen, die deren Eigengewicht und den Frischbetondruck aufnehmen
	3,0	Schalungen, die deren Eigengewicht, die Last des Betons, Nutzlasten während der Bauphase und Anpralllasten aufnehmen
Schalungsabstützung	2,0	alle
Verankerungsmittel, die als Schalungsanker fungieren	2,0	Halbfertigteilelemente, die als Schalung benutzt werden
*) Die Teilsicherheitsbeiwerte basieren auf der Traglast von neuwertigen Schalungskomponenten		

Die Annahme zur Verteilung des Frischbetondrucks erfolgt analog zur *DIN 18218*. Es wird ein hydrostatischer Druckverlauf bis zum Erreichen des maximalen Frischbetondrucks angenommen. Ab dieser Tiefe findet keine Druckerhöhung mehr statt und es wirkt ein konstanter Frischbetondruck (siehe Abb. 2-12). Ein Abfall des Drucks in der Tiefe beim Erreichen des Erstarrungsendes des Frischbetons wird nicht berücksichtigt.

2.3.2.5 CAN/CSA S269.3: Concrete Formwork

Der Ansatz aus Kanada nach CAN/CSA S269.3 basiert auf den Überlegungen von Gardner 1985. Folgende Einflussparameter werden in der Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks berücksichtigt:

- Eintauchtiefe des Rüttlers h_V und Betoniergeschwindigkeit v
- Kleinste Querschnittsdicke des zu betonierenden Bauteils b
- Frischbetontemperatur beim Einbau $T_{OB, Einbau}$
- Verwendung von Flugasche oder Hüttensand
- Setzmaß des Frischbetons s

Es gelten folgende Annahmen:

- Der Frischbeton wird mit Innenrüttlern verdichtet.
- Verwendung der Zemente „Type 10“ oder „Type 30“ (entspricht „Type I“ bzw. „Type III“ aus ASTM 150 (Proske u. a. 2014)).
- Setzmaß des Frischbetons beträgt 100 mm (entspricht der Setzmaßklasse S3 nach DIN EN 12350-7 und der Konsistenzklasse F3 nach DIN EN 12350-5) oder weniger.

Die allgemeine Gleichung zur Berechnung lautet:

$$\sigma_{CSA} = \left[(24 \cdot h_V) + \left(\frac{b}{40} \right) + \left(\frac{400 \cdot \sqrt{v}}{18 + T_{OB, Einbau}} \cdot \left(\frac{100}{100 - F} \right) \right) + \frac{s}{10} \right] \quad (2-35)$$

- mit:
- h_V Eintauchtiefe des Rüttlers in m (0,9 bis 1,0m nach Gardner 2014)
 - b kleinste Querschnittsdicke des zu betonierenden Bauteils in mm
 - F Anteil an Flugasche oder Hochofenzement am gesamten Zementgehalt in Prozent
 - s Setzmaß des Frischbetons nach DIN EN 12350-7 in mm

Die Annahme zur Verteilung des Frischbetondrucks erfolgt analog zu ACI 347-14.

2.3.2.6 Vergleich der Berechnungsmethoden

Bei allen vorgestellten Berechnungsansätzen ermittelt sich der charakteristische Frischbetondruck als Minimum des hydrostatischen, oberen Grenzwerts und dem errechneten Druck aus der Gleichung der entsprechenden Norm oder des Regelwerks. In DIN 18218 und ACI 347-14 werden zusätzlich noch Mindestwerte angegeben.

$$\sigma_{hk, max} = \min \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{hydro} = \gamma_{OB} \cdot h \\ \sigma_{DIN / CIRIA / CIB / ACI / CSA} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{hydrostatischer Grenzwert} \\ \text{Berechnungsansatz} \end{array} \quad (2-36)$$

Der Vergleich zwischen den Modellen zeigt, dass es je nach Betoniergeschwindigkeit große Unterschiede gibt (siehe Abb. 2-13). Bei niedrigen Betoniergeschwindigkeiten bis ca. 1,0 m/h weichen die Rechenwerte für den maximalen Frischbetondruck zwischen den Ansätzen erheblich ab. Bei höheren Betoniergeschwindigkeiten lässt sich jedoch ein klarer Trend erkennen.

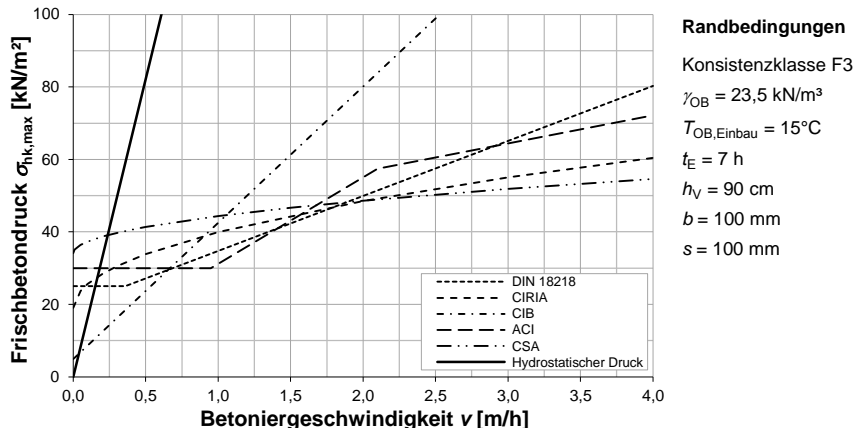


Abb. 2-13: Vergleich der Rechenansätze zur Bestimmung des Frischbetondrucks

Die relativ neuen Rechenverfahren nach *DIN 18218* und *ACI 347-14* prognostizieren im Mittel sehr ähnliche Frischbetondrücke. Dies gilt ebenfalls für die beiden älteren Modellansätze nach *CIRIA 1985* und *CAN/CSA S269.3*, deren Grundlagen im Jahr 1985 erarbeitet wurden. Bei Betoniergeschwindigkeiten zwischen 1,5 und 2,0 m/h weisen alle vier Modelle ungefähr gleiche Drücke auf, bei höheren Betoniergeschwindigkeiten sind die Drücke der neueren Verfahren immer höher. Dies erlaubt die Vermutung, dass die älteren Verfahren den Frischbetondruck eher unterschätzen. Das Rechenverfahren nach *CIB-CEB-FIP 1977* weist ab einer Betoniergeschwindigkeit von 1,0 m/h im Vergleich immer viel höhere Drücke auf als alle anderen Verfahren.

2.3.3 Stand der Wissenschaft

Die Zusammenfassung vorhandener Modelle und Berechnungsmethoden haben gezeigt, dass die Höhe des Frischbetondrucks von einer Vielzahl von Parametern abhängig ist. In Elementwänden mit integriertem Dämmstoff ergeben sich darüber hinaus noch weitere Einflussparameter.

Pahn 2011 hat bereits im Rahmen mehrerer Großbauteilversuche die Belastung der Verbindungsmittel beim Verfüllen der Ortbetonergänzung untersucht. Es konnte ein deutlicher Einfluss des Dämmstoffs auf den maximalen Frischbetondruck beobachtet werden. Das zugehörige Versuchsprogramm ist in Tab. 2-11 abgebildet. Insgesamt wurden fünf Elementwände mit verschiedenen Dämmstofftypen (EPS oder XPS) sowie Verbindungsmitteln, Dämmstoff- und Ortbetondicken geprüft.

Tab. 2-11: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Einflusses auf den maximalen Frischbetondruck (Pahn 2011)

Versuch Nr.	Gruppe Nr.	Verbindungs- mittel *)	Dämm- stoff	Dämmstoff - dicke [mm]	Dicke Ortbeton [mm]	Gesamt- dicke [mm]
Wand 1	A	K	EPS	140	100	360
Wand 2		K	XPS	60	80	260
Wand 3	B	K	EPS	140	80	340
Wand 4		K	XPS	140	80	340
Wand 5	C	R	EPS	60	130	310

*) K - Kreisquerschnitt, d=12 mm, E = 60.000 N/mm²
 R - Rechteckquerschnitt, h/b = 9,8 x 5,6 mm, E = 40.000 N/mm²

Abb. 2-14 zeigt für jede Wand die maximal auftretenden Kräfte jedes einzelnen Verbindungsmittels im Versuchskörper sowie den daraus ermittelten Mittelwert (MW) und Maximalwert (MAX). Neben den im Versuch ermittelten Kräften sind auch die nach DIN 18218 errechneten Maximalkräfte, bezogen auf das Verbindungsmittelraster, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff eine deutlich niedrigere Last vom Verbindungsmittel aufgenommen werden muss, als nach DIN 18218 prognostiziert wird. Im Vergleich zur rechnerisch ermittelten Maximalkraft reduzieren sich die Kräfte beim Einsatz von EPS im Schnitt um 58 % und beim Einsatz von XPS um 28 %.

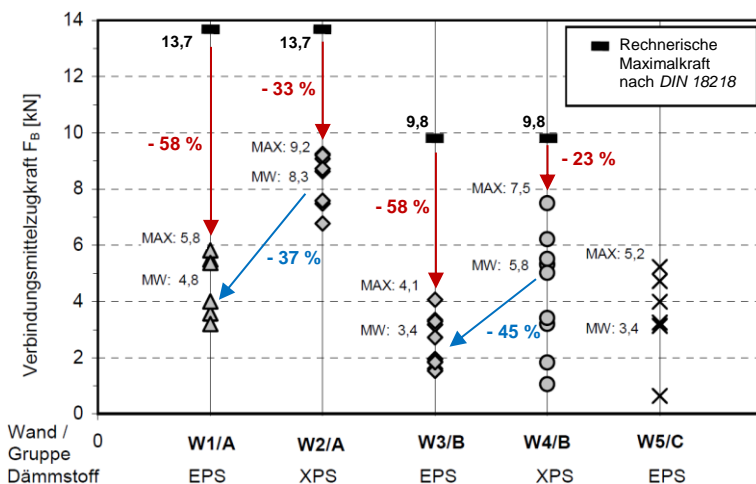


Abb. 2-14: Maximale Zugkräfte in den Verbindungsmitteln nach Pahn 2011

Beim Vergleich der beiden Dämmstofftypen untereinander beträgt der maximale Frischbetondruck beim Einsatz von EPS nur ca. 60 % im Vergleich zum Einsatz von XPS. Für die Begründung der Ergebnisse werden nur Vermutungen geäußert, die experimentell jedoch nicht bestätigt werden. Die konkreten Gründe für die unterschiedlichen Maximaldrücke bleiben offen. Ziel dieser Arbeit ist die Identifizierung der maßgebenden Einflussparameter und die Entwicklung eines realitätsnahen Modells zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff.

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

Im Rahmen von Voruntersuchungen findet eine systematische Betrachtung von Einflussparametern auf den horizontalen Frischbetondruck bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff statt. Im Fokus der Untersuchungen stehen geometrische und materialspezifische Eigenschaften einer Elementwand. Ziel der experimentellen Voruntersuchungen ist die Entwicklung eines Grundverständnisses für die Entstehung des Frischbetondrucks in solchen Wänden und die Identifizierung der maßgebenden Einflussparameter.

Im Folgenden wird die Ausgangssituation geschildert und die Zielsetzung des Kapitels definiert. Nachdem durch theoretische Betrachtungen bereits einflusssschwache Parameter ausgeschlossen werden können, finden experimentelle Untersuchungen an einem Kleinversuchsstand (Kapitel 3.4), einem Großversuchsstand (Kapitel 3.5) und an wirklichkeitsnahen, hohen Elementwänden (Kapitel 3.6) statt. Am Ende des Kapitels wird das Verhalten von Dämmstoffen bei Kontakt mit Frischbeton aufgezeigt und die Ergebnisse werden zusammengefasst.

3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Die maßgebende Größe zur Bemessung von Elementwänden mit integriertem Dämmstoff im Bauzustand ist die Beanspruchung der Verbindungsmittel infolge des Frischbetondrucks der Ortbetonergänzung. Um die Art und Anzahl der Verbindungsmittel wirtschaftlich festlegen zu können, muss eine genaue Kenntnis über den Beanspruchungszustand unter Einwirkung des Frischbetondrucks vorhanden sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Untersuchungsschwerpunkt auf stabförmige Verbindungsmittel aus GFK gelegt. In Abb. 2-3 wurde bereits exemplarisch der Querschnitt einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff und Verbindungsmitteln aus GFK dargestellt.

In Deutschland wird der Frischbetondruck derzeit nach *DIN 18218* „Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen“ angenommen (siehe Kapitel 2.3.2.1). Die Regelungen in dieser Norm basieren auf den Einsatz von glatter Schalung. Die Beeinflussung des Frischbetondrucks durch abweichende Schalungsmaterialien, wie es bei Elementwänden der Fall ist, bleibt bisher in der Bemessung unberücksichtigt. Je nach geometrischen, werkstoffspezifischen und bauausführungstechnischen Parametern solcher Wände wird der Frischbetondruck nach Berechnungen der *DIN 18218* überschätzt, was zu einem unwirtschaftlichen Bemessungsergebnis führt.

Die Höhe des maximalen Frischbetondrucks und der zeitliche Verlauf der Beanspruchung auf eine Schalung ist von vielen Parametern abhängig (*Proske 2007, Specht 1981, DAfStb 567*). Bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff beeinflussen im Vergleich zu einer glatten Schalung u. a. der innen liegende Dämmstoff, die Dicke der Ortbetonergänzung und die Art der Verbindungsmittel den Frischbetondruck. Tab. 3-1 zeigt eine Übersicht der Einflussparameter. Bei Elementwänden kann zwischen geometrischen (G), werkstoffspezifischen (W) und bauausführungstechnischen (B) Einflussparametern unterschieden werden. Es ist zu

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

beachten, dass nicht alle aufgeführten Parameter einen gleich großen Einfluss auf den Frischbetondruck haben. Je nach Intensität des Einflusses kann auch von erstrangigen, zweitrangigen oder drittrangigen Auswirkungen gesprochen werden (Specht 1981). Für Elementwände mit integriertem Dämmstoff kann die Intensität der einzelnen Einflussparameter an dieser Stelle noch nicht abgeschätzt werden. Dies erfolgt, aufbauend auf die Untersuchungen von Pahn 2011, in den nachfolgenden Kapiteln.

Tab. 3-1: Einflussparameter auf den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff (in Anlehnung an Proske 2007 und DAfStb 567)

Einflussparameter auf den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff		
Geometrisch (G)	Werkstoffspezifisch (W)	Bauausführungstechnisch (B)
G1 Dicke der Ortbetonergänzung d_{OB}	W1 Typ des Dämmstoffs	B1 Betoniergeschwindigkeit v^*)
G2 Dicke des Dämmstoffs d_D	W2 Rohdichte des Dämmstoffs ρ_D	B2 Eintauchtiefe des Rüttlers h_V^*)
G3 Oberflächenrauheit des Dämmstoffs R_D	W3 Betonrezeptur des Ortbetons	B3 Verdichtungsdauer t_V
G4 Oberflächenrauheit der FT-Tragschale R_{TS}	W4 Rohwichte des Ortbetons γ_{OB}^*)	B4 Fallhöhe des Frischbetons beim Betonieren h_F
G5 Rasterfläche der Verbindungsmittel A_{VBM}	W5 Konsistenzklasse des Ortbetons K^*)	B5 Betonierhöhe h
G6 Höhe der Elementwand H	W6 Frischbetontemperatur des Ortbetons T_{OB}^*)	B6 Eigenschaften des Rüttlers
G7 Bewehrungsgrad im Bereich der Ortbetonergänzung ρ_{OB}	W7 Erstarrungsende des Ortbetons t_E^*)	B7 Druckhöhe des Frischbetons
	W8 Biege- und Dehnsteifigkeit der Verbindungsmittel B_{VBM} / D_{VBM}	
	W9 Biege- und Dehnsteifigkeit der FT-Betonschalen $B_{VS/TS} / D_{VS/TS}$	

*) Einflussparameter, die bereits in DIN 18218 berücksichtigt werden

Im Folgenden werden die einzelnen geometrischen, werkstoffspezifischen und bauausführungstechnischen Einflussparameter kurz erläutert.

G1 Dicke der Ortbetonergänzung d_{OB}

Die Dicke der Ortbetonergänzung beschreibt den lichten Abstand zwischen Dämmstoff und FT-Tragschale. Bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff liegt d_{OB} meist zwischen 80 und 300 mm. Je nach Dicke der Ortbetonergänzung kommt es durch Reibungskräfte zwischen Frischbeton und Schalungsflächen zur Reduzierung der Vertikal- und Horizontalkräfte und damit des Frischbetondrucks (siehe Kapitel 2.3.1)

G2 Dicke des Dämmstoffs d_D

Die Dämmstoffdicke in Elementwänden wird gemäß den Anforderungen der Energieeinsparverordnung gewählt. Je nach Anwendungsbereich der Wand liegt d_D meist zwischen 60 und 200 mm. Mit variierender Dämmstoffdicke ändert sich auch die Biege- und Dehnsteifigkeit der Schalungsfläche. Durch die Nachgiebigkeit des Dämmstoffs kann so während des Betonierens auch der Frischbetondruck beeinflusst werden.

G3 Oberflächenrauheit des Dämmstoffs R_D

Je nach Typ des Dämmstoffs kann dessen Oberflächenrauheit sehr unterschiedlich ausfallen. Während übliche Dämmstoffe aus EPS eine raue Oberfläche besitzen, weisen Dämmstoffe aus XPS oder PU meist eine glatte Oberfläche auf. Durch mechanische Bearbeitung kann auch eine verzahnte Oberfläche hergestellt werden. Die Rauheit des Dämmstoffs beeinflusst die Reibung mit dem Frischbeton und damit den Frischbetondruck. Bei Fugen im Bauwesen wird nach *DIN EN 1992-1-1* zwischen verzahnt, rau, glatt und sehr glatt unterschieden.

G4 Oberflächenrauheit der FT-Tragschale R_{TS}

Die Oberflächenrauheit der FT-Tragschale kann im Fertigteilwerk unterschiedlich ausgeführt werden. Für eine monolithische Verbindung zwischen FT-Tragschale und Ortbeton im Endzustand muss R_{TS} standardmäßig verzahnt hergestellt.

G5 Rasterfläche der Verbindungsmittel A_{VBM}

Das Verbindungsmittel in einer Elementwand verbindet die beiden FT-Betonschalen und muss im Bauzustand die Frischbetondruckbeanspruchung sicher aufnehmen können. Im Falle von punktförmig angeordneten, stabförmigen Verbindungsmitteln beschreibt A_{VBM} die Wirkungsfläche eines Verbindungsmittels. Diese liegt je nach Typ zwischen 0,05 und 0,25 m², was vier bis 20 Verbindungsmitteln pro m² entspricht (siehe z. B. *Z-21.8-1894* oder *Z-21.8-1926*). Ein kleineres Verbindungsmittelraster reduziert somit zum einen die aufzunehmende Kraft pro Verbindungsmittel und erhöht zum anderen die Steifigkeit des Schalungssystems.

G6 Höhe der Elementwand H

Die Höhe von Elementwänden kann zwischen 1 bis 2 m, bspw. bei Behältern, und mehr als 10 m bei mehrgeschossigen Bauwerken variieren. Je nach bauausführungstechnischen Randbedingungen beim Betonieren steht die Höhe der Elementwand in direktem Zusammenhang mit der Höhe des Frischbetondrucks.

G7 Bewehrungsgrad im Bereich der Ortbetonerfüllung ρ_{OB}

Um die Tragfähigkeit einer Elementwand im Endzustand zu gewährleisten ist im Bereich der Ortbetonerfüllung Bewehrung anzuordnen. Die Bewehrung nimmt während der Verdichtung des Frischbetons einerseits einen Teil des Frischbetondrucks auf (positive Wirkung), überträgt jedoch andererseits die Schwingungen des Rüttlers vertikal nach unten (negative Wirkung) (*Specht 1981*). Die Beeinflussung des Frischbetondrucks durch Bewehrung spielt deshalb nur eine untergeordnete Rolle.

W1 Typ des Dämmstoffs

In Elementwänden kommen fast ausschließlich synthetische Dämmstoffe zum Einsatz (siehe Kapitel 2.1.2.2). Hierzu gehören expandierte Polystyrol-Hartschaumstoffe (EPS), extrudierte Polystyrol-Hartschaumstoffe (XPS) und Polyurethan-Hartschaumstoffe (PU). Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass der Typ des Dämmstoffs den maximalen Frischbetondruck beeinflusst (*Pahn 2011*).

W2 Rohdichte des Dämmstoffs ρ_D

Die Rohdichte der in Elementwänden eingesetzten Dämmstoffe variiert zwischen 10 bis 50 kg/m³ (siehe Kapitel 4). Zwischen der Rohdichte und der Druckfestigkeit eines Dämmstoffs besteht ein linearer Zusammenhang (siehe Abb. 4-11). Mit steigender Rohdichte ändert sich auch die Biege- und Dehnsteifigkeit der Schalungsfläche. Durch die Nachgiebigkeit des Dämmstoffs kann so während des Betonierens auch der Frischbetondruck beeinflusst werden.

W3 Betonrezeptur des Ortbetons

Die Rezeptur eines Betons setzt sich aus Wasser, Zement, Gesteinskörnung (Sieblinie, Größtkorn, Art der Gesteinskörnung) sowie gegebenenfalls aus Zusatzmitteln (z. B. Fließmittel oder Erstarrungsverzögerer) und Zusatzstoffen (z. B. Flugasche) zusammen (siehe Kapitel 2.2.1). Die einzelnen Ausgangsstoffe haben einen Einfluss auf den Frischbetondruck. Aus der Betonrezeptur resultieren auch die Rohdichte (W4) und die Konsistenzklasse des Ortbetons (W5).

W4 Rohdichte des Ortbetons γ_{OB}

Die Rohdichte des Ortbetons kann von der Betonrezeptur abgeleitet werden. Für Normalbetone liegt diese zwischen 20 und 25 kN/m³. Bei steigender Rohdichte steigt auch der Frischbetondruck.

W5 Konsistenzklasse des Ortbetons K

Die Konsistenzklasse des Ortbetons ist ein Maß für die Beweglichkeit und Verformbarkeit des Frischbetons und kann ebenfalls von der Betonrezeptur abgeleitet werden. Nach *DIN EN 12350-5* wird zwischen den Ausbreitmaßklassen F1 bis F6 unterschieden. Betone mit einer flüssigeren Konsistenz als F4 müssen meist mit einem Fließmittel hergestellt werden und gelten als leicht verdichtbar. Die klassischen Rüttelbetone weisen eine Konsistenz zwischen F1 und F4 auf. Generell gilt die Regel: Je flüssiger der Frischbeton ist, desto höher ist der Frischbetondruck.

W6 Frischbetontemperatur des Ortbetons T_{OB}

Die Temperatur des Frischbetons ist abhängig von der Temperatur der Ausgangsstoffe. Da sich sowohl eine zu niedrige als auch eine zu hohe Frischbetontemperatur negativ auf die Fest- und Frischbetoneigenschaften auswirken, muss diese je nach Randbedingungen immer zwischen 5 und 30°C liegen (*Beton 2013*). Hohe Temperaturen führen zu einer Reduktion und niedrige Temperaturen zu einer Erhöhung des Frischbetondrucks.

W7 Erstarrungsende des Ortbetons t_E

Das Erstarrungsende beschreibt die Zeitspanne zwischen der Wasserzugabe beim Mischen bis zur völligen Erstarrung des Frischbetons. Hierbei ist das Erstarrungsende von der Zementart, dem w/z-Wert der Betonmischung, dem Einsatz von Betonzusatzmitteln sowie den Temperaturbedingungen abhängig und liegt normalerweise zwischen 3 und 20 h. Je später das Erstarrungsende t_E ist, desto höher ist der maximale Frischbetondruck in einer Elementwand.

W8 Biege- und Dehnsteifigkeit der Verbindungsmittel B_{VBM} / D_{VBM}

Die Biege- und Dehnsteifigkeit der Verbindungsmittel wird durch deren Querschnittsfläche und Materialeigenschaften gesteuert. Da die beiden Betonschalen über die Verbindungsmittel gekoppelt werden, beeinflusst deren Steifigkeit auch den Seitendruckbeiwert und damit den Frischbetondruck.

W9 Biege- und Dehnsteifigkeit der FT-Betonschalen B_{VSTs} / D_{VSTs}

Die Biege- und Dehnsteifigkeit der FT-Betonschalen wird durch deren Dicke und Festbetoneigenschaften gesteuert. Da das Elastizitätsmodul der in Elementwänden verwendeten Betone zwischen 30.000 und 37.000 N/mm² beträgt, wird die Steifigkeit der Betonschalen maßgeblich durch deren Dicke gesteuert. Diese liegt üblicherweise zwischen 60 und 100 mm. Die Steifigkeit des Schalungssystems beeinflusst den Seitendruckbeiwert und damit den Frischbetondruck.

B1 Betoniergeschwindigkeit v

Die Betoniergeschwindigkeit beschreibt die Bauteilhöhe, die pro Zeiteinheit betoniert wird. Nach *DIN 18218* darf die Betoniergeschwindigkeit bei Betonen der Konsistenzklassen F1 bis F4 einen Wert von 7,0 m/h nicht übersteigen. Bei steigender Betoniergeschwindigkeit findet auch ein Anstieg des Frischbetondrucks statt.

B2 Eintauchtiefe des Rüttlers h_v

Die Eintauchtiefe des Rüttlers beschreibt den Höhenunterschied zwischen der Frischbetonoberfläche und dem tiefsten Punkt des Innenrüttlers in der Ortbetonschicht. Im Wirkungsbereich des Rüttlers findet eine vollständige Verflüssigung des Frischbetons statt, weshalb bis zur Tiefe h_v hydrostatischer Druck entsteht. In den Gleichungen der *DIN 18218* ist eine Eintauchtiefe von 90 cm verankert (siehe Kapitel 2.3). Eine Erhöhung der Eintauchtiefe kann die Höhe des Frischbetondrucks maßgeblich beeinflussen.

B3 Verdichtungsdauer t_v

Unter Verdichtung versteht man die Einleitung von Schwingungen in den frischen Beton. Hierdurch wird die Fließfähigkeit erhöht, wodurch der Frischbeton entlüftet wird. Die notwendige Verdichtungsdauer ist von der Art des Verdichtungsgerätes und den Eigenschaften des Frischbetons abhängig. Je steifer der Frischbeton ist, desto stärker und länger muss verdichtet werden (*Beton 2013*).

B4 Fallhöhe des Frischbetons beim Betonieren h_F

Die Fallhöhe beschreibt die Höhendifferenz zwischen aktuellem Betonspiegel und der Einfüllvorrichtung des Frischbetons. Bei Fallhöhen über 2 m (*Beton 2013*) sollte der Beton über Rohre oder Schläuche eingefüllt werden, da sonst Entmischungsgefahr besteht. Eine Entmischung des Frischbetons ändert die Frischbetoneigenschaften und führt zu einer Veränderung des Frischbetondrucks.

B5 Betonierhöhe h

Die Betonierhöhe beschreibt die Höhe, die fortlaufend ohne das Herstellen einer horizontalen Fuge betoniert wird. Wandbauteile werden normalerweise an einem

Stück betoniert, sodass die Betonierhöhe h auch der Höhe der Elementwand H entspricht. Bei größeren Betonierhöhen steigt auch die Höhe des Frischbetondrucks.

B6 Eigenschaften des Rüttlers

Die Eigenschaften des Rüttlers beinhalten alle Kenndaten, die für eine Verdichtung von Frischbeton wichtig sind (siehe Kapitel 6.2). Hierzu gehören die Schwingungsfrequenz f , die Masse des Rüttlers m_R und die vom Rüttler verursachte Fliehkraft F . Aus den drei genannten Größen kann zusätzlich die Schwingungsamplitude s_0 des Rüttlers errechnet werden.

B7 Druckhöhe des Frischbetons

Die Druckhöhe des Frischbetons beschreibt den Abstand zwischen der Frischbetonoberfläche und der Tiefe im Frischbeton, in der gerade noch eine Verflüssigung stattfindet. Da bei Wandbauteilen ein lagenweises Betonieren gefordert wird, beträgt die Druckhöhe normalerweise zwischen 0,5 und 1,0 m.

Untersuchungen von *Pahn 2011* an der Technischen Universität Kaiserslautern konnten bereits eine deutliche Abhängigkeit des maximalen Frischbetondrucks und des Verlaufs der Frischbetondruckbeanspruchung von einem integrierten Dämmstoff oder unterschiedlichen Oberflächenrauheiten zeigen. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass nach Verfüllen und Erhärten der Ortbetonergänzung in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff ein gewisser Anteil der Frischbetondruckbeanspruchung verbleibt, welcher von den Verbindungsmitteln dauerhaft aufgenommen werden muss. Der in den Verbindungsmitteln verbleibende Frischbetondruck ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.

3.2 Theoretische Betrachtungen zum Ausschluss von Parametern

Im Rahmen theoretischer Betrachtungen wird zunächst eine Parameterstudie mit einem Stabwerkprogramm durchgeführt. Es wird der Einfluss der Parameter

- **G5 Rasterfläche der Verbindungsmittel**
- **W8 Biege- und Dehnsteifigkeit der Verbindungsmittel**
- **W9 Biege- und Dehnsteifigkeit der FT-Betonschalen**

auf die Verteilung der Kräfte in den Verbindungsmitteln bei Beanspruchung einer Elementwand durch Frischbetondruck analysiert. Ziel ist die Abschätzung des Einflusses der genannten Parameter, da diese versuchsgestützt nur unter hohem Zeit- und Kostenaufwand untersucht werden können.

3.2.1 Statisches System und Einwirkung

Unter Vernachlässigung des Dämmstoffs wird für eine Elementwand ein statisches Ersatzsystem gebildet (siehe Abb. 3-1). Für die Errechnung der Dehn- und Biegesteifigkeit der FT-Betonschalen (siehe Tab. 3-3) wird eine Breite von 40 cm und ein E-Modul E_{cm} von 30.000 N/mm² zugrunde gelegt. Die Breite oder das E-Modul der FT-Betonschalen hat keinen Einfluss auf die qualitativen Ergebnisse der Betrachtungen. Die Höhe der Elementwand wird in Abhängigkeit von den Achs- und Randabständen der Verbindungsmittel gewählt (siehe Kapitel 3.2.2). Das E-Modul der

Verbindungsmittel E_{VBM} wird zu 60.000 N/mm² festgelegt. Als Einwirkung wird der hydrostatische Frischbetondruck einer Frischbetonsäule bis zur halben Wandhöhe angenommen. Die Druckzunahme je Meter Betonsäule ab dem Frischbetonspiegel berechnet sich bei einem Sicherheitszuschlag von 35 % für ständige Einwirkungen und einer Rohwichte des Frischbetons von 23 kN/m³ zu:

$$\sigma = 1,35 \cdot 23 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m} = 12,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (3-1)$$

Die Höhe des angenommenen Drucks ist für die Parameterstudie irrelevant, da diese nicht variiert wird und lediglich eine qualitative Bewertung der Ergebnisse erfolgt.

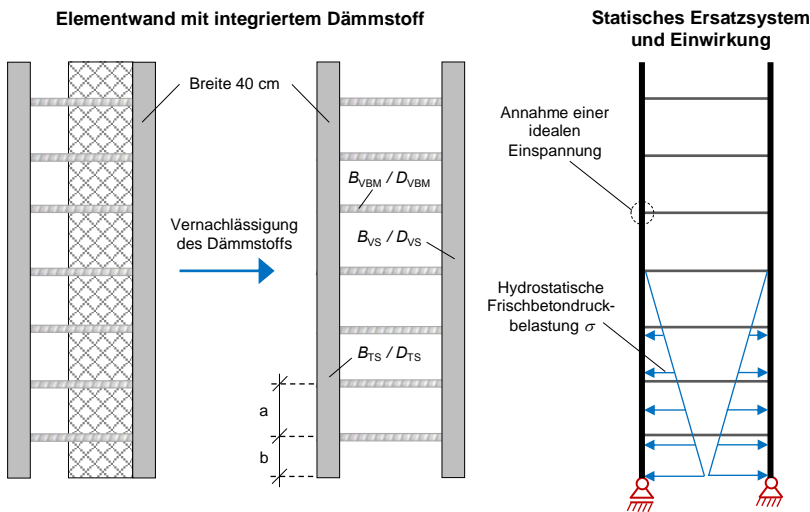


Abb. 3-1: Bildung des statischen Ersatzsystems der Elementwand

3.2.2 Untersuchte Einflussparameter

Bei unveränderlicher Frischbetondruckbelastung werden in der Parameterstudie die geometrischen Größen der Verbindungsmittel und FT-Betonschalen nach Tab. 3-2 variiert.

Tab. 3-2: Variation der geometrischen Größen

Geometrische Größe	Variationen		
Achsabstand der Verbindungsmittel a	20 cm	40 cm	60 cm
Randabstand der Verbindungsmittel b	10 cm		20 cm
Durchmesser der Verbindungsmittel d_{VBM}	6 mm	12 mm	20 mm
Dicke der FT-Betonschalen $d_{VS/TS}$	4 cm		10 cm

Der kleinste gemeinsame Nenner der Achsabstände der Verbindungsmittel a (20, 40 und 60 cm) beträgt 240 cm. Es resultiert eine Wandhöhe von 260 cm, bei einem Randabstand der Verbindungsmittel b von 10 cm, und eine Wandhöhe von 280 cm, bei einem Randabstand der Verbindungsmittel b von 20 cm.

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

Aus den variierten Größen aus Tab. 3-2 ergeben sich die in Tab. 3-3 aufgelisteten minimalen und maximalen Eingangswerte für die Berechnungen im Stabwerksprogramm.

Tab. 3-3: Eingangswerte für die Berechnungen im Stabwerksprogramm

Eingangswert	A_{VBM} [m ²]	B_{VBM} [kNcm ²]	D_{VBM} [kN]	$B_{VS/TS}$ [MNcm ²]	$D_{VS/TS}$ [MN]
Minimum	0,04	38	1.696	640	480
Maximum	0,36	4.712	18.850	10.000	1.200

Die Eingangswerte berechnen sich nach den Gleichungen (3-2) bis (3-6).

$$A_{VBM} = a^2 \tag{3-2}$$

$$B_{VBM} = E_{VBM} \cdot I = E_{VBM} \cdot \frac{\pi \cdot d_{VBM}^4}{64} \tag{3-3}$$

$$D_{VBM} = E_{VBM} \cdot A = E_{VBM} \cdot \frac{\pi \cdot d_{VBM}^2}{4} \tag{3-4}$$

$$B_{VS/TS} = E_{cm} \cdot I = E_{cm} \cdot \frac{40 \text{ cm} \cdot d_{VS/TS}^3}{12} \tag{3-5}$$

$$D_{VS/TS} = E_{cm} \cdot A = E_{cm} \cdot 40 \text{ cm} \cdot d_{VS/TS} \tag{3-6}$$

3.2.3 Ergebnisse und Auswertung

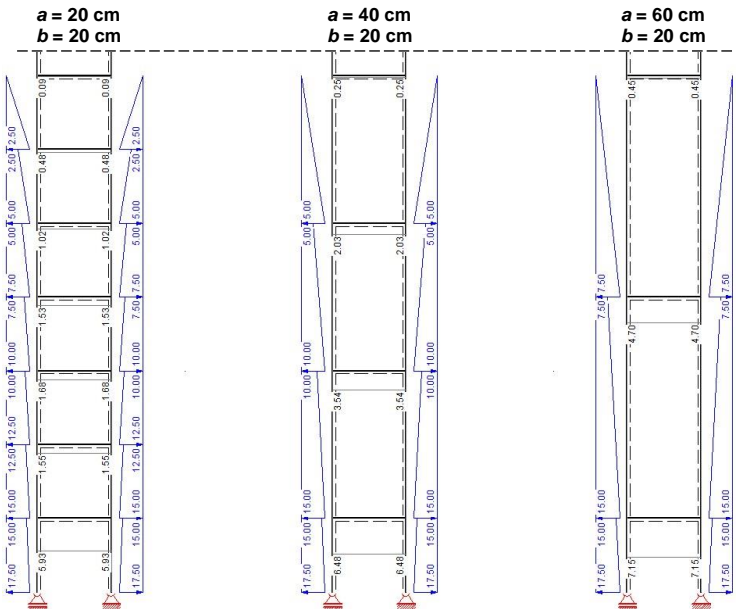


Abb. 3-2: Frischbetondruckbelastung und Verbindungsmittelkräfte bei einem Durchmesser der Verbindungsmittel von 12 mm und einer FT-Betonschalendicke von 4 cm.

Abb. 3-2 zeigt beispielhaft das statische System, die Frischbetondruckbelastung und die resultierenden Verbindungsmittelkräfte bei den drei verschiedenen Achsabständen der Verbindungsmittel a von 20, 40 und 60 cm und gleichbleibendem Randabstand der Verbindungsmittel b von 20 cm.

Abb. 3-3 beinhaltet für jeden Achsabstand den in der Parameterstudie ermittelten Kraftverlauf über die Bauteilhöhe sowohl für 4 cm als auch für 10 cm dicke FT-Betonschalen. Zusätzlich ist der theoretisch errechnete Verlauf der Verbindungsmittelkraft dargestellt. Dieser wird mithilfe des vorhandenen Frischbetondrucks in der Position des betrachteten Verbindungsmittels und der Einzugsfläche des Verbindungsmittels ermittelt:

$$F_{VBM} = \sigma_{\text{vorh}} \cdot A_{VBM} \quad (3-7)$$

Dieser Ansatz berücksichtigt, im Gegensatz zum Stabwerkprogramm, nicht die Systemsteifigkeit der Elementwand. Mit den gleichen Annahmen wird in den folgenden Kapiteln in umgekehrter Richtung aus einer am Verbindungsmittel ermittelten Kraft ein auf das Wandbauteil einwirkender Frischbetondruck errechnet. Die übrigen Abbildungen der Parameterstudie sind in Anhang A hinterlegt.

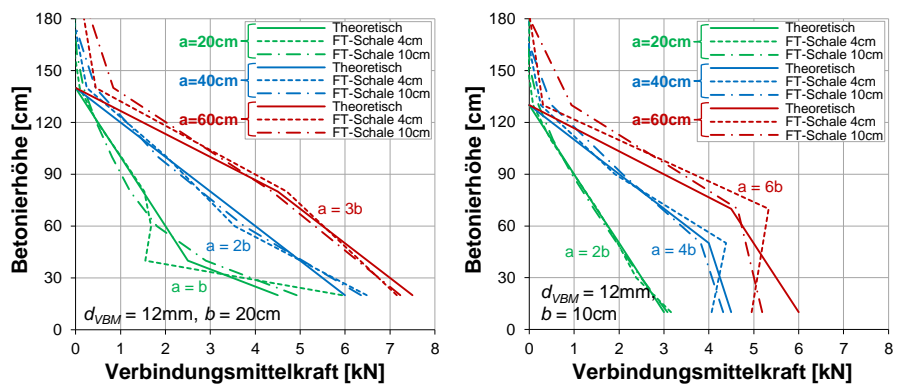


Abb. 3-3: Verbindungsmittelkräfte bei Variation der FT-Schalendicke und des Achsabstands der Verbindungsmittel

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem das Verhältnis zwischen Achsabstand a und Randabstand b der Verbindungsmittel einen entscheidenden Einfluss auf die in den Verbindungsmitteln wirkenden Kräfte hat. Folgende Beobachtungen können im Rahmen der Parameterstudie gemacht werden:

- bei $a = b$
 - Der Kraftverlauf weist eine Linkskrümmung auf.
 - Die maximale Kraft im untersten Verbindungsmittel ist bei Berücksichtigung der Systemsteifigkeiten immer viel größer als bei Nichtberücksichtigung (im Durchschnitt + 20 %).
 - Je weicher die Verbindungsmittel und je steifer die FT-Betonschalen sind, desto geringer ist die Beeinflussung durch das statische System der Wand.

- **bei $a = 2 \cdot b$**
 - Der Kraftverlauf ist nahezu linear.
 - Die maximale Kraft im untersten Verbindungsmittel ist bei Berücksichtigung der Systemsteifigkeiten immer etwas größer als bei Nichtberücksichtigung (maximal + 8 %).
 - Je weicher die Verbindungsmittel und je steifer die FT-Betonschalen sind, desto geringer ist die Beeinflussung durch das statische System der Wand.
- **bei $a = 3 \cdot b$**
 - Der Kraftverlauf weist eine leichte Rechtskrümmung auf.
 - Die maximale Kraft im untersten Verbindungsmittel ist bei Berücksichtigung der Systemsteifigkeiten immer etwas kleiner als bei Nichtberücksichtigung (im Durchschnitt - 4 %).
 - Die Steifigkeit der Verbindungsmittel und FT-Betonschalen haben nur einen sehr geringen Einfluss auf die Verbindungsmittelkräfte.
- **bei $a \geq 4 \cdot b$**
 - Der Kraftverlauf weist eine Rechtskrümmung auf.
 - Die maximale Kraft im untersten Verbindungsmittel ist bei Berücksichtigung der Systemsteifigkeiten immer viel kleiner als bei Nichtberücksichtigung.

3.2.4 Fazit der Parameterstudie und Ausschluss weiterer Parameter

Im Rahmen der Parameterstudie kann festgestellt werden, dass das statische System einer Elementwand die Verbindungsmittelkräfte beeinflusst. Die theoretischen Betrachtungen zeigen, dass der Einfluss umso niedriger ist, je höher die Biege- und Dehnsteifigkeiten der FT-Betonschalen (W9) und je niedriger die Biege- und Dehnsteifigkeiten der Verbindungsmittel (W8) sind. Der Rasterfläche der Verbindungsmittel (G5) wird kein nennenswerter Einfluss zugeteilt. Vielmehr spielt das Verhältnis zwischen Achs- und Randabstand der Verbindungsmittel eine große Rolle.

Um den Einfluss der betrachteten Parameter in einem Berechnungsmodell zu berücksichtigen, werden für diese Grenzwerte festgelegt. Unter Einhaltung der Grenzwerte kann ein pauschaler Druckzuschlag für den theoretisch berechneten Frischbetondruck festgelegt werden, welcher jede mögliche Kombination innerhalb der Grenzwerte abdeckt. Für Elementwände mit integriertem Dämmstoff werden folgende, praxisnahe Festlegungen getroffen:

1. Achsabstand $a \geq$ doppelter Randabstand b
2. FT-Betonschalendicke liegt zwischen 40 und 100 mm

Innerhalb dieser Grenzen liegt die maximale Abweichung zwischen dem theoretisch ermittelten Frischbetondruck und dem Frischbetondruck unter Berücksichtigung der Einflussparameter G5, W8 und W9 bei + 8 %. Dies wird im Verlauf der vorliegenden Arbeit mit einem pauschalen Druckzuschlag von 10 % berücksichtigt (siehe Kapitel 7.5).

Neben den Parametern, die die Steifigkeit einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff betreffen, werden in den weiteren Betrachtungen folgende Einflussparameter nicht weiter berücksichtigt:

- **G7** **Bewehrungsgrad im Bereich der Ortbetonergänzung**
- **B4** **Fallhöhe des Frischbetons beim Betonieren**

Auf der sicheren Seite liegend wird der Bewehrungsgrad im Bereich der Ortbetonergänzung nicht berücksichtigt, da vorhandene Bewehrung überwiegend eine Reduktion des Frischbetondrucks zur Folge hat (*Specht 1981*). Die Fallhöhe des Frischbetons beim Betonieren wird als fester Parameter gewählt, da diese bei der Ausführung auf der Baustelle mit maximal 2 m fest vorgeschrieben ist (siehe Kapitel 7.3).

3.3 Bezeichnungsschema der experimentellen Untersuchungen

Die allgemeine Bezeichnung der Versuchsreihen in den Kapiteln 3.4 bis 3.6 findet nach folgendem Schema statt:

AB-C-D-E-F-G-H (z. B. KV01-80-F4-EPS#-60-D-BR)

Mit	A	Versuchsreihe <i>KV = Kleinversuchsstand (Kapitel 3.4)</i> <i>GV = Großversuchsstand (Kapitel 3.5)</i> <i>HE = Hohe Elementwände I (Kapitel 3.6)</i>
	B	Nummer des Versuchs
	C	Dicke der Ortbetonergänzung in mm
	D	Konsistenzklasse des Ortbetons <i>Konsistenzklassen (F1, F2, F3, F4, F5, F6, SVB)</i>
	E	Typ des Dämmstoffs (Schalung 1) <i>EPS = expandierter Polystyrol-Hartschaumstoff (# für Folie auf Dämmstoff)</i> <i>XPS = extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff (* für profilierte Oberfläche)</i> <i>x = kein Dämmstoff vorhanden</i>
	F	Dicke des Dämmstoffs in mm <i>x = kein Dämmstoff vorhanden</i>
	G	Schalungsoberfläche 1 <i>D = Dämmstoff als Schalung (siehe E)</i> <i>BR = Beton rau</i> <i>BV = Beton verzahnt</i> <i>HG = Holz glatt</i>
	H	Schalungsoberfläche 2 <i>BR = Beton rau</i> <i>BV = Beton verzahnt</i> <i>HG = Holz glatt</i>

3.4 Untersuchungen am Kleinversuchsstand (KV)

Das Ziel der Untersuchungen am Kleinversuchsstand ist die Entwicklung eines Grundverständnisses für den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff. Unter Sicherstellung unveränderlicher bauausführungstechnischer Einflussparameter wird der Einfluss von geometrischen und materialspezifischen Parametern einer Elementwand auf den maximalen Frischbetondruck und den Verlauf der zeitlichen Frischbetondruckbeanspruchung untersucht. Dies ermöglicht die Referenz zu glatten Schalungsoberflächen in Anlehnung an *DIN 18218*. Im Rahmen der Versuche werden die Randbedingungen so gewählt, dass die Betonierhöhe zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes h_E nie erreicht wird und somit eine Erstarrung des Betons nie eintritt. Zudem findet keine lagenweise Verdichtung (siehe Kapitel 6.1), sondern eine Verdichtung bis zum Fußpunkt der Bauteile statt. So werden möglichst hohe Frischbetondrucke im Bauteil erzeugt.

3.4.1 Aufbau des Versuchsstands und Messtechnik

Im Rahmen der Kleinversuchsreihe wird ein Versuchsstand (siehe Abb. 3-4) konzipiert, der die Variation

- der Dicke der Ortbetonergänzung d_{OB} (G1),
- der Dicke des Dämmstoffs d_D (G2, hier jedoch konstant bei 60 mm),
- des Typs (W1) und der Oberflächenrauheit des Dämmstoffs R_D (G3),
- der Oberflächenrauheit der FT-Tragschale R_{TS} (G4) und
- der Konsistenzklasse des Ortbetons K (W5)

ermöglicht.

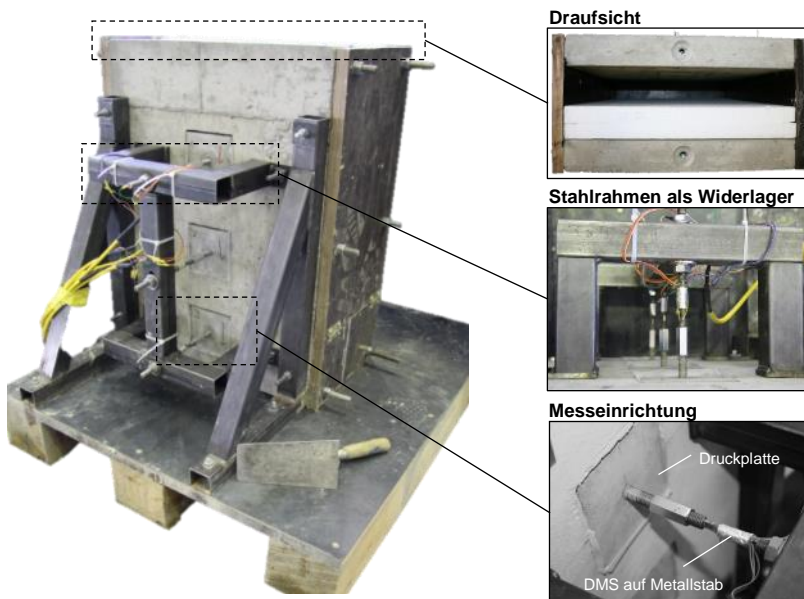


Abb. 3-4: Aufbau und Messtechnik des Kleinversuchsstands

Die Messung des Frischbetondrucks findet mithilfe von drei über die Höhe angeordneten Messstellen (Druckplatten) statt, die in Form von Betonquadern aus den Betonschalen ausgeschnitten werden (siehe Abb. 3-5). Der Frischbeton wirkt beim Verfüllen des Versuchsstands auf diese einen Druck aus, welcher auf die Metallstäbe übertragen wird. Die mithilfe der DMS gemessenen Dehnungsänderungen können anschließend in Druckspannungen umgerechnet werden (siehe Messkonzept in Kapitel 3.5.1). Die freie Verschiebbarkeit der Betonquader wird durch eine Umwicklung mit Teflonfolie und eine Silikonabdichtung gewährleistet.



Abb. 3-5: Verschiedene Schalungsoberflächen (Beton rau (links), Beton verzahnt (mitte), Holz glatt (rechts)) und Position der Messstellen DMS 1 bis DMS 3

3.4.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Die Bezeichnung der Versuche findet nach den Festlegungen in Kapitel 3.3 statt. Die nachfolgende Tab. 3-4 zeigt das Versuchsprogramm zu den Untersuchungen.

Tab. 3-4: Versuchsprogramm zu den Untersuchungen am Kleinversuchsstand

Nr.	Bezeichnung	Ortbeton -dicke [mm]	Konsistenz -klasse	Dämmstoff / 1. Schalung	2. Schalung
01	KV01-80-F4-EPS#-60-D-BR	80	F4	EPS mit Folie	Beton rau
02	KV02-80-F2-EPS-60-D-BR	80	F2	EPS	Beton rau
03	KV03-80-F4-EPS-60-D-BR	80	F4	EPS	Beton rau
04	KV04-80-SVB-EPS-60-D-BR	80	SVB	EPS	Beton rau
05	KV05-80-F2-XPS-60-D-BR	80	F2	XPS	Beton rau
06	KV06-80-F4-XPS-60-D-BR	80	F4	XPS	Beton rau
07	KV07-80-SVB-XPS-60-D-BR	80	SVB	XPS	Beton rau
08	KV08-80-F2-EPS-60-D-BV	80	F2	EPS	Beton verzahnt
09	KV09-80-F4-EPS-60-D-BV	80	F4	EPS	Beton verzahnt
10	KV10-80-SVB-EPS-60-D-BV	80	SVB	EPS	Beton verzahnt
11	KV11-80-F2-x-x-BV-BV	80	F2	Beton verzahnt	Beton verzahnt
12	KV12-80-F4-x-x-BV-BV	80	F4	Beton verzahnt	Beton verzahnt
13	KV13-80-F2-x-x-HG-HG	80	F2	Holz glatt	Holz glatt
14	KV14-80-F4-x-x-HG-HG	80	F4	Holz glatt	Holz glatt
15	KV15-160-F2-EPS-60-D-BR	160	F2	EPS	Beton rau
16	KV16-160-F4-EPS-60-D-BR	160	F4	EPS	Beton rau
17	KV17-160-SVB-EPS-60-D-BR	160	SVB	EPS	Beton rau

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

In der Versuchsreihe wird eine raue oder verzahnte FT-Tragschale mit EPS oder XPS auf der gegenüberliegenden Schalungsseite kombiniert. Außerdem werden zur Grenzwertbetrachtung beidseitig verzahnte und beidseitig glatte Schalungsflächen untersucht. Für jede Kombination werden Rüttelbetone der Konsistenzklassen F2 und F4 sowie ein SVB getestet (Rezepturen siehe Tab. F 1 in Anhang F). Der SVB liegt jedoch nicht im Fokus der Untersuchungen, sondern dient nur zur Gegenüberstellung mit dem Rüttelbeton. Versuch KV01 stellt einen Sonderfall dar, da die Oberfläche des EPS mit Folie bedeckt wurde, um eine glatte Oberfläche herzustellen und ein Eindringen von Zementleim zu unterbinden. Es werden zwei Ortbetondicken, 80 mm und 160 mm, untersucht.

Nach Mischen des Betons wird zuerst das Ausbreitmaß nach *DIN EN 12350-5* (bei SVB das Setzfließmaß nach *DIN EN 12350-8*) und die Rohwichte des Frischbetons nach *DIN EN 12350-6* im unverdichteten und verdichteten Zustand ermittelt. Anschließend wird der Frischbeton bis zur Oberkante des Versuchsstands eingefüllt und vollständig mithilfe eines Innenrüttlers verdichtet. Der Bereich der hierdurch entstehenden Setzung des Betons wird erneut aufgefüllt und verdichtet. Bei Verwendung von SVB findet keine mechanische Verdichtung statt. Der Druck wird nach Beendigung der Verdichtungsvorgänge für mindestens weitere 15 min gemessen. Vor Beginn der Erstarrung wird der Frischbeton aus dem Versuchsstand entfernt und der nächste Versuch durchgeführt.



Abb. 3-6: Verdichtung des Frischbetons (links) und ausbetonierter Versuchsstand (rechts)

3.4.3 Ergebnisse und Auswertung

Nachfolgende Abb. 3-7 und Abb. 3-8 zeigen exemplarisch den zeitlichen Verlauf der Frischbetondruckbeanspruchung an der untersten und gleichzeitig höchstbelasteten Messstelle (DMS 3). Die Durchführung eines Versuchs kann in drei Phasen unterteilt werden:

- 1. Phase: Auffüllen der Versuchsstands mit Frischbeton
- 2. Phase: Verdichtung des Frischbetons
- 3. Phase: Druckmessung ohne weitere Verdichtungseinwirkung

1. Phase: Auffüllen des Versuchsstands mit Frischbeton

Beim Befüllen des Versuchsstands ist bei allen Versuchen ein treppenförmiger Anstieg des Frischbetondrucks zu verzeichnen. Die Höhe des Drucks am Ende der 1. Phase vor dem Verdichten ist von der Oberflächenbeschaffenheit der Schalungsflächen und der Frischbetonkonsistenz abhängig. So verdoppelt sich bspw. der Druck vor dem Verdichten beim Einsatz von glattem Holz im Vergleich zu verzahntem Beton als Schalungsoberfläche (siehe Abb. 3-8). Der Grund hierfür ist die Verringerung des Wandreibungswinkels und somit die Erhöhung des Seitendruckbeiwerts.

2. Phase: Verdichtung des Frischbetons

Bei der Verdichtung des Frischbetons (nur bei Rüttelbetonen) findet eine schlagartige Erhöhung des Frischbetondrucks statt. Die Höhe des maximalen Drucks ist hierbei unabhängig von der Frischbetonkonsistenz, dem Typ des Dämmstoffs und der Oberflächenrauheit der angrenzenden Schalungsmaterialien (siehe Tab. 3-4). Bei der Verwendung von SVB (siehe Abb. 3-8) entstehen aufgrund der fehlenden mechanischen Verdichtung im Schnitt ca. 20 % geringere Frischbetondrücke (siehe KV03 und KV16). Die Ergebnisse lassen ebenfalls vermuten, dass bei größeren Ortbetondicken marginal geringere Frischbetondrücke entstehen.

Während der Verdichtung treten teilweise auffällige Sprünge im zeitlichen Verlauf des Frischbetondrucks auf (siehe Abb. 3-7). Diese werden durch anprallende Zuschlagkörner oder den Kontakt des Rüttlers mit den Messstellen verursacht und dürfen bei der Ermittlung der maximalen Druckwerte nicht maßgebend sein. Deshalb beinhalten die Diagramme in Abb. 3-9 und Abb. 3-10 den Mittelwert des Drucks über die Verdichtungszeit.

3. Phase: Druckmessung ohne weitere Verdichtungseinwirkung

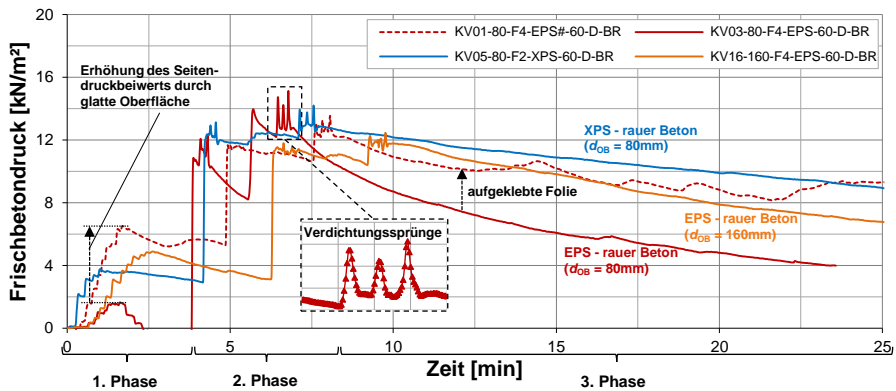


Abb. 3-7: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks beim Einsatz von EPS und XPS (DMS 3)

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

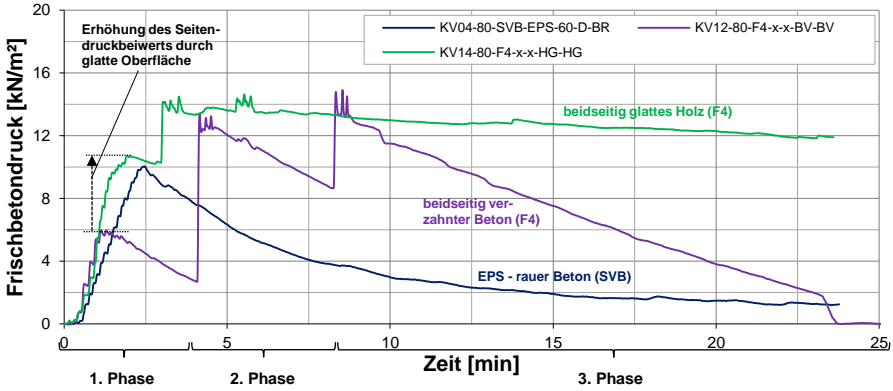


Abb. 3-8: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks beim beidseitigen Einsatz von schalglatter bzw. verzahnter Schalungsoberfläche sowie bei Verwendung von SVB (DMS 3)

Nach Beendigung der Verdichtungsvorgänge wurde der Druck mindestens für weitere 15 min gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass beim Einsatz von wasserabsorbierenden Schalungsmaterialien, wie bspw. bei einer rauhen Betonoberfläche oder einem offenporigen Dämmstoff aus EPS, ein sehr schneller Druckabfall zu verzeichnen ist. Wird der Dämmstoff aus EPS mit einer wasserundurchlässigen Folie beklebt oder ein geschlossenporiger Dämmstoff aus XPS verwendet, findet ein langsamerer Druckabfall statt. Bei beidseitig glatten Holzoberflächen ist nahezu kein Druckabfall zu beobachten.

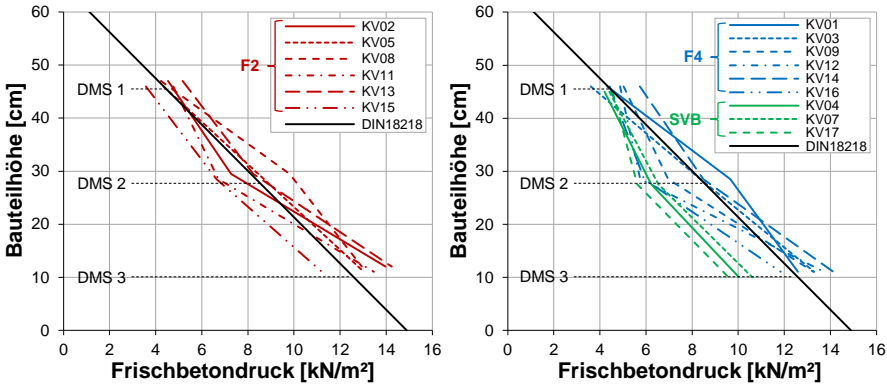


Abb. 3-9: Mittelwert des Frischbetondrucks über die Bauteilhöhe während der Verdichtung bei Verwendung der Konsistenzklassen F2 (links) und F4 sowie SVB (rechts)

Die beiden Diagramme in Abb. 3-9 zeigen den Druckverlauf über die Bauteilhöhe zum Zeitpunkt der zweiten Verdichtung bzw. bei maximalem Füllstand bei Verwendung von SVB. Als Referenz ist auch der charakteristische Frischbetondruck nach *DIN 18218* dargestellt, welcher in diesem Fall dem hydrostatischen Druck entspricht. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei allen Versuchen mit Rüttelbetonen der Konsistenzklasse F2 oder F4 im Mittel immer hydrostatischer Druck erreicht wird. Es wird auch ersichtlich, dass die Drücke bei Verwendung von SVB immer geringer sind.

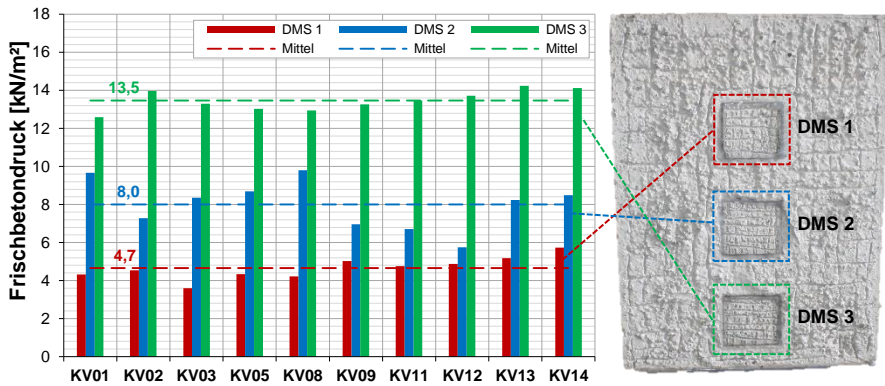


Abb. 3-10: Mittelwert des Frischbetondrucks an den drei Messstellen während der Verdichtung für die Konsistenzklassen F2 und F4 bei einer 80 mm dicken Ortbetonergänzung

Bei Betrachtung des maximalen Frischbetondrucks (Beton der Konsistenzklassen F2 und F4) an allen drei Messstellen (siehe Abb. 3-10) kann beobachtet werden, dass es nahezu keinen betragsmäßigen Unterschied zwischen den Ergebnissen gibt. Die prozentuale Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert beträgt an den Messstellen DMS 1 und DMS 3 weniger als 10 %, an der Messstelle DMS 2 maximal 13 %.

Eine Zusammenstellung aller ermittelten Ausbreitmaße, Rohdichten, Betonierstände und zugehörigen Frischbetondrücke ist in Anhang A zu finden.

3.4.4 Fazit

Unter den in der Kleinversuchsreihe gegebenen Randbedingungen kann die Dicke der Ortbetonergänzung (G1) als Einflussfaktor ausgeschlossen werden. Tendenziell entstehen bei geringen Ortbetondicken etwas höhere Frischbetondrücke. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird für alle weiteren Untersuchungen eine Ortbetondicke von 100 mm festgelegt. Des Weiteren wird für niedrige Bauteile, bei denen eine Verdichtung bis zum Fußpunkt der Bauteile stattfindet, die Konsistenz des Frischbetons (W5) als Einflussfaktor ausgeschlossen. In den weiteren Untersuchungsschritten ist zu prüfen, ob das vereinzelt Übersteigen des hydrostatischen Drucks im Rahmen der Messungenauigkeiten liegt oder im Rahmen einer Bemessung berücksichtigt werden muss. Die Kleinversuchsreihe zeigt, dass die Ergebnisse von *Pahn 2011* (siehe Kapitel 2.3.3) auf niedrige Bauteile nicht übertragbar sind. Eine Methode zur Festlegung, ab wann ein Bauteil als niedrig und ab wann als hoch eingestuft wird, wird anhand weiterer Untersuchungen erarbeitet.

3.5 Untersuchungen am Großversuchsstand (GV)

Die Untersuchungen am Großversuchsstand zielen genau wie die Versuche in Kapitel 3.4 auf die Untersuchung von geometrischen und materialspezifischen Parametern einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff ab. Auch hier wird gezielt die Erstarrung des Betons verhindert. Beim Verdichtungsprozess wird ebenfalls entgegen normativer Regelungen (siehe Kapitel 6.1) nicht lagenweise, sondern immer bis zum Fußpunkt der Bauteile verdichtet, um maximale Frischbetondrücke zu verursachen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen am Kleinversuchsstand, handelt es sich bei den folgenden Versuchen um Untersuchungen an echten Elementwänden mit integriertem Dämmstoff.

3.5.1 Aufbau und Entwicklung von Versuchsstand und Messtechnik

Die Herstellung der Versuchskörper findet nach dem bereits in Kapitel 2.1.3 erläuterten Verfahren statt. Die Elementwände mit einer Höhe von 160 cm, einer Breite von 80 cm und variabler Bauteildicke werden zur Versuchsdurchführung auf einer stabilen Unterkonstruktion aufgestellt und vertikal ausgerichtet (siehe Abb. 3-11). Unter der Ortbetonergänzung befinden sich zwei Kraftmessdosen (KMD) zur Erfassung der beim Einfüll- und Verdichtvorgang des Frischbetons entstehenden Vertikalkräfte. Hierdurch können Rückschlüsse gezogen werden, ob ein Teil des Ortbetongewichts durch Reibung über die Schalungsflächen abgetragen wird und ob dies einen erkennbaren Einfluss auf den horizontalen Frischbetondruck hat. Die Elementwände werden seitlich über stählerne Querträger und Gewindestangen mithilfe von Schalbrettern abgedichtet.

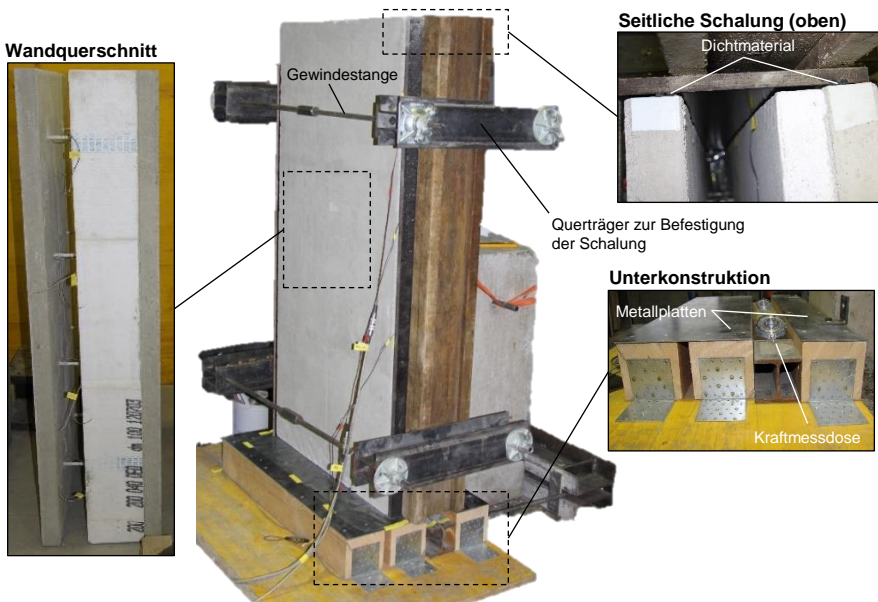


Abb. 3-11: Aufbau und Messtechnik des Großversuchsstands

Die Bestimmung des Frischbetondrucks erfolgt indirekt über Dehnungsmessungen am Verbindungsmittel (siehe Abb. 3-12). Hierzu werden die Rippen des Verbindungsmittels (a) lokal abgefräst, damit eine glatte Oberfläche (b) entsteht. Anschließend wird der DMS aufgeklebt (c) und mit einem Kitt auf Silikonbasis (d) abgedeckt. Dieser schützt den DMS vor Stößen durch herabfallenden Frischbeton und dem Eindringen des Zementleims während des Ausbetonierens der Wände.

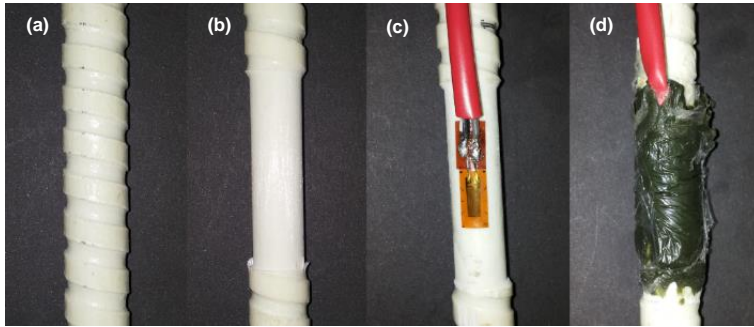


Abb. 3-12: Applikation von DMS auf Verbindungsmittel aus GFK

Der horizontale Frischbetondruck σ errechnet sich mithilfe der gemessenen Dehnung ε am Verbindungsmittel, des E-Moduls E und der Querschnittsfläche A des Verbindungsmittels sowie dessen Rasterfläche A_{VBM} :

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \cdot \frac{A}{A_{\text{VBM}}} \quad (3-8)$$

Die Herstellerangaben von 60.000 N/mm² für das E-Modul und 12 mm² für den Durchmesser des Verbindungsmittels wurden in eigenen Messungen bestätigt.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde die Eignung des vorgestellten Messkonzepts nachgewiesen, weshalb es auch in den nachfolgenden Versuchsreihen angewendet wird.

3.5.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Im Rahmen der Versuchsreihe werden

- der Typ des Dämmstoffs (W1),
- die Dicke des Dämmstoffs d_D (G2),
- die Oberflächenrauheit des Dämmstoffs R_D (G3) und
- die Oberflächenrauheit der FT-Tragschale R_{TS} (G4)

variiert. Die Dicke der Ortbetonergänzung (100 mm) und die Frischbetonkonsistenz (F2) werden konstant gehalten. Insgesamt wurden sechs Elementwände mit integriertem Dämmstoff hergestellt. Während der Versuchsdurchführung werden mithilfe von DMS die Dehnungen in den Verbindungsmitteln gemessen (siehe Abb. 3-12).

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

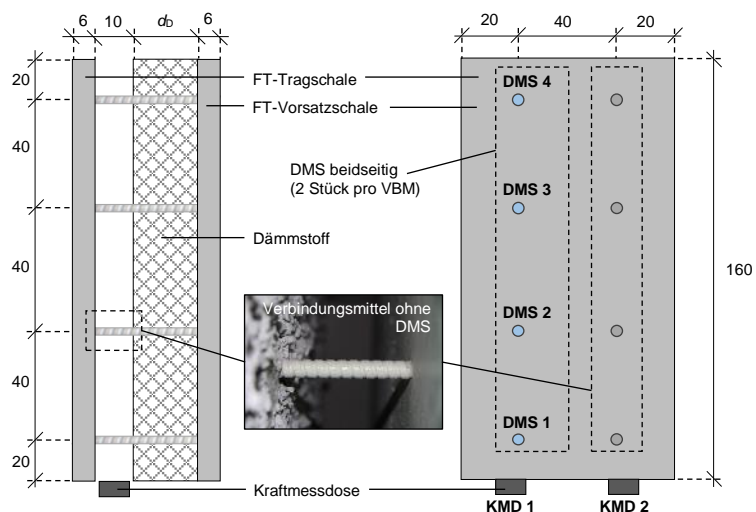


Abb. 3-13: Querschnitt (links) und Ansicht (rechts) der Großversuchskörper

Eine Auflistung des Versuchsprogramms ist in nachfolgender Tab. 3-5 gegeben.

Tab. 3-5: Versuchsprogramm zu den Untersuchungen am Großversuchsstand

Nr.	Bezeichnung	Ortbeton-dicke [mm]	Dämmstoff/1.Schalung	Dämmstoff-dicke [mm]	2.Schalung
01	GV01-100-F2-EPS-60-D-BR	100	EPS	60	Beton rau
02	GV02-100-F2-EPS-200-D-BR	100	EPS	200	Beton rau
03	GV03-100-F2-XPS-60-D-BV	100	XPS	60	Beton verzahnt
04	GV04-100-F2-XPS-200-D-BR	100	XPS	200	Beton rau
05	GV05-100-F2-XPS-60-D-BR	100	XPS	60	Beton rau
06	GV06-100-F2-XPS*-60-D-BR	100	XPS profiliert	60	Beton rau

Die Betonrezeptur und zugehörigen Eigenschaften sind in Anhang F zu finden. Bei der Versuchsdurchführung werden die Elementwände in drei Chargen zu je ca. 53 cm Höhe befüllt. Nach dem Einfüllen jeder Charge wird mit einem Innenrüttler (Rüttlermodell Werner aus Tab. 6-2) immer bis zum Fußpunkt der Wände verdichtet, da hierdurch möglichst hohe Frischbetondrücke in den Wänden erzeugt werden. Es ist zu beachten, dass diese Verdichtungsmethode nicht den derzeit gültigen Regeln nach *DIN 4235-1* und *DIN 4235-2* entspricht. Da alle Elementwände sehr schnell innerhalb von 30 min befüllt werden, beeinflusst auch hier die Erstarrung des Frischbetons die Höhe des Frischbetondrucks nicht.

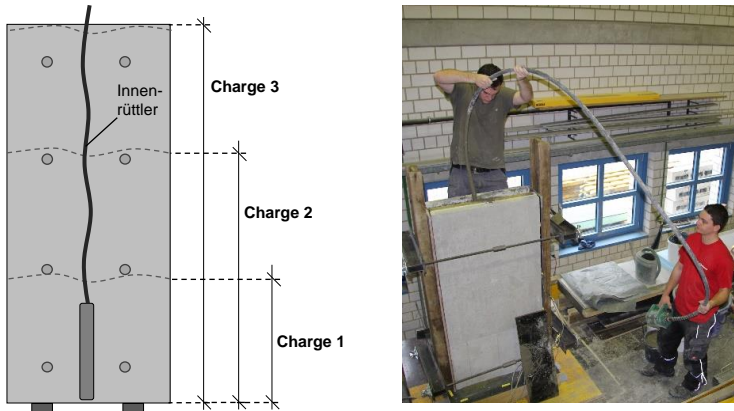


Abb. 3-14: Verdichtung bis zum Fußpunkt der Wände bei allen drei Chargen

3.5.3 Ergebnisse und Auswertung

Abb. 3-15 zeigt den zeitlichen Verlauf der Frischbetondruckbeanspruchung in Höhe der untersten Messstelle (DMS 1). Wie auch bereits bei den Kleinversuchen beobachtet, findet beim Befüllen der Elementwände mit Frischbetondruck ein treppenförmiger Anstieg des Drucks statt. Bei Beginn der Verdichtung ist eine schlagartige Erhöhung des Frischbetondrucks zu verzeichnen.

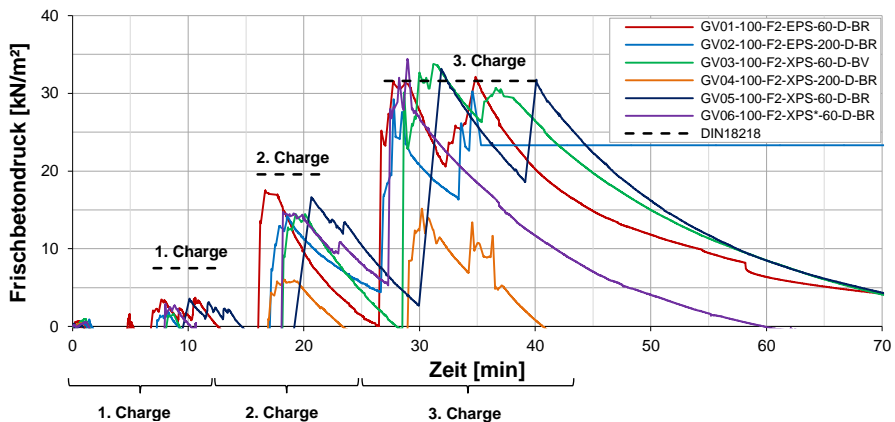


Abb. 3-15: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks an der untersten Messstelle (DMS 1)

Die Ergebnisse zeigen, dass beim Einfüllen und Verdichten aller drei Chargen kein nennenswerter Unterschied im maximalen Frischbetondruck zu erkennen ist. Die Druckhöhe liegt immer unterhalb oder im Bereich des hydrostatischen Drucks bzw. der *DIN 18218*. Lediglich GV04 weist auffallend niedrige Werte auf, was auf einen Messfehler zurückzuführen ist. Im Kurvenverlauf von GV02 ist ab der 36ten Minute ein Ausfall der Dehnungsmessung zu verzeichnen.

Der direkte Vergleich von GV03, GV05 und GV06 bestätigt die in Kapitel 3.4 getroffene Annahme, dass verschiedenartige Oberflächenrauheiten (profilierter Dämmstoff oder

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

verzahnte Betonoberfläche) keinen Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck haben. Ein Einfluss der Dicke des Dämmstoffs kann ebenfalls als vernachlässigbar klein eingestuft werden.

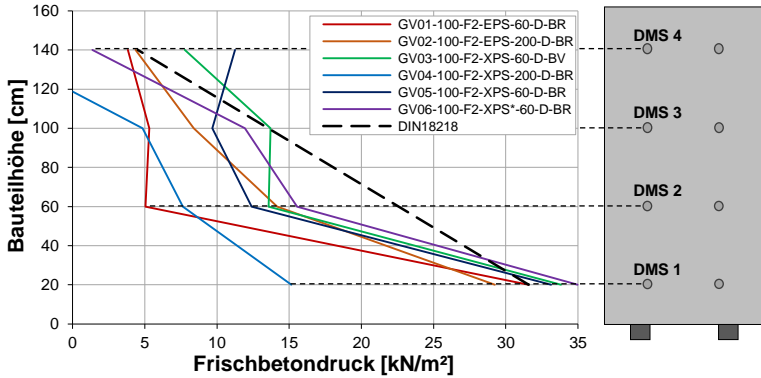


Abb. 3-16: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe beim Verdichtungsvorgang der 3. Charge (max. Füllstand) und Vergleich mit der *DIN 18218*

Bei Betrachtung des Druckverlaufs über die Bauteilhöhe beim Verdichtungsvorgang der 3. Charge nach Abb. 3-16 ist Ähnliches zu beobachten. Der maximale Druck an der untersten Messstelle (DMS 1) entspricht auch hier ungefähr dem hydrostatischen Druck. Die gemessenen Druckverläufe weisen jedoch, im Gegensatz zum hydrostatischen Druckverlauf, immer eine Linkskrümmung auf. Die Begründung liegt im statischen System der Elementwände und wurde bereits in Kapitel 3.2 erläutert.

Die Bestätigung, dass eine vollständige Verflüssigung und damit hydrostatischer Druck in den Elementwänden entsteht, liefert Abb. 3-17. Diese stellt die Ergebnisse der Messung mit den Kraftmessdosen 1 und 2 dar. Beim Vergleich der gemessenen Kraft am Fußpunkt infolge der Eigenlast des Frischbetons und der rechnerisch zu erwartenden Kraft wird deutlich, dass es nur sehr geringe Unterschiede gibt. Diese liegen im Bereich der Messtoleranzen und bestätigt die vollständige Verflüssigung des Frischbetons und die einhergehende Entstehung eines hydrostatischen Drucks.

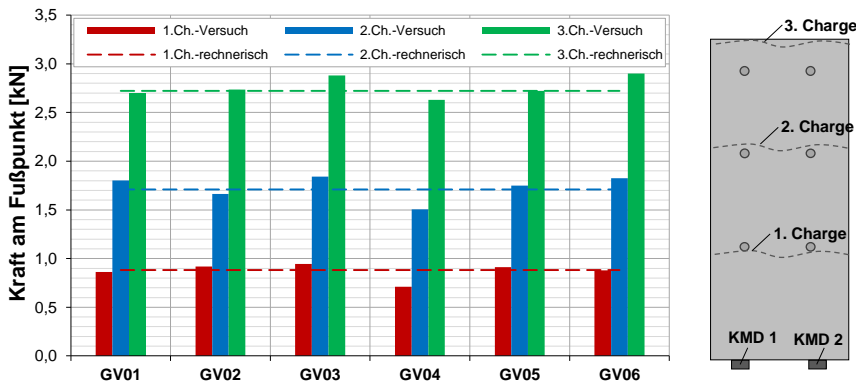


Abb. 3-17: Rechnerische und im Versuch ermittelte Vertikalkraft infolge der Verdichtung der drei Betonchargen

Eine Zusammenstellung aller ermittelten Ausbreitmaße, Rohdichten, Erstarrungszeiten, Betonierstände und zugehörigen Frischbetondrücke ist in Anhang B zu finden.

3.5.4 Fazit

Die Untersuchungen am Großversuchsstand können die Ergebnisse von *Pahn 2011* erneut nicht bestätigen. Solange die Erstarrung des Frischbetons noch nicht eingetreten ist und immer eine Verdichtung bis zum Fußpunkt des Wandbauteils stattfindet, haben der Dämmstofftyp (W1), die Dicke des Dämmstoffs (G2), die Oberflächenrauheit des Dämmstoffs (G3) und die Oberflächenrauheit der FT-Tragschale (G4) keinen Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck.

Es liegt die Vermutung nahe, dass sich der Einfluss eines Dämmstoffs erst ab einer bestimmten Bauteil- bzw. Betonierhöhe, in Verbindung mit der Erstarrung des Betons und dessen wasseraufnehmenden Eigenschaften, auswirkt. Auch die Tiefe der Verdichtung spielt eine wichtige Rolle, da durch die Vibrationen eine Verflüssigung des Betons veranlasst wird. Wird der Ort beton im Wandelement immer bis zum Fußpunkt verdichtet, so entstehen viel höhere Drücke, als bei einer lageweisen Verdichtung, wie sie nach *DIN 4235-2* vorgeschrieben ist.

3.6 Untersuchungen an hohen Elementwänden (HE)

Im Rahmen der in Kapitel 3.4 und 3.5 durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass bei einer Verdichtung des Betons über die gesamte Bauteilhöhe und vor Eintreten des Erstarrungseinflusses des Betons, Einflussparameter wie der Typ des Dämmstoffs, die Oberflächenrauheiten oder die Dicke der Ortbetonergänzung sowie die Konsistenz keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck haben. In der folgenden Versuchsreihe wird deshalb der Frischbetondruck an hohen Elementwänden sowie unter Berücksichtigung der Erstarrung des Betons und einer normgerechten Verdichtung untersucht.

3.6.1 Versuchsprogramm und Messtechnik

Die Versuchsreihe beinhaltet drei Elementwände mit einer Höhe von 400 cm, einer Breite von 80 cm und Verbindungsmitteln aus GFK in einem Raster von 40 x 40 cm (siehe Tab. 3-6).

Tab. 3-6: Versuchsprogramm zu den Untersuchungen an hohen Elementwänden

Nr.	Bezeichnung	Ortbeton-dicke [mm]	Dämmstoff/1.Schalung	Dämmstoff-dicke [mm]	2.Schalung
01	HE01-100-F4-EPS-60-D-BR	100	EPS	60	Beton rau
02	HE02-100-F4-XPS-60-D-BR	100	XPS	60	Beton rau
03	HE03-100-F4-x-x-HG-HG	100	Holz glatt	-	Holz glatt

Im direkten Vergleich stehen zwei baugleiche Wände HE01 und HE02, die sich nur in dem Typ des Dämmstoffs (W1) unterscheiden. Zum einen werden ein weicher EPS und zum anderen ein steifer XPS als Dämmstoff eingesetzt. Als Referenz wird eine dritte Wand HE03 ohne integrierten Dämmstoff, jedoch mit beidseitig innen liegender, glatter Schalung, getestet. Dieser Versuch stellt den Grenzwert zu HE01 und HE02 und gleichzeitig die Referenz zur *DIN 18218* dar (siehe Abb. 3-19).

Die Ermittlung des Frischbetondrucks findet mit dem Messkonzept nach Kapitel 3.5.1 statt. Insgesamt werden über die Bauteilhöhe 19 DMS pro Elementwand angeordnet, sodass eine möglichst genaue Erfassung des Frischbetondruckverlaufs über die Bauteilhöhe möglich ist. Die beidseitige Anordnung von DMS an den Messstellen DMS 1 bis DMS 8 ermöglichte die Berücksichtigung von Biegeeffekten. Als Ersatz für defekte DMS werden zusätzlich DMS 9 bis DMS 11 (einseitig) im unteren Bereich der Elementwände angeordnet. Die übrigen Verbindungsmittel werden ohne DMS eingebaut (siehe Abb. 3-18).

Nach Herstellung der Elementwände werden diese auf eine glatte Schalung aufgestellt und vertikal ausgerichtet. Anschließend werden die Anschlusskabel der DMS aus den Wänden herausgeführt und fixiert. Nach dem Anbringen eines seitlichen Dichtungsbandes wird die Schalung mithilfe von Querhölzern und Gewindestangen angebracht.

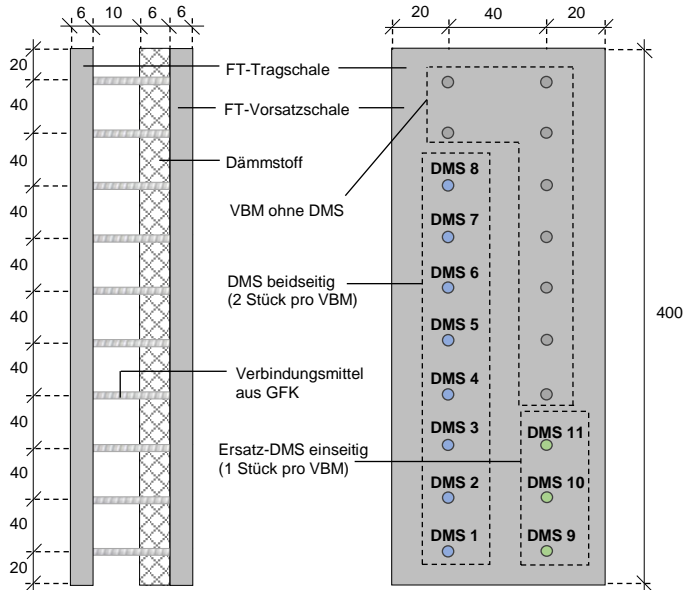


Abb. 3-18: Querschnitt (links) und Ansicht (rechts) der hohen Elementwände HE01 und HE02

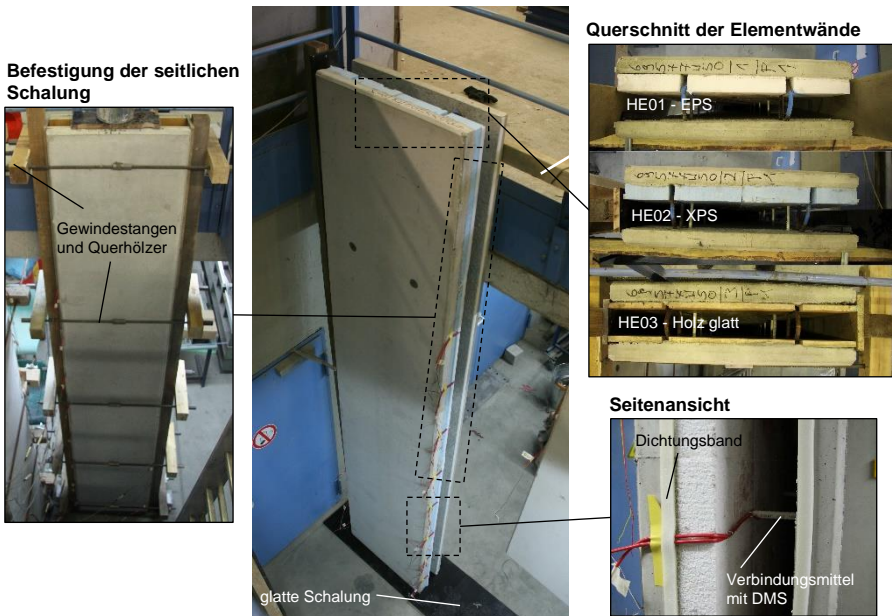


Abb. 3-19: Versuchsaufbau für die Untersuchungen an hohen Elementwänden

3.6.2 Versuchsdurchführung

Jede Wand wird unter Sicherstellung gleicher Randbedingungen und Orientierung an den Vorgaben der *DIN 4235-2* nach einem festgelegten Zeitplan ausbetoniert. Das Ausbetonieren der Wände erfolgt in acht Chargen mit einer Schichthöhe von je 53 cm.

Vor dem Einfüllen jeder Charge wird das Ausbreitmaß des Frischbetons ermittelt. Nach dem Einfüllen wird die Höhe des Betonspiegels gemessen und die Charge verdichtet. Die Verdichtung findet immer gleich lang und nach gleichem Muster statt. Die Eintauchtiefe des Innenrüttlers wird dabei so gewählt (zwischen 70 und 80 cm), dass gerade eine Verbindung mit der vorherigen Charge erreicht wird (siehe Anforderungen der *DIN 4235-2*). Nach dem Verdichtungsvorgang wird die Höhe des Betonspiegels erneut gemessen. Der zeitliche Abstand zwischen den Chargen beträgt ca. 20 min, sodass eine Betoniergeschwindigkeit von rund 1,6 m/h erreicht wird. Die im Rahmen der Versuche verwendete Betonrezeptur ist in Tab. F 3 von Anhang F hinterlegt.

3.6.3 Ergebnisse und Auswertung

Die Versuchskurven in Abb. 3-20, Abb. 3-21 und Abb. 3-22 zeigen den zeitlichen Verlauf des Frischbetondrucks an den Messstellen DMS 1 bis DMS 8 der Elementwände. Auch bei dieser Versuchsreihe ist beim Verdichten von jeder der acht Chargen eine schlagartige Erhöhung des Frischbetondrucks zu verzeichnen. Nach Beendigung eines Verdichtungsvorgangs kann ein Druckabfall beobachtet werden, dessen Höhe und Geschwindigkeit vom Aufbau der Elementwand abhängig ist (siehe Kapitel 3.4).

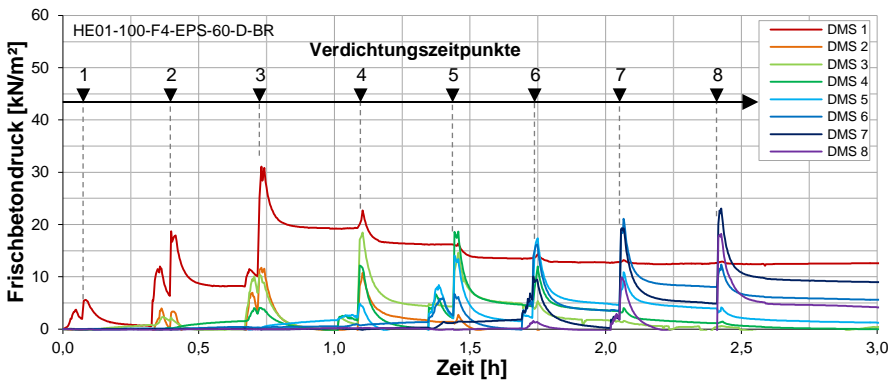


Abb. 3-20: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks bei Versuch HE01 (EPS)

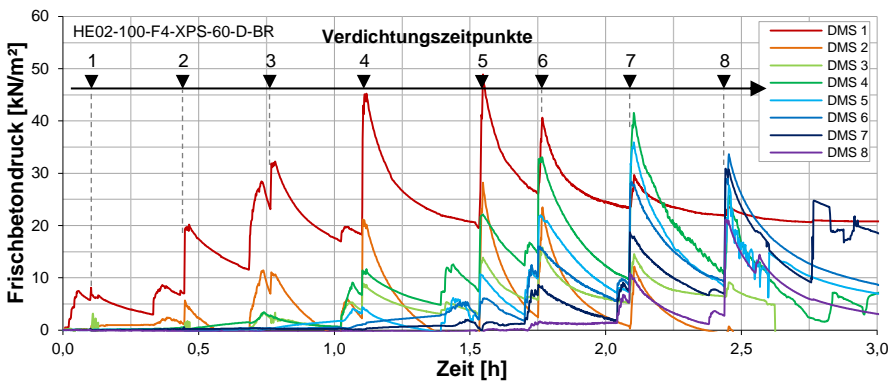


Abb. 3-21: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks bei Versuch HE02 (XPS)

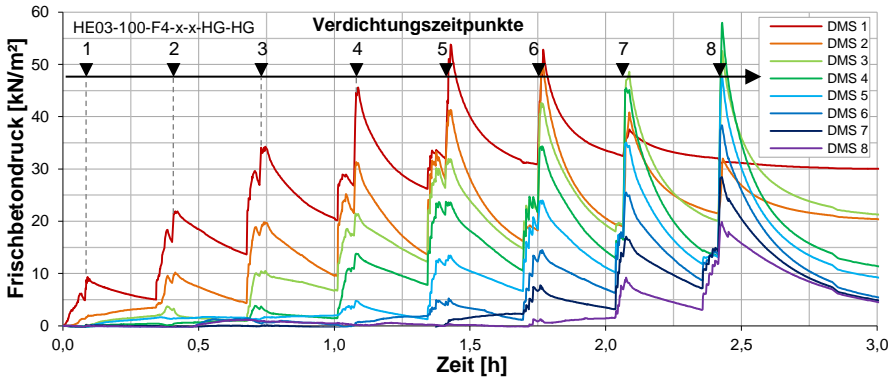


Abb. 3-22: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks bei Versuch HE03 (Holzschalung)

Zwischen den drei Versuchen ist ein deutlicher Unterschied im Druckverlauf zu erkennen. In Versuch HE03 (innen liegendes glattes Holz) entstehen mit Abstand die größten, bei Versuch HE01 (innen liegender EPS) die kleinsten Frischbetondrücke. Ein signifikanter Unterschied im zeitlichen Verlauf des Frischbetondrucks ist jedoch bis zur 3. Charge nicht zu erkennen. Beim Vergleich der Druckverläufe an der untersten Messstelle wird dies sehr gut sichtbar. Erst ab der 4. Charge stellt sich der Einfluss ein. Bei Verwendung von EPS findet keine weitere Druckerhöhung im Bauteil statt. Im Vergleich dazu erhöht sich der Frischbetondruck an der Messstelle DMS 1 beim Einsatz von XPS oder glatter Holzschalung bis zur 5. Charge.

Betrachtet man den zeitlichen Druckverlauf an einer einzigen Messstelle, z. B. DMS 1 in Abb. 3-23, so wird der beschriebene Effekt noch deutlicher. Bis inklusive der dritten Charge sind die Druckverläufe der drei Versuche fast identisch. Ein merklicher Unterschied ist im Druckabbau nach Beendigung der Verdichtung zu erkennen. Wie bereits in den Kapiteln 3.4 und 3.5 festgestellt wurde, fällt der Frischbetondruck beim Einsatz von EPS viel schneller ab, als beim Einsatz von XPS oder Holzschalung. Der Grund hierfür ist die Wasseraufnahmefähigkeit des EPS. Aus einer Umlagerung von Zementleim in den Dämmstoff resultiert eine steifere Frischbetonkonsistenz.

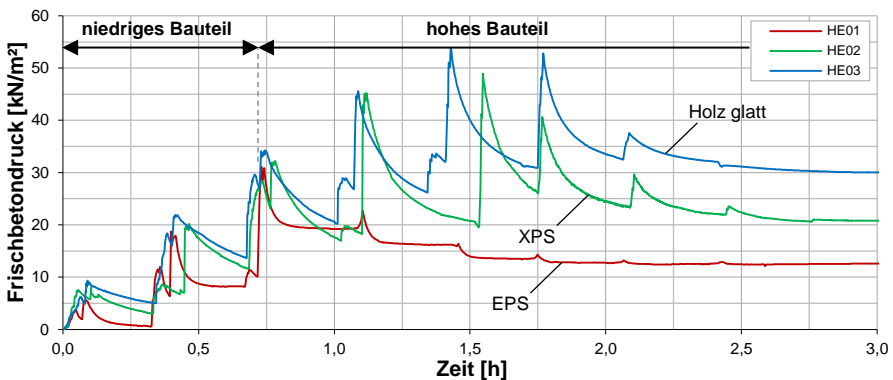


Abb. 3-23: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks an der untersten Messstelle (DMS 1)

Nach der 3. Charge, also ab einer Bauteilhöhe von ca. 150 cm, sind hohe Unterschiede im maximalen Druck zu verzeichnen. Im Weiteren werden deshalb folgende Begriffe definiert:

Niedriges Bauteil

Bei einem niedrigen Bauteil ist der maximale Frischbetondruck beim Verfüllen der Ortbetoneergänzung unabhängig von der Art der Schalung.

Hohes Bauteil

Bei einem hohen Bauteil ergibt sich der maximale Frischbetondruck beim Verfüllen der Ortbetoneergänzung in Abhängigkeit von der Art der Schalung.

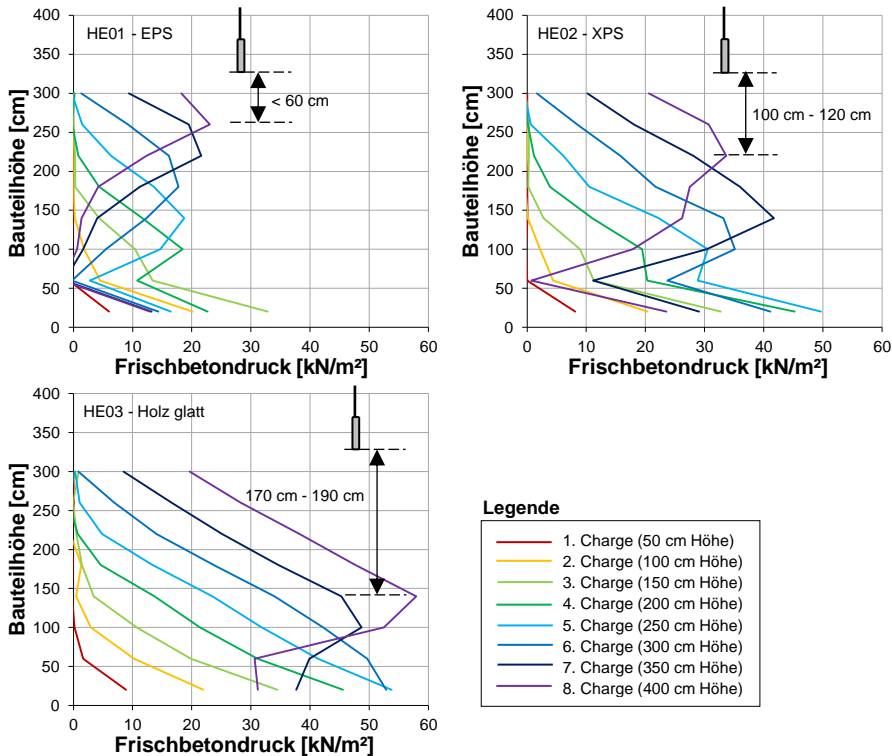


Abb. 3-24: Horizontaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe für alle Betonchargen

Der Druckunterschied zwischen den Versuchen ist vor allem bei der Darstellung des Frischbetondrucks über die Bauteilhöhe zu sehen. Abb. 3-24 zeigt die Beanspruchung über die Bauteilhöhe für die drei Versuche. Hierbei repräsentiert jede Farbe den Verdichtungsvorgang einer bestimmten Betoncharge. Bei den ersten drei Betonchargen entstehen in den Elementwänden annähernd lineare und ähnliche Druckverläufe. Ab der 4. Charge unterscheiden sich die Verläufe voneinander. Bei dem Versuch mit dem Dämmstoff aus EPS ist ein Abknicken des Druckverlaufs zu beobachten. Das bedeutet, dass kein hydrostatischer Druck mehr bis zum Fußpunkt der Elementwand herrscht. Bei jeder nachfolgenden Verdichtung entsteht immer in einem bestimmten Abstand Δh zur Spitze des Innenrüttlers ein Knick im Druckverlauf,

der die Stelle des maximalen Drucks kennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass je nach innen liegendem Material (EPS, XPS oder glatte Holzschalung) dieser Abstand Δh zwischen der Eintauchtiefe der Rüttelflasche und dem Ort des maximalen Drucks variiert. Bei EPS liegt der Abstand immer unter 60 cm, bei XPS zwischen 100 cm bis 120 cm und bei einer glatten Holzoberfläche zwischen 170 cm und 190 cm. Der Abstand Δh beschreibt die dynamische Tiefenwirkung und kennzeichnet den Wirkungsbereich des Innenrüttlers, in dem eine vollständige Verflüssigung des Frischbetons stattfindet. Bei großen Werten für Δh entsteht somit ein höherer Druck als bei niedrigen Werten. Eine Auffälligkeit zeigen die Messwerte an der Stelle DMS 1. Gerade bei den Versuchen HE01 und HE02 sind dort die Drücke immer höher als an der Stelle DMS 2. Vermutlich ist dies auf die Auflagerbedingungen am Fußpunkt der Elementwände (Verschiebungsbehinderung durch Reibeffekte mit dem Untergrund) zurückzuführen.

Die Versuche zeigen, dass beim Einsatz eines innen liegenden Dämmstoffs der beim Verfüllen der Ortbetonergänzung entstehende Frischbetondruck geringer ist, als bei einer glatten Schalung. Bei Betonierhöhen zwischen 150 und 400 cm beträgt der mittlere Frischbetondruck bei EPS 20,8 kN/m², bei XPS 42,3 kN/m² und bei glatter Schalung 51,8 kN/m². Der Frischbetondruck reduziert sich somit unter den getesteten Randbedingungen beim Einsatz von EPS bzw. XPS im Vergleich zu einer glatten Schalung um mehr als 60 % bzw. 20 %.

Eine Zusammenstellung aller ermittelten Ausbreitmaße, Rohdichten, Betonierstände, Erstarrungszeiten und zugehörigen Frischbetondrücke ist in Anhang C zu finden.

3.6.4 Fazit

Die Untersuchungen bestätigen, dass der Frischbetondruck bis zu einer gewissen Betonierhöhe unabhängig von einem innen liegenden Dämmstoff oder der Beschaffenheit der Schalungsoberflächen ist. Bis zu welcher Höhe (niedriges Bauteil) kein Einfluss vorhanden ist, muss im Rahmen der weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Erst bei größeren Betonierhöhen (hohes Bauteil) setzt eine Beeinflussung des Frischbetondrucks ein, was die Ergebnisse von *Pahn 2011* (siehe Kapitel 2.3.3) bestätigt. Hierfür sind die **Zementleimaufnahme von offenporigen Dämmstoffen** während den Verdichtungsvorgängen und eine damit einhergehende steifere Konsistenz des Frischbetons verantwortlich (siehe Kapitel 3.7). Bereits *Specht 1981* hat festgestellt, dass undichte Schalungen zum Verlust von Schmiermittel und damit zur Erhöhung der Viskosität führen. Dies beschreibt den gleichen Effekt. Außerdem hat er beobachtet, dass saugfähige Schalungen diesen Effekt verstärken.

Eine Konsistenzänderung hat neben einer Druckänderung auch eine Änderung der Verdichtungswirkung des verwendeten Innenrüttlers zur Folge (siehe Kapitel 6.1). Eine reduzierte Verdichtungswirkung des Rüttlers in Kombination mit einer veränderten Steifigkeit des Schalungssystems „Elementwand mit integriertem Dämmstoff“ im Vergleich zu einer beidseitig glatten Schalung führt zusätzlich zu Unterschieden in der Weiterleitung der Rüttelschwingungen in die Tiefe. Dies beeinflusst die **dynamische Tiefenwirkung Δh** , welche den Wirkungsbereich des Innenrüttlers kennzeichnet.

3.7 Einfluss der Zementleimaufnahme des Dämmstoffs auf das Ausbreitmaß

Es soll der Hypothese nachgegangen werden, dass Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol dazu neigen, Zementleim während der Verdichtung des Frischbetons aufzunehmen. Die Folge des Entzugs von Wasser und Zement ist eine Konsistenzänderung des Frischbetons.

3.7.1 Aufbau des Versuchsstands und Versuchsdurchführung

Zur Veranschaulichung des Zementleimentzugs wird eine Schalung mit zwei Kammern gebaut. Die eine Kammer besitzt nur glatte Schalungsoberflächen und die andere Kammer wird einseitig durch einen EPS-Dämmstoff begrenzt (siehe Abb. 3-25).

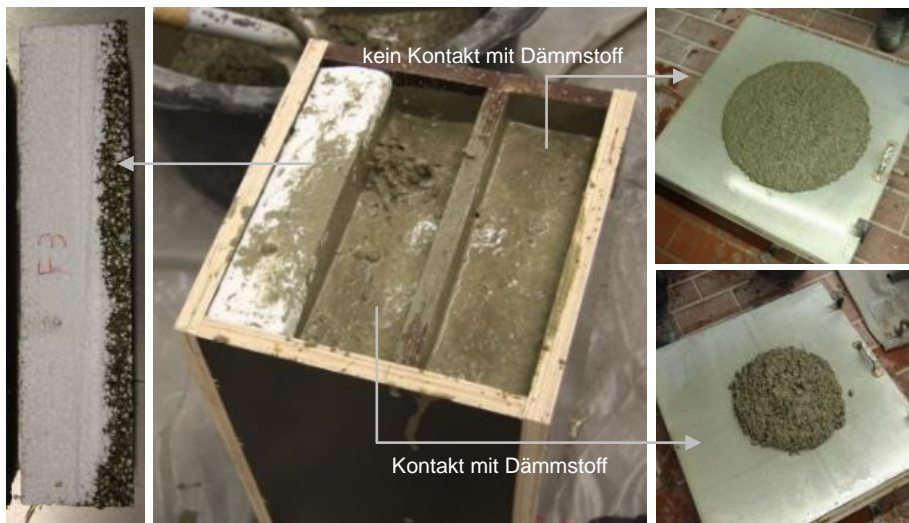


Abb. 3-25: Änderung des Ausbreitmaßes infolge der Zementleimaufnahme eines Dämmstoffs aus expandiertem Polystyrol (EPS)

Es werden insgesamt sechs Frischbetonmischungen hergestellt. Die Konsistenzklasse des Frischbetons liegt zwischen F2 und F4. Nach Herstellung der Frischbetonmischung werden beide Kammern des Versuchsstands mit Frischbeton befüllt und unter Verwendung eines Innenrüttlers verdichtet. Danach wird der Frischbeton wieder aus den Kammern entfernt und das Ausbreitmaß nach *DIN EN 12350-5* bestimmt (siehe Abb. 3-25 rechts).

3.7.2 Ergebnisse und Auswertung

Der Frischbeton aus der Kammer mit dem angrenzenden Dämmstoff aus EPS weist immer ein niedrigeres Ausbreitmaß auf, als der Frischbeton aus der Kammer mit umlaufend schalglatter Oberfläche (siehe Tab. 3-7). Die unterschiedlichen Ausbreitmaße nach dem Verdichten lassen Rückschlüsse auf die Zementleimaufnahme des Dämmstoffs zu, welche durch den Vergleich der Masse des Dämmstoffs vor und nach dem Kontakt mit dem Frischbeton bestätigt werden. Im

3.7 Einfluss der Zementleimaufnahme des Dämmstoffs auf das Ausbreitmaß

Durchschnitt erhöht sich die Masse des Dämmstoffs um ca. 284 g, was der aus dem Frischbeton entzogenen Zementleimmenge entspricht.

Tab. 3-7: Ausbreitmaß des Frischbetons und Masse des Dämmstoffs

Konsistenzklasse des Frischbetons	Ausbreitmaß a [cm]		Masse des Dämmstoffs m_D [g]	
	ohne EPS	mit EPS	vorher	nachher
F2	40	33	84,4	341,0
F2	39	34	86,1	309,6
F2	39	36	84,5	420,0
F3	46	42	86,7	398,9
F3	47	34	80,8	326,0
F4	49	38	82,3	415,5

Die Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass sich die Zementleimaufnahme des Dämmstoffes auf die Konsistenz des Betons auswirkt. Abb. 3-25 (links) zeigt den Dämmstoff in aufgeschnittener Darstellung. Die Dunkelfärbung kennzeichnet den Zementleimeintrag in den Dämmstoff.

3.8 Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Betrachtung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff zwischen niedrigen und hohen Bauteilen unterschieden werden muss. In welcher Höhe der Übergang zwischen einem niedrigen und einem hohen Bauteil stattfindet und von welchen Randbedingungen dieser abhängig ist, wird Bestandteil der weiteren Untersuchungen sein.

3.8.1 Niedrige Bauteile

Die Versuche an niedrigen Bauteilen (Kapitel 3.4 und 3.5) verdeutlichen, dass

- die Oberflächenrauheit der FT-Betonschalen (G4) und des Dämmstoffs (G3),
- der Typ des Dämmstoffs (W1),
- die Konsistenz des Ortbetons (W5) und
- die Dicke der Ortbetonergänzung (G1)

keinen Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck haben. Dies gilt nur für niedrige Bauteile, bei denen während der Betonage der Erstarrungsprozess des Betons noch nicht eingetreten ist und der Beton bis zum Fuß des Bauteils verdichtet wird. In diesem Fall kann die Höhe des Frischbetondrucks nach der aktuellen *DIN 18218* angenommen werden, da der Frischbeton während der Verdichtung immer vollständig verflüssigt wird und somit hydrostatischer Druck entsteht. Teilweise wird dabei der hydrostatische Druck sogar überschritten. Dies ist auf die Steifigkeit des Schalungssystems zurückzuführen (siehe Kapitel 3.2).

Im Gegensatz zum maximalen Frischbetondruck beeinflussen die oben genannten Parameter jedoch den zeitlichen Verlauf der Frischbetondruckbeanspruchung. Nach Beendigung eines Verdichtungs Vorgangs fällt der maximale Druck im Bauteil wieder ab. Die Höhe und Geschwindigkeit dieses Druckabfalls ist hierbei von der Oberflächenbeschaffenheit der an den Ortbeton angrenzenden Oberflächen, d. h. dem integrierten Dämmstoff und der FT-Tragschale, abhängig. Eine verzahnte Betonoberfläche oder ein offenporiger Dämmstoff führt während der Verdichtung zu Wassertransportprozessen im Ortbeton, wodurch eine Umverteilung des Wassers hervorgerufen wird. Es entsteht eine steifere Frischbetonkonsistenz (siehe Abb. 3-25), welche zu einem schnelleren Druckabfall führt. Beim Einsatz von XPS, welches aufgrund der geschlossenen Zellstruktur ein Eindringen von Wasser bei kurzzeitiger Druckbelastung fast vollständig verhindert, ist der Druckabfall viel geringer ausgeprägt als bei EPS. Auch bei einer dickeren Ortbetonergänzung findet ein langsamerer Abfall des Drucks statt, da prozentual geringere Mengen Wasser transportiert werden und sich die Konsistenz des Frischbetons auch nur weniger ändert. Die beiden Grenzwerte mit beidseitig verzahnter und beidseitig schalglatter Oberfläche verdeutlichen den Effekt (siehe Abb. 3-8). Werden zwei verzahnte Betonoberflächen gegenübergestellt, so findet ein schneller Druckabfall statt, da die Oberfläche viel größer ist und damit mehr Wasser aufnehmen kann. Beim Einsatz von beidseitig schalglatten Oberflächen kann genau das Gegenteil beobachtet werden. Der Druck fällt nach dem Verdichten nur sehr langsam ab.

Die Ergebnisse stützen die Vermutung, dass sich die Untersuchungsparameter aufgrund der beschriebenen Wassertransportprozesse erst bei höheren Bauteilen und lagenweiser Verdichtung auf den maximalen Frischbetondruck auswirken. Bereits verdichtete Betonierlagen weisen dann eine steifere Konsistenz auf, wodurch zum einen die Verdichtungswirkung in der Elementwand und zum anderen der Seitendruckbeiwert des Frischbetons beeinflusst werden.

3.8.2 Hohe Bauteile

Die Versuche an hohen Bauteilen (Kapitel 3.6) und der Nachweis der Zementleimaufnahme von EPS (Kapitel 3.7) zeigen, dass die geometrischen und werkstoffspezifischen Eigenschaften einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff erst ab einer gewissen Betonierhöhe und in Kombination mit den bauausführungstechnischen Parametern einen Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck haben.

Nach Einschätzung der bisherigen Untersuchungsergebnisse werden folgende Gründe und zugehörigen Parameter als maßgebend eingestuft:

- **Übergangshöhe zwischen niedrigem und hohem Bauteil**
 - B5 Betonierhöhe
Je nach Betonierhöhe wird zwischen niedrigen und hohen Bauteilen unterschieden.
- **Zementleimaufnahme von Dämmstoffen**
 - W1 Typ des Dämmstoffs
Offenporige Dämmstoffe aus EPS nehmen Zementleim auf und verändern die Frischbetonkonsistenz.
 - W5 Konsistenzklasse des Ortbetons
Die Zementleimaufnahme wird nicht nur vom Dämmstoff selbst sondern auch von der Frischbetonkonsistenz gesteuert.
 - G3 Oberflächenrauheit des Dämmstoffs
Je nach Ausprägung der Oberfläche kann es Unterschiede bei der Zementleimaufnahme geben.
- **Dynamische Tiefenwirkung**
 - W1 Typ des Dämmstoffs
Die Weiterleitung von Rüttelschwingungen in die Tiefe ist abhängig von dem Typ des Dämmstoffs.
 - W5 Konsistenzklasse des Ortbetons
Die Verdichtungswirkung des verwendeten Innenrüttlers ändert sich mit der Frischbetonkonsistenz.

Geometrische Parameter wie die Dicke der Ortbetonergänzung (G1) und des Dämmstoffs (G2), die Oberflächenrauheit der FT-Tragschale (G4) sowie die Höhe der Elementwand (G6) werden als vernachlässigbar eingestuft.

3 Voruntersuchungen zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter

Als nächste Verfahrensschritte folgen:

- Die detaillierte Betrachtung von Dämmstoffen aus EPS und die Untersuchung von deren Zementleimaufnahme (**Kapitel 4 und 5**).
- Die Analyse der dynamischen Tiefenwirkung von Innenrüttlern in Abhängigkeit vom Dämmstofftyp und von den Frischbetoneigenschaften (**Kapitel 6**).
- Die Ableitung eines Modells zur Berechnung des Frischbetondrucks unter Berücksichtigung aller maßgebenden Einflussparameter und bauausführungstechnischen Randbedingungen (**Kapitel 7**).
- Die Erarbeitung eines Berechnungsvorschlags für die Bemessung in der Praxis (**Kapitel 8**).

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

Die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 3 haben gezeigt, dass Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS) bei einer Frischbetondruckbelastung Zementleim aufnehmen. Zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Zementleimaufnahme ist zunächst eine genaue Kenntnis über die Interaktion zwischen üblicherweise eingesetzten Dämmstoffen aus EPS und Wasser notwendig.

Um ein allgemeines Verständnis für das Eindringen von Fluiden in EPS zu entwickeln, wird im Folgenden nach einer kurzen Einleitung über die Entwicklung und Marktbedeutung solcher Dämmstoffe (Kapitel 4.1) zunächst der Produktionsprozess beschrieben und auf aktuell verfügbare Produkte und deren Kennzeichnung eingegangen (Kapitel 4.2). Anschließend werden relevante Eigenschaften von EPS und deren Einflüsse auf die Wasseraufnahme näher erläutert (Kapitel 4.3). Im abschließenden Kapitel 4.4 werden aktuelle Norminhalte zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit von Dämmstoffen bei kurzzeitigem und langfristigem Kontakt mit Wasser zusammengefasst. Um den Bezug zur Frischbetondruckbelastung herzustellen, wird am Ende des Kapitels experimentell die Wasseraufnahme von verschiedenen EPS-Dämmstoffen bei kurzzeitiger, hoher Druckbeanspruchung versuchsgestützt ermittelt. Obwohl eine Wasseraufnahme von Dämmstoffen aus XPS bereits ausgeschlossen werden konnte (siehe Kapitel 3.8), werden an dieser Stelle noch zusätzlich zwei Dämmstoffe aus XPS untersucht. Ziel dieser Versuche ist die Bestimmung der Einflussparameter auf die volumenbezogene Wasseraufnahme eines Dämmstoffs. Da es auf dem Markt eine Vielzahl von Dämmstoffen aus EPS gibt, die nicht alle im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden können, braucht der Anwender in der Praxis einen Dämmstoffparameter, an den die Wasseraufnahmefähigkeit bzw. die Zementleimaufnahme in Bezug auf eine Frischbetondruckbelastung gekoppelt werden kann. Zudem wird in Kapitel 4.5 ein Ansatz zur automatisierten Erkennung des mittleren Porendurchmessers von EPS-Dämmstoffen mithilfe von Algorithmen aus der Bildverarbeitung erarbeitet.

4.1 Entwicklung und Marktbedeutung

Expandierte Schaumstoffe aus Polystyrol (EPS) werden dort eingesetzt, wo ein hohes Isoliervermögen bei geringem Raumgewicht und gleichzeitig guten mechanischen Eigenschaften benötigt wird. Das weit gespannte Verwendungsspektrum, welches u. a. aus der freien Formgebung im Produktionsprozess resultiert, reicht von der Wärme- und Schallisolierung im Gebäude oder in der Kühltechnik über den Einsatz als Auftriebsmittel (z. B. im Bootsbau oder bei Wasserhebeeinrichtungen) bis hin zur Verpackungsindustrie. Aus der kompakten Struktur von Polystyrol entsteht bei der Produktion von EPS ein leichter, geschlossenzelliger Aufbau mit ähnlicher Beständigkeit wie Polystyrol des gleichen Molekulargewichts. Der dabei realisierbare Rohdichtebereich von ca. 12 bis 300 kg/m³ bietet ein breites Spektrum an mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften (siehe *Vieweg u. Daumiller 1969*).

Die Erfindung von EPS geht ins Jahr 1951 auf Dr. Fritz Stastny und Dr. Karl Buchholz, Mitarbeiter der BASF SE in Ludwigshafen, zurück. In den darauf folgenden Jahren

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

wurde das unter dem Markennamen Styropor® bekannte Produkt bereits weltweit vermarktet. Als wichtiges Einsatzgebiet von EPS hat sich in den letzten Jahrzehnten das Bauwesen im Bereich des Wärmeschutzes herausgestellt. Im Jahr 2001 betrug der Marktanteil von EPS an der Summe der in Deutschland verwendeten Dämmstoffe knapp 30 % (siehe Abb. 4-1 links). Dies entspricht einer Menge von rund 9 Mio. m³ (Boy 2005). Unter Ansatz einer mittleren Rohdichte des EPS-Dämmstoffs sind das 0,2 Mio. t, was einem prozentualen Anteil von mehr als 6 % am weltweiten Gesamtverbrauch gleichgestellt ist. Die Entwicklung des weltweiten Verbrauchs von EPS zwischen 2001 und 2011 ist in Abb. 4-1 (rechts) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Verbrauch innerhalb von 10 Jahren um fast 80 % angestiegen ist. Die Anteile von Asien und Europa betragen hierbei 113 % und 61 %, der Anteil von Nordamerika hat sich hingegen geringfügig verringert.

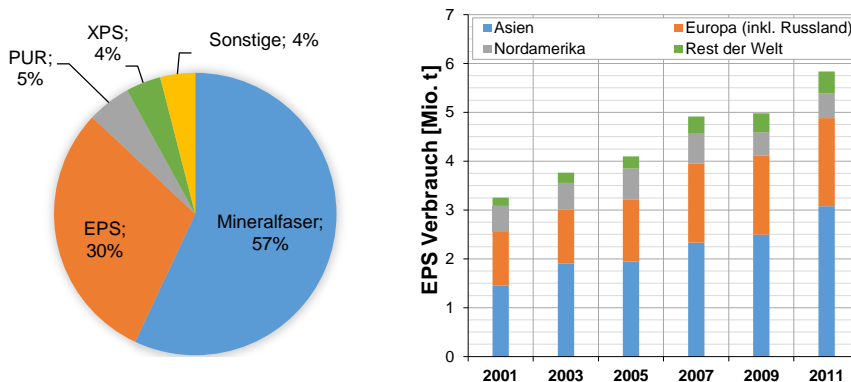


Abb. 4-1: Marktanteile der in Deutschland verwendeten Dämmstoffe im Jahr 2001 (links: in Anlehnung an Boy 2005) und Entwicklung des weltweiten Verbrauchs von EPS zwischen 2001 und 2011 (rechts: in Anlehnung an Winterling u. Sonntag 2011)

In Europa können ca. 80 % des Gesamtverbrauchs von EPS auf das Bauwesen zurückgeführt werden. Dies ist überdurchschnittlich viel, da im weltweiten Vergleich dieser Wert nur bei ca. 50 % liegt. Der prozentual nächstgrößere Anteil geht auf die Verpackungsindustrie zurück. Nach Einschätzungen von Boy 2005 wird in der deutschen Bauindustrie der Hauptanteil des EPS zur Dämmung von Gebäudefassaden verwendet. Einen hohen Einsatz findet EPS auch als Trittschalldämmung oder zur Dämmung von Flachdächern.

4.2 Produktionsprozess, Produkte und Kennzeichnung von EPS-Dämmstoffen

Die Technik zur Herstellung von Dämmstoffen aus EPS hat sich seit ihrer ersten Anwendung in den 50er Jahren zwar etwas gewandelt und ständig weiterentwickelt, das Grundprinzip ist jedoch gleich geblieben.

4.2.1 Herstellung von expandierbarem Polystyrol (Polystyrol-Granulat)

Polystyrol (kurz: PS) ist ein transparenter, thermoplastischer Kunststoff, der die Grundlage für die Herstellung von Dämmstoffen aus EPS ist. Thermoplaste äußern

sich durch ihre irreversible Verformungsfähigkeit in einem definierten Temperaturbereich. Die vielseitigen Verarbeitungsmöglichkeiten dieses Werkstoffs durch Färben und Lackieren (z. B. Werbeschilder), Spritzgussverarbeitung, Extrusion, Tiefziehen und Thermoformung zu Platten und Folien, spanabhebende Bearbeitung (z. B. Sägen, Fräsen oder Schleifen), Pressen und Sintern, Verkleben oder Schweißen weisen auf ein weit gespanntes Spektrum der Einsatzmöglichkeiten hin. Allein die Verwendung von Polystyrol in der Verpackungsindustrie zeigt, dass dieser Stoff im modernen Zeitalter nicht mehr wegzudenken ist.

Der Ausgangsstoff zur Herstellung von Polystyrol ist in der Regel die chemische Verbindung Ethylbenzol (Summenformel: C_8H_{10}), welche bspw. als Produkt bei der Gewinnung von fossilen Brennstoffen entsteht. Ethylbenzol ist ein Kohlenwasserstoff und hat das Erscheinungsbild einer farblosen, brennbaren Flüssigkeit mit benzolähnlichem Geruch. In der Regel wird durch Dehydrierung des Ethylbenzols, wobei aus der chemischen Verbindung Wasserstoff abgespalten wird, monomeres Styrol gewonnen. Anschließend wird im Polymerisationsprozess aus monomerem Styrol der Grundstoff Polystyrol hergestellt (siehe Abb. 4-2). Der Polymerisationsprozess ist durch eine Kettenreaktion von reaktionsfähigen Monomeren gekennzeichnet, was den Aufbau einer Molekülkette zur Folge hat.

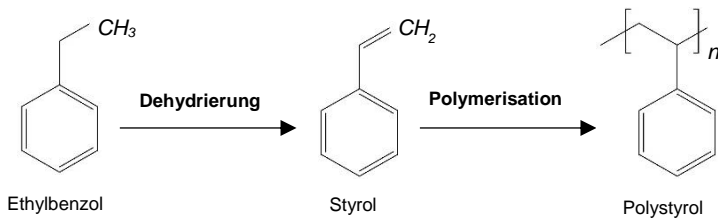


Abb. 4-2: Schemadarstellung von der Gewinnung des Grundstoffs Polystyrol aus Ethylbenzol

Vor oder während des Polymerisationsprozesses werden niedrig siedende Kohlenwasserstoffe wie Propan, Butan, Pentan oder Hexan im Styrol gelöst, welche als chemisch stabile Treibmittel für den späteren Expansionsprozess dienen. Bei der Herstellung von Dämmstoffen aus EPS hat sich Pentan durchgesetzt. Das Treibmittel hat die Aufgabe das Polystyrol beim Erwärmen unter Verdampfung aufzublähen. Als Endprodukt im Polymerisationsprozess entstehen perlenförmige, treibmittelhaltige Polystyrol-Granulate mit Durchmessern zwischen 0,4 bis 2,5 mm (*Vieweg u. Daumiller 1969*). Perlgrößen unter 0,1 mm sind unerwünscht, da diese kaum aufgeschäumt werden können. Je nach Einsatzgebiet können die Granulate gesiebt und in Korngrößenbereiche eingeteilt werden. Zur Herstellung von expandierten Polystyrol-Hartschaumstoffen ist eine enge, jedoch nicht zu enge Korngrößenverteilung erforderlich, da kleinere Perlen die Zwischenräume von größeren Perlen ausfüllen. Bei zu enger Korngrößenverteilung können so unerwünschte Hohlräume in der dichtesten Kugelpackung entstehen. Zur Verbesserung der Rieselfähigkeit und Vermeidung des Zusammenklebens kann die Granulatoberfläche mit Gleitmittel oder Puder behandelt werden. Die beschriebene Perlpolymerisation in Gegenwart von Treibmittel ist das wirtschaftlichste Verfahren zur Herstellung von expandierbarem Polystyrol-Granulat. Andere Verfahren zur

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

Einbringung des Treibmittels sind bspw. die Substanzpolymerisation, Diffusion oder Extrusion, welche in dieser Arbeit jedoch nicht weiter erläutert werden (*Vieweg u. Daumiller 1969*).

Zur Erhöhung des Widerstands gegen Brandeinwirkungen werden während der Polymerisation zusätzlich in geringen Mengen Flammenschutzmittel hinzugefügt. Je nach Produkt und Anwendungsgebiet liegt die Menge zwischen 0,5 und 2,0 Massenprozent (*EPD 2012a, EPD 2012b, EPD 2012c*). Erfahrungsgemäß hat sich in den letzten Jahrzehnten vor allem Hexabromcyclododecan (HBCD) als geeignet herausgestellt, da sich dieses während der Polymerisation in das Zellgerüst des Polystyrols fest eingliedert. Aufgrund zunehmender Umweltbedenken liegt jedoch seit dem 21.08.2015 für HBCD ein weltweites Herstellungs- und Vermarktungsverbot vor, sofern keine Ausnahmegenehmigung für Einzelanwendungen vorliegt. Ein alternatives Flammenschutzmittel, welches bereits als Ersatz für HBCD bei der Herstellung verwendet wird und die Umweltauflagen erfüllt, ist Polymer-FR, ein bromiertes Styrol-Butadien-Copolymerisat (*EPD 2015*). Zur Erhöhung der Wärmedämmwirkung werden in Polystyrol-Granulate seit einigen Jahren auch zusätzlich Grafitpartikel eingebracht (z. B. bei Neopor®), welche die Wärmestrahlung reflektieren und dadurch die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs herabsetzen (*EPD 2012a, BASF 2014d, Winterling u. Sonntag 2011*). Zurzeit gibt es auf dem Markt ein vielseitiges Angebot an Granulaten. Sie unterscheiden sich im Treibmittelgehalt, dem Vorhandensein von Flammenschutzmitteln und in der Korngrößenverteilung.

4.2.2 Produktion von Dämmstoffen aus EPS

Der Ausgangsstoff zur Produktion von EPS sind treibmittelhaltige Granulate, welche transport-, riesel- und lagerfähig sind. Die perlenförmigen Polystyrol-Granulate werden direkt an den Dämmstoffhersteller geliefert und dort in drei nachgelagerten Verarbeitungsschritten zum fertigen Produkt weiterverarbeitet. Die Granulate sollten nach Möglichkeit bei weniger als 25°C in dicht verschlossenen Behältern gelagert werden, da sonst bei längerer Lagerung bereits Teile des flüchtigen Treibmittels entweichen können (*Vieweg u. Daumiller 1969*).

Schritt 1: Vorschäumen

Beim Vorschäumen werden die treibmittelhaltigen Granulate in dampfdurchströmten Kesseln, den sog. Vorschäumern, für ca. 1 bis 10 min (*Vieweg u. Daumiller 1969*) mit heißem Wasserdampf auf ca. 100°C (*Boy 2005*) erhitzt, wodurch der Erweichungspunkt des thermoplastischen Materials überschritten wird. Gleichzeitig verdampft das in dem Granulat eingebundene Treibmittel, was zum Aufblähen des Polystyrol-Granulats führt. Es entstehen geschlossenzellige Schaumstoffpartikel mit dem 20 bis 50-fachen des ursprünglichen Volumens. Beim Prozess des Vorschäumens findet noch keine Verbindung der einzelnen Partikel statt. Je nach Vorschäumungsgrad, welcher durch die Steuerung der Dauer und Intensität der Erwärmung geregelt wird, kann bereits schon in diesem Schritt die Rohdichte des fertigen EPS-Dämmstoffs eingestellt und vorbestimmt werden.

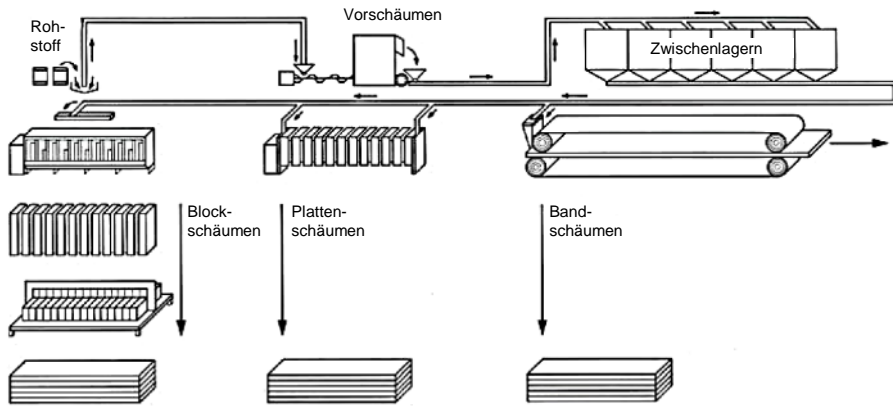


Abb. 4-3: Schematische Darstellung der Herstellung von EPS aus expandierbarem Polystyrol-Granulat (in Anlehnung an Boy 2005)

Schritt 2: Zwischenlagerung

Nach dem Vorschäumvorgang müssen die expandierten Schaumstoffpartikel zwischengelagert werden. Ziel der Zwischenlagerung ist der Druckausgleich zwischen Schaumstoffpartikel und umgebener Luft und die damit einhergehende Stabilisierung der Partikel. Je nach Schüttdichte der Partikel, Lagerungstemperatur und späterem Anwendungsgebiet des herzustellenden Dämmstoffs beträgt die Zwischenlagerungszeit zwischen 4 und 48 h (BASF 2013, BASF 2014a, BASF 2014b, BASF 2014c, BASF 2014e). Wichtig bei der Zwischenlagerung sind möglichst luftdurchlässige Behälter, damit der Druckausgleich in den Schaumstoffpartikeln begünstigt wird.

Schritt 3: Ausschäumen

Beim letzten Arbeitsschritt werden die Schaumstoffpartikel bei 110 bis 120°C (Boy 2005) unter Wasserdampfzufuhr in sog. Dampfstoßformen ein weiteres Mal expandiert und an den Berührungsflächen zu einem dichten Schaumstoff zusammengeschweißt. Vor dem Ausschäumungsprozess befinden sich zwischen den einzelnen Schaumstoffpartikeln in loser Schüttform ca. 40 % Luft. Bei der Expansion während des Ausschäumens sollen die vorhandenen Hohlräume möglichst gut ausgefüllt werden, damit ein homogenes Schaumstoffgebilde entsteht und Hohlstellen vermieden werden (Vieweg u. Daumiller 1969).

Es kann zwischen drei Verfahren des Ausschäumens unterschieden werden. Am häufigsten findet das sog. *Blockschäumen* statt, bei dem die Schaumstoffpartikel in quaderförmige Blockformen eingefüllt und dort ausgeschäumt werden. Anschließend werden die großformatigen Dämmstoffblöcke nach einer gewissen Abkühlzeit thermisch mit elektrisch erhitzten Heißschneidedrähten „heiß“ oder mechanisch mit Bandsägen „kalt“ in die gewünschte Größe zugeschnitten. Beim zweithäufigsten Verfahren werden Platten als Formteile durch das sog. *Plattenschäumen* hergestellt, d. h. die Dämmstoffplatten werden bereits in den gewünschten Abmessungen geschäumt und müssen nicht mehr zugeschnitten werden. Ein weiteres Herstellungsverfahren ist das *Bandschäumen* oder auch *Extrusionsverfahren*. Hier

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

wird in einer Doppelbandanlage zwischen zwei Stahlbändern eine fortlaufende Dämmstoffplatte mit festgelegter Dicke hergestellt, die im Anschluss auf die gewünschte Länge zugeschnitten wird. Die genannten Verfahren ermöglichen die Herstellung von Dämmstoffen mit unterschiedlichen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften. Viele Eigenschaften eines Dämmstoffs können durch die gezielte Einstellung einer bestimmten Rohdichte gesteuert werden. Bei dem Großteil der Anwendungen im Bauwesen liegt diese meisten zwischen 15 und 30 kg/m³ (Boy 2005).

Je nach Herstellungsverfahren wird zwischen *Blockware* beim Blockschäumen und *Automatenware* beim Platten- oder Bandschäumen unterschieden. Der Unterschied äußert sich vor allem bei der Ausbildung der Oberfläche der Dämmstoffplatten. Da der Dämmstoff bei Automatenware direkt in der benötigten Dicke hergestellt wird, entsteht eine gut verschweißte, glatte Oberfläche. Bei Blockware, welche noch in die gewünschte Form zugeschnitten werden muss, entsteht je nach Schneidverfahren eine rauere, offenere Oberfläche. Neben dem Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit haben die unterschiedlichen Herstellungsverfahren auch einen Einfluss auf die räumliche Verteilung der Rohdichte. Für besondere Anwendungsfälle, z. B. zur Sicherstellung einer optimalen Putzhaftung oder eines besseren Verbundes zu anbetonierten Betonbauteilen, kann auf den Dämmstoff zusätzlich eine Profilierung aufgebracht werden.

4.2.3 Zusammenstellung von Produkten zur Herstellung von EPS

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die von der BASF SE in Ludwigshafen erhältlichen, expandierbaren Polystyrol-Granulate. Tab. 4-1 zeigt eine Zusammenstellung der Produkte mit den zugehörigen Korngrößenklassen und den typischen Rohdichtebereichen, die mit dem Produkt hergestellt werden können.

Tab. 4-1: Zusammenstellung von Produkten der BASF SE in Ludwigshafen (BASF 2013, BASF 2014a, BASF 2014b, BASF 2014c, BASF 2014e)

Produkt	Korngrößenklasse [mm]			Typischer Dichtebereich des fertigen Dämmstoffs [kg/m ³]			Mittlerer Porendurchmesser des fertigen Dämmstoffs [mm]		Geeignet für den Einsatz in Elementwänden	
	Bereich	Min.	Max.	Bereich	Max.	Min.	20fach	50fach		
Styropor®	F 215 E	1,0 - 2,0	1,0	2,0	12 - 20	20	12	4,1	5,5	ja
	F 315 E	0,7 - 1,0	0,7	1,0	12 - 25	25	12	2,3	3,1	ja
	F 415 E	0,4 - 0,7	0,4	0,7	15 - 25	25	15	1,5	2,0	ja
	F 295 E	1,0 - 2,3	1,0	2,3	15 - 30	30	15	4,5	6,1	ja
	F 395 E	0,7 - 1,0	0,7	1,0	15 - 30	30	15	2,3	3,1	ja
	F 495 E	0,4 - 0,7	0,4	0,7	17 - 30	30	17	1,5	2,0	nein
	P 226	0,9 - 1,3	0,9	1,3	15 - 20	20	15	3,0	4,1	nein
	P 326	0,7 - 0,9	0,7	0,9	16 - 25	25	16	2,2	2,9	nein
	P 426	0,4 - 0,7	0,4	0,7	16 - 25	25	16	1,5	2,0	nein
P 656	0,2 - 0,4	0,2	0,4	12 - 15	15	12	0,8	1,1	nein	
Periopor®	200 E	1,0 - 2,3	1,0	2,3	25 - 35	35	25	4,5	6,1	nein
	300 E	0,7 - 1,0	0,7	1,0	25 - 35	35	25	2,3	3,1	nein
Neopor®	F 2200	1,4 - 2,5	1,4	2,5	12 - 20	20	12	5,3	7,2	ja
	F 2300	0,8 - 1,4	0,8	1,4	12 - 20	20	12	3,0	4,1	ja
	F 2400	0,5 - 0,8	0,5	0,8	16 - 25	25	16	1,8	2,4	ja
	F 4 speed	0,5 - 0,8	0,5	0,8	22 - 30	30	22	1,8	2,4	ja
	F 5300	0,9 - 1,4	0,9	1,4	13 - 25	25	13	3,1	4,2	ja
	F 5200 Plus	1,2 - 1,6	1,2	1,6	13 - 20	20	13	3,8	5,2	ja
	F 5300 Plus	0,9 - 1,4	0,9	1,4	13 - 20	20	13	3,1	4,2	ja
	P 5200	1,2 - 1,5	1,2	1,5	11 - 20	20	11	3,7	5,0	nein

Mit der Annahme einer Expansion der Granulate auf das 20 bis 50-fache ihres Ausgangsvolumens errechnen sich aus den Korngrößenklassen die mittleren Porendurchmesser des fertigen Dämmstoffs. Außerdem findet basierend auf Herstellerangaben eine Einschätzung statt, ob das Produkt für den Einsatz in Elementwänden geeignet ist (siehe Tab. 4-1).

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Korngröße des Polystyrol-Granulats, der Rohdichte und des Porendurchmessers des fertigen EPS-Dämmstoffs von den Produkten aus Tab. 4-1, die für den Einsatz in Elementwänden geeignet sind. Es ist anzumerken, dass die folgenden Zusammenhänge nur aus theoretischen Betrachtungen und nicht aus experimentellen Untersuchungen stammen.

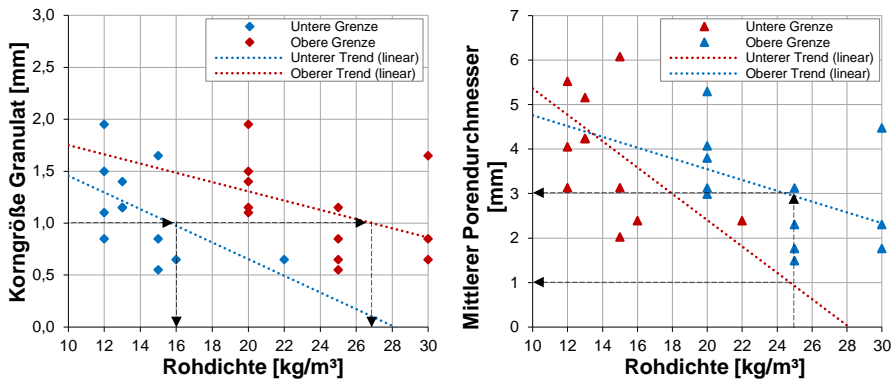


Abb. 4-4: Herstellbarer Rohdichtebereich in Abhängigkeit der Granulat-Korngröße (links) und mittlerer Porendurchmesser des Dämmstoffs in Abhängigkeit der Rohdichte (rechts)

Es ist zu erkennen, dass tendenziell mit einer kleinen Korngröße des Granulats Dämmstoffe mit höherer Rohdichte hergestellt werden. Im Mittel kann bspw. bei einer mittleren Korngröße des Granulats von 1 mm je nach Expansionsintensität ein sehr breiter Rohdichtebereich des Dämmstoffs zwischen 16 und 27 kg/m³ eingestellt werden (siehe Abb. 4-4). Im Gegenzug muss daher bei ansteigender Rohdichte der mittlere Porendurchmesser des Dämmstoffs kleiner werden. Nach Abb. 4-4 (rechts) wird bspw. ein Dämmstoff mit einer Rohdichte von 25 kg/m³ einen mittleren Porendurchmesser des Dämmstoffs zwischen 1 und 3 mm aufweisen.

4.2.4 CE-Kennzeichnung und Etikettierung

Die CE-Kennzeichnung ist Anfang der 90er Jahre für den Europäischen Binnenmarkt geschaffen worden. Die Abkürzung CE steht für Europäische Gemeinschaften (franz. „Communautés Européenes“). Ziel der CE-Kennzeichnung ist es, die Übereinstimmung von Produkten mit den europäischen Richtlinien mithilfe einer Kennung sichtbar zu machen. Die Anforderungen der CE-Kennzeichnung sind in der EU-Richtlinie 93/68/EWG vom 22.07.93 geregelt. Auch für Bauprodukte ist eine CE-Kennung notwendig, um diese im europäischen Wirtschaftsraum (EWR) verkaufen zu dürfen. Deshalb sind Dämmstoffhersteller seit 2003 dazu verpflichtet, auf ihren Produkten eine von außen sichtbare CE-Kennzeichnung anzubringen. Für

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS) ist die Bezeichnung und Etikettierung in *DIN EN 13163* und *DIN EN 4108-10* geregelt.

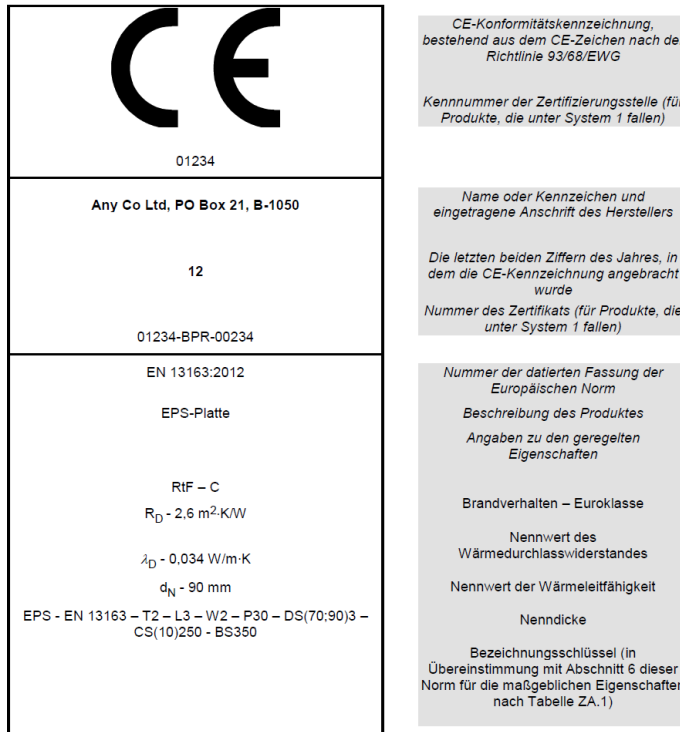


Abb. 4-5: Beispiel einer CE-Kennzeichnung nach *DIN EN 13163* für das Anwendungsgebiet WZ (Dämmstoff in zweischaligen Wänden, Kerndämmung)

Abb. 4-5 zeigt ein Beispiel mit der Erläuterung aller notwendigen Angaben. Wichtig ist vor allem der Bezeichnungsschlüssel, in dem alle Eigenschaften des Dämmstoffs enthalten sind, die für das Anwendungsgebiet WZ (Dämmstoff in zweischaligen Wänden, Kerndämmung) nach *DIN EN 4108-10* gefordert sind. Der oben genannte Bezeichnungsschlüssel setzt sich wie folgt zusammen:

EPS-EN 13163-T2-L3-W2-P30-DS(70;90)3-CS(10)250-BS350

EPS	Abkürzung für expandiertes Polystyrol
EN 13163	Nummer der zugehörigen Norm
T2	Klasse für Grenzabmaße für die Dicke
L3	Klasse für Grenzabmaße für die Länge
W2	Klasse für Grenzabmaße für die Breite
P30	Klasse für Grenzabmaße für die Ebenheit
DS(70;90)3	Dimensionsstabilität von 3 % (für Länge, Breite und Dicke des Produkts) bei 70°C und 90% relativer Luftfeuchte
CS(10)250	250 kPa Druckspannung bei 10 % Stauchung
BS350	Biegefestigkeit von 350 kPa

Weitere Information zur CE-Kennzeichnung werden in dieser Arbeit nicht gegeben und können in der *DIN EN 13163* nachgelesen werden.

4.3 Eigenschaften von EPS und deren Einfluss auf die Wasseraufnahme

Die Eigenschaften eines Dämmstoffs aus expandiertem Polystyrol werden weitgehend von der Verarbeitungsart, der Rohdichte, der Größe der Poren und der Ausbildung der Oberfläche des Materials bestimmt. Es gilt der Grundsatz: Bei Schaumstoffen mit gleichem Zellaufbau und gleicher Rohdichte liegen die mechanischen Eigenschaften meist auf gleichem Niveau. Dahingegen werden bauphysikalische Eigenschaften, wie die Wärmeleitfähigkeit oder die Schallabsorptionseigenschaften, vor allem durch die Größe der Dämmstoffporen und die Ausbildung der Oberfläche beeinflusst. Durch Variation der Verfahrensparameter bei der Herstellung von EPS-Dämmstoffen (z. B. Korngröße des Granulats, Vorschäumzeit und -temperatur, Ausschäumdruck) oder die Zugabe von Flammschutzmitteln ist es möglich, die Materialeigenschaften gezielt einzustellen und an bestimmte Anwendungen im Bauwesen anzupassen. Im nachfolgenden Abschnitt werden vor allem relevante Eigenschaften für die Wasseraufnahmefähigkeit von Dämmstoffen aus EPS näher erläutert, da diese für die weitere Untersuchung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff von Bedeutung sind.

4.3.1 Porenstruktur und Ausbildung der Oberfläche

Bei der Herstellung von Dämmstoffen aus EPS werden vorgeschäumte, lose Polystyrol-Partikel unter Druck zu einem dichten Schaumstoff zusammengeschweißt. Bei der Expansion während des Ausschäumens sollen die vorhandenen Hohlräume zwischen den kugelförmigen Partikeln möglichst gut ausgefüllt werden, damit ein homogenes Schaumstoffgebilde entsteht. Größere Hohlstellen müssen unbedingt vermieden werden, da diese sowohl in mechanischer als auch bauphysikalischer Hinsicht Fehlstellen bilden. Der fertige Dämmstoff besteht aus geschlossenzelligen Poren mit möglichst kleinen Lufteinschlüssen zwischen den Poren, dem sog. Zwickelvolumen (siehe Abb. 4-6). Die Form der Poren wandelt sich beim Expansionsprozess von einer Kugel zu einem nahezu regelmäßigen Polyeder.

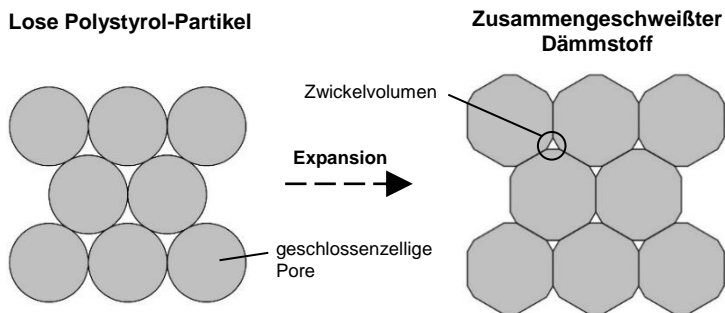


Abb. 4-6: Expansion loser Polystyrol-Partikel zu einem zusammengeschweißten Dämmstoff

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

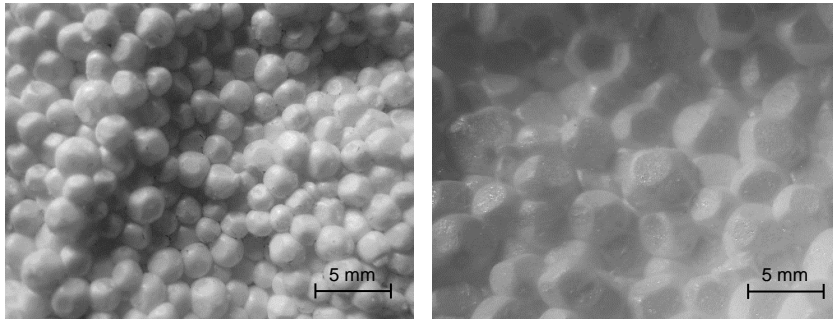


Abb. 4-7: Dämmstoffporen mit hoher (links) und niedriger Rohdichte (rechts)

Je nach Stärke der Expansion findet dabei eine unterschiedlich große Formänderung der Poren statt, sodass bei Dämmstoffen mit hoher Rohdichte die Poren noch nahezu kugelförmig sind (siehe Abb. 4-7 links) und bei Dämmstoffen mit niedriger Rohdichte die Poren fast die Form eines Dodekaeders (Polyeder aus gleichseitigen Fünfecken) annehmen (siehe Abb. 4-7 rechts). *Hales 2009* konnte nachweisen, dass man mit regelmäßigen Dodekaedern die dichteste Packung im dreidimensionalen Raum erreichen kann. Wie viel Wasser in einen Dämmstoff eindringen kann, hängt deshalb u. a. vom Zwickelvolumen und damit von der Porenform ab. Gleiches wird bei der Betrachtung eines durchleuchteten Dämmstoffs aus EPS ersichtlich (siehe Abb. 4-8).

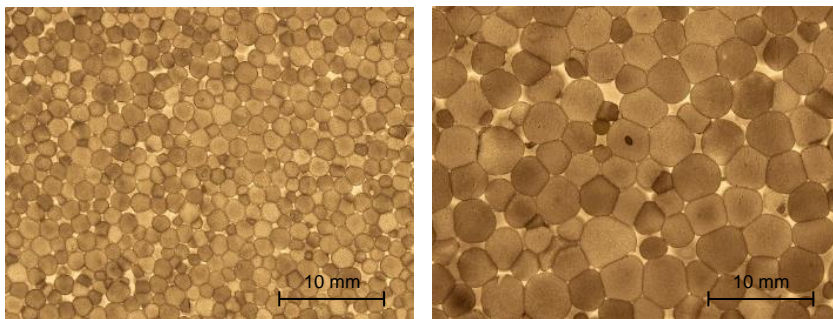


Abb. 4-8: Unterschiedliche Form und Verteilung der Dämmstoffporen bei hoher (links) und niedriger Rohdichte (rechts) eines durchleuchteten Dämmstoffs aus EPS

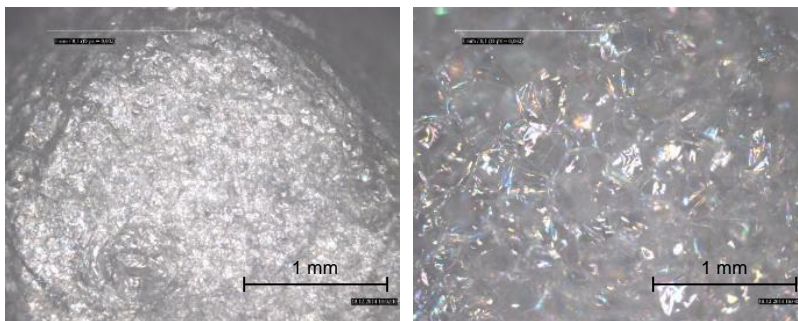


Abb. 4-9: Mikroskopaufnahmen eines EPS-Dämmstoffs: Geschlossene Oberfläche einer Dämmstoffpore (links) und Schnitt durch eine Dämmstoffpore (rechts)

Betrachtet man eine einzelne Pore mit dem Mikroskop, so kann man deren geschlossene Oberfläche sehr gut erkennen (siehe Abb. 4-9). Im Schnitt einer Pore ist eine dreidimensionale, filigrane Matrix zu erkennen. Diese behindert eine Konvektion im Poreninneren und verbessert dadurch die Wärmedämmwirkung des Materials.

In Kapitel 4.2 wurden bereits die Unterschiede zwischen Block- und Automatenware eines Dämmstoffs erläutert. Abb. 4-10 zeigt die unterschiedliche Ausbildung der Oberflächen, wobei bei der Blockware zwischen heiß- und kaltgeschnittener Ware unterschieden wird. Die Mikroskopaufnahmen bestätigen, dass die Oberfläche der Automatenware viel besser verschweißt ist, als die der Blockware. Bei heiß geschnittener Blockware sind Spuren von geschmolzenem Polystyrol an der Oberfläche und bei der kalt geschnittenen Blockware die offene Oberfläche des Dämmstoffs erkennbar.

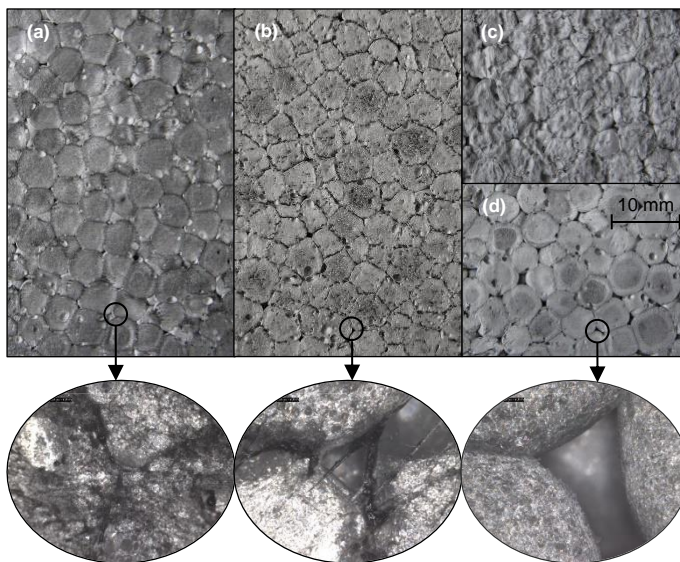


Abb. 4-10: Unterschiedliche Ausbildung der Oberflächen eines Dämmstoffs aus EPS: Automatenware (a), Blockware heiß geschnitten (b), Blockware kalt (grob) geschnitten (c) und Blockware kalt (fein) geschnitten (d)

Die nähere Betrachtung der Oberflächenausbildung lässt vermuten, dass diese einen Einfluss auf die Wasseraufnahme haben könnte. Von den Dämmstoffherstellern werden jedoch keine Angaben zur Porenstruktur oder zur Ausbildung der Oberfläche gemacht, da solche Dämmstoffeigenschaften für den späteren Einsatz meist nicht von Interesse sind.

4.3.2 Druckfestigkeit, Rohdichte und Porengröße

Eine wichtige Eigenschaft zur Charakterisierung von Dämmstoffen ist die Druckspannung bei 10 % Stauchung, welche nach *DIN EN 826* zu ermitteln ist. Der Dämmstoff wird gemäß *DIN EN 13163* in Stufen eingeteilt, welche durch die Höhe der Druckfestigkeit festgelegt wird. Es ist anzumerken, dass es sich bei der Druckfestigkeit

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

bei 10 % Stauchung nicht um einen Bemessungswert, sondern um einen Mindestwert handelt.

Tab. 4-2: Stufen der Druckspannung bei 10 % Stauchung nach *DIN EN 13163*

Stufe	Anforderung [kPa]
CS(10)50	50
CS(10)60	60
CS(10)70	70
CS(10)80	80
CS(10)90	90
CS(10)100	100
CS(10)150	150
CS(10)200	200
CS(10)250	250
Hinweis: 30, 40, 110, 120, 130, 140, 175, 225, 275, 300, 325, 375, 400, 450 und 500 kPa dürfen auch angegeben werden.	

Auf der Datengrundlage von *Gellert u. Karrer 2011* ist in Abb. 4-11 für verschiedene Perimeterdämmstoffe aus EPS die Rohdichte mit der zugehörigen Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Materialkennwerten gibt. Je höher die Rohdichte ist, desto größer wird auch die aufnehmbare Druckspannung. Bei der Unterscheidung zwischen Automaten- und Blockware ist kein Unterschied festzustellen. In der Abbildung sind zusätzlich eigene Prüfergebnisse von Dämmstoffen eingetragen, welche in Kapitel 5.3 für weiterführende Untersuchungen verwendet werden. Diese bestätigen den linearen Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit von Dämmstoffen aus EPS.

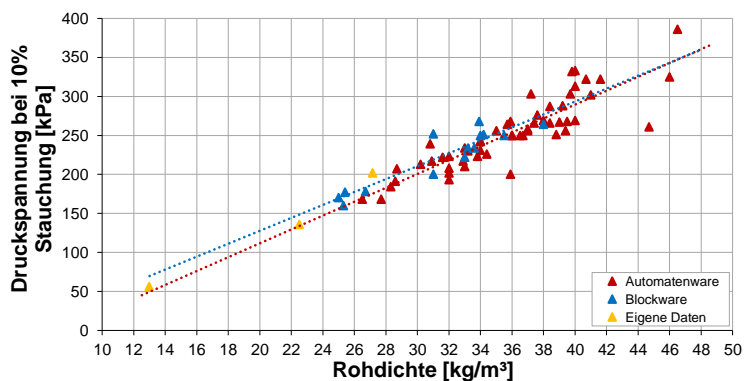


Abb. 4-11: Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckspannung bei 10 % Stauchung bei Dämmstoffen aus EPS (Datengrundlage: *Gellert u. Karrer 2011*)

Zur Darstellung eines Zusammenhangs zwischen der Rohdichte und dem mittleren Porendurchmesser werden mehrere Dämmstoffe aus EPS näher untersucht (siehe Abb. 4-12). Hierzu wird in eigenen Versuchen von jedem Dämmstoff die Rohdichte ermittelt und zusätzlich der mittlere Durchmesser an 50 bis 100 Poren bestimmt (siehe Tab. 4-5). Die Ergebnisse bestätigen, dass bei ansteigender Rohdichte der mittlere Porendurchmesser des Dämmstoffs kleiner wird (siehe Kapitel 4.2.3). Der Trend der Ergebnisse liegt auch innerhalb der theoretisch ermittelten Grenzen anhand von

Produkten der BASF SE nach Abb. 4-4. Für die Dämmstoffe wird auch die Schwankung der Porengröße mithilfe der Standardabweichung bestimmt. Je kleiner der Porendurchmesser eines Dämmstoffs ist, desto kleiner ist auch die Standardabweichung. Bei kleineren Porendurchmessern und höheren Rohdichten wird somit die Struktur eines EPS-Dämmstoffs homogener (siehe auch Abb. 4-8).

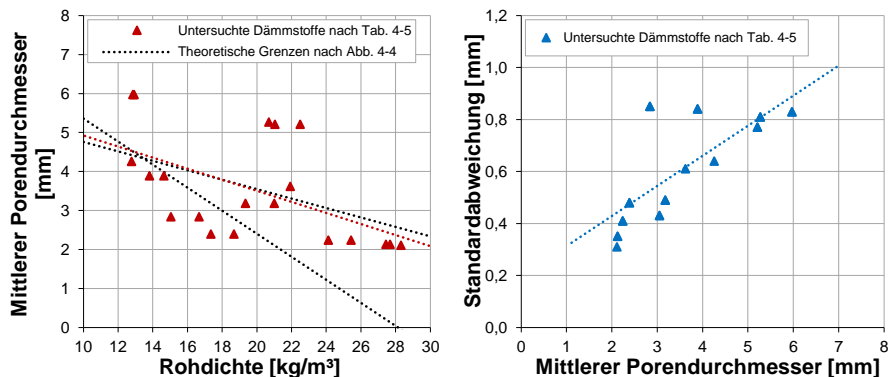


Abb. 4-12: Zusammenhang zwischen Rohdichte und Porendurchmesser (links) sowie zwischen Porendurchmesser und dessen Standardabweichung (rechts)

In der Praxis wird für einen Dämmstoff meist nur die Stufe der Druckspannung bei 10 % Stauchung angegeben. Informationen zur Rohdichte oder zum mittleren Porendurchmesser werden oft nicht genannt. Jedoch sind gerade diese beiden Materialparameter wichtige Kennwerte für die Einschätzung der Wasseraufnahmefähigkeit (siehe Kapitel 4.4).

4.3.3 Wärmeleitfähigkeit und Feuchtegehalt

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist für den Anwender meist die wichtigste Eigenschaft eines Dämmstoffs, da diese den Wärmeschutz und damit die Höhe des Heizenergiebedarfs eines Gebäudes beeinflusst. Sie gibt an, welche Wärmemenge pro 1 m Schichtdicke und 1 K Temperaturunterschied von einem Material übertragen wird. Ein Material darf erst dann als Dämmstoff bezeichnet werden, wenn dessen Wärmeleitfähigkeit kleiner als 0,1 W/(m·K) ist. Die wärmeisolierende Wirkung von Dämmstoffen beruht u. a. auf der in den Poren eingeschlossenen Luft, welche im unbewegten Zustand eine Wärmeleitfähigkeit von nur 0,025 W/(m·K) besitzt. Der umgebene Feststoff hat meist eine viel höhere Wärmeleitfähigkeit. Deshalb gilt die Regel: Je weniger Feststoff bzw. je mehr Poren in einem Dämmstoff vorhanden sind, desto geringer ist dessen Wärmeleitfähigkeit. Diese Abhängigkeit lässt sich näherungsweise durch eine Exponentialfunktion beschreiben (siehe Abb. 4-13 rechts). Je nach Dämmstofftyp nimmt die Wärmeleitfähigkeit jedoch bei sehr kleinen Rohdichten bzw. großen Poren wieder zu (siehe Abb. 4-13 links). Grund hierfür ist das Einsetzen von Konvektion in den Poren und damit die Steigerung des Wärmetransports. Deshalb sollte die Luft in einem Dämmstoff möglichst unbewegt bleiben. Die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs wird folglich nicht nur von dem prozentualen Anteil der Poren, sondern auch von deren Größe und räumlicher Verteilung gesteuert (Vismann 2012). Die minimale Wärmeleitfähigkeit liegt im Rohdichtebereich um 50 kg/m³. In DIN EN 13163

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

wird für den Bereich zwischen 8 und 55 kg/m³ eine Gleichung zur Ermittlung der mittleren Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte angegeben. Beim Vergleich mit dem Kurvenverlauf aus Fischer u. a. 2008 kann eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden.

$$\lambda = 0,025314 + 5,1743 \cdot 10^{-5} \cdot \rho + \frac{0,173606}{\rho} \quad (4-1)$$

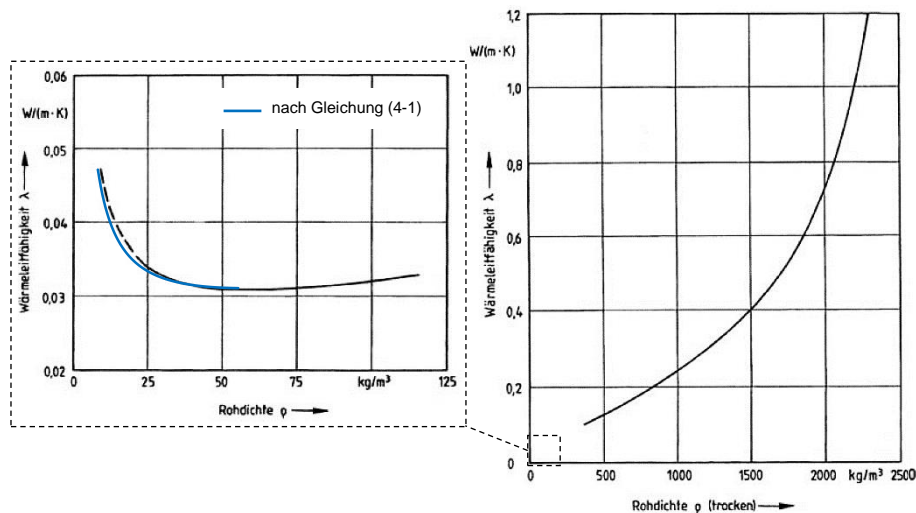


Abb. 4-13: Durchschnittswerte der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen allgemein (rechts) und Dämmstoffen (links) in Abhängigkeit der Rohdichte (Fischer u. a. 2008)

Für jeden Dämmstoff, welcher innerhalb des EU-Binnenmarktes vermarktet wird und damit eine CE-Kennzeichnung besitzt, muss mindestens der Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_D angegeben werden, der sich auf eine Bezugstemperatur von 10°C bezieht. Nach DIN EN 13163 ist dieser ein Grenzwert, der bei 90 % der Produktion mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % nicht überschritten wird. Er berechnet sich zu:

$$\lambda_D = \lambda_{90/90} = \lambda_{\text{Mittel}} + k \cdot s_y \quad (4-2)$$

- mit:
- λ_{Mittel} Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit
 - k Werte für ein einseitiges 90 %-Toleranzniveau mit einem 90 %-Vertrauensniveau nach DIN EN 13163
 - s_y Standardabweichung der Wärmeleitfähigkeit

Für die Bemessung von Bauteilen darf der Nennwert jedoch nicht verwendet werden. Im Rahmen von bauphysikalischen Untersuchungen, z. B. bei der Erstellung eines Energieausweises, wird mit dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit gerechnet.

4.3 Eigenschaften von EPS und deren Einfluss auf die Wasseraufnahme

Dieser berücksichtigt Einflüsse wie Maßtoleranzen, Temperaturschwankungen, die Alterung des Dämmstoffs oder den Feuchtegehalt des Baustoffs. Die Bemessungswerte für Dämmstoffe aus EPS werden in *DIN 4108-4* geregelt (siehe Tab. 4-3), wobei eine Einteilung in zwei Kategorien stattfindet:

Kategorie I (Bemessungswert aus Nennwert der CE-Kennzeichnung)

$$\lambda = 1,20 \cdot \lambda_D \quad (4-3)$$

Kategorie II (Bemessungswert aus Grenzwert einer AbZ)

$$\lambda = 1,05 \cdot \lambda_{\text{grenz}} \quad (4-4)$$

Ist für einen Dämmstoff ausschließlich der Nennwert λ_D bestimmt, so findet eine Zuteilung in Kategorie I statt. Der Bemessungswert wird dann mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,20 ermittelt. Wird der Bemessungswert nicht auf Grundlage des Nennwerts der harmonisierten Norm berechnet, sondern liegt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) mit Fremdüberwachung vor, so wird das Produkt der Kategorie II zugeordnet und es darf mit dem vom Nennwert abweichenden Grenzwert λ_{grenz} und einem reduzierten Teilsicherheitsbeiwert von 1,05 gerechnet werden.

Tab. 4-3: Nennwerte, Grenzwerte und Bemessungswerte von λ nach *DIN 4108-4*

Dämmstoff	Kategorie I		Kategorie II	
	Nennwert λ_D [W/(m·K)]	Bemessungswert λ [W/(m·K)]	Grenzwert λ_{grenz} [W/(m·K)]	Bemessungswert λ [W/(m·K)]
Expandierter Polystyrolschaum (EPS) nach <i>DIN EN 13163</i>	0,030	0,036	0,0290	0,030
	0,031	0,037	0,0299	0,031
	0,032	0,038	0,0309	0,032
	0,033	0,040	0,0319	0,033
	0,034	0,041	0,0328	0,034
	0,035	0,042	0,0338	0,035

	0,050	0,060	0,0480	0,050

Die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs ist nicht nur von der Rohdichte oder der Größe und räumlichen Verteilung der Poren abhängig, sondern wird auch von der Temperatur oder dem Feuchtegehalt beeinflusst. Bei Temperaturen zwischen 0 und 100°C liegt zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Temperatur eines Dämmstoffs ein nahezu linearer Zusammenhang vor. Für amorphe Stoffe, wie z. B. der Grundstoff Polystyrol (amorpher Thermoplast), liegt die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei ca. 0,1 bis 0,4% je 1 K Temperaturdifferenz. Für Polystyrol-Hartschaum kann mithilfe von Abb. 4-14 (links) eine Erhöhung von ca. 0,35% je 1 K ermittelt werden. Der Feuchtegehalt in einem Dämmstoff ist für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von großer Bedeutung. Da die Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit 0,6 W/(m·K) im Vergleich zu ruhender Luft in den Dämmstoffporen sehr hoch ist, müssen bereits wenige Prozente an Bauteilfeuchte bei der Ermittlung von λ berücksichtigt werden.

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

Abb. 4-14 (rechts) zeigt den Zuwachs der Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Feuchtegehalt. Während die Wärmeleitfähigkeit bei mineralischen Baustoffen mit dem Feuchtegehalt linear ansteigt, ist bei Dämmstoffen aus EPS ein leicht progressiver Anstieg zu beobachten. Für volumenbezogene Feuchtegehalte unter 10 % kann jedoch vereinfacht von einem linearen Verlauf ausgegangen werden. Nach *Vieweg u. Daumiller 1969* ist diese Annahme gerechtfertigt, da die geschlossenzellige Porenstruktur eine viel höhere Wasserausnahme nur selten ermöglicht. Bei Polystyrol-Hartschaum ergibt sich bei Annahme eines linearen Verlaufs eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von ca. 3,6 % pro 1 % volumenbezogenem Feuchtegehalt.

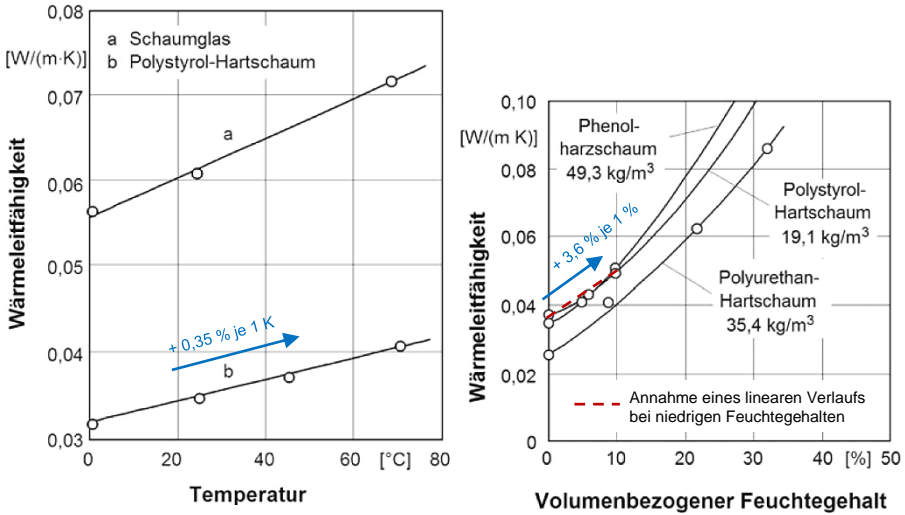


Abb. 4-14: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Temperatur (links) und volumenbezogenem Feuchtegehalt (rechts) (*Fischer u. a. 2008*)

Generell muss zwischen dem volumenbezogenen und massenbezogenen Feuchtegehalt unterschieden werden. Bei porösen Stoffen hat sich der volumenbezogene Feuchtegehalt durchgesetzt, da durch die niedrigen Rohdichten der massenbezogene Feuchtegehalt immer sehr hoch ist und so wenig Aussagekraft hat (*Künzel 1985*). Es gilt:

$$\psi = \frac{\rho}{\rho_W} \cdot u = \frac{\rho \cdot m_W}{\rho_W \cdot m_t} \tag{4-5}$$

- mit: ψ Volumenbezogener Feuchtegehalt
- u Massenbezogener Feuchtegehalt
- ρ Rohdichte des Dämmstoffs
- ρ_W Rohdichte von Wasser
- m_W Masse des Wasseranteils im Dämmstoff
- m_t Trockene Masse des Dämmstoffs

4.4 Wasseraufnahme bei Beanspruchung durch drückendes Wasser

DIN EN 4108-10 schreibt für Dämmstoffe und ihre Anwendungsgebiete, getrennt in Dach, Decke, Wand und Perimeter, Mindestanforderungen vor. Für die Wasseraufnahme von EPS und XPS als Kerndämmung von zweischaligen Wänden (WZ) gibt es keine Mindestanforderungen. Die bisherigen Betrachtungen zeigen jedoch, dass Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol Wasser bei Kontakt aufnehmen. Beeinflussende Kenngrößen für eine Wasseraufnahme sind die Rohdichte und die Ausbildung der Oberfläche des Dämmstoffs sowie die Struktur, Größe und Anordnung der Poren.

In diesem Kapitel soll eine nähere Erläuterung und Quantifizierung der Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom Dämmstoff und der Art der Druckbelastung stattfinden:

- Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem, teilweisem Eintauchen und bei langfristigem (teilweisem oder vollständigem) Eintauchen nach Norm (Kapitel 4.4.1)
- Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitiger, hoher Druckbelastung nach eigenem experimentellen Versuchsprogramm (Kapitel 4.4.2)

4.4.1 Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem und langfristigem Eintauchen

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme beim Eintauchen von Dämmstoffen gibt es aktuell zwei Normenwerke, welche für alle Dämmstofftypen gültig sind:

- *DIN EN 1609*: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen
- *DIN EN 12087*: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme bei langfristigem Eintauchen

Tab. 4-4 gibt einen Überblick über die Probekörper und Prüfverfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahme mithilfe der beiden Normen. Es ist zu erkennen, dass die Randbedingungen der Prüfungen fast identisch sind. Einzige Unterschiede sind die Prüfdauer und die Eintauchtiefe des Dämmstoffs. Die vorbereiteten Probekörper werden in einem Wasserbecken in ihrer Lage so fixiert, dass sich deren Unterkante bei teilweisem Eintauchen 10 ± 2 mm unter Wasser und deren Oberkante bei vollständigem Eintauchen 50 ± 2 mm unter Wasser befindet. Nach Ablauf der Prüfdauer, d. h. nach 24 Stunden bei kurzzeitigem Eintauchen und nach 28 Tagen bei langfristigem Eintauchen, werden die Proben aus dem Wasser genommen und müssen für $10 \pm 0,5$ min abtropfen. Anschließend wird das Gewicht bestimmt und die flächenbezogene (bei teilweisem Eintauchen) bzw. volumenbezogene (bei vollständigem Eintauchen) Wasseraufnahme errechnet

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

Tab. 4-4: Vergleich zwischen DIN EN 1609 und DIN EN 12087

Randbedingung/ Anforderung	DIN EN 1609		DIN EN 12087	
	Kurzzeitig		Langzeitig	
	Teilweises Eintauchen		Teilweises Eintauchen	Vollständiges Eintauchen *)
Anzahl der Probekörper	> 4 Stück (nach Produktnorm DIN EN 13163 > 3 Stück)			
Maße Probekörper	Lieferdicke x (200 ± 1 mm) x (200 ± 1 mm)			
Prüftemperatur	23 ± 5°C			
Genauigkeit der Bestimmung der Ausgangsmasse und feuchten Masse	0,1 g			
Eintauchtiefe	Unterkante 10 ± 2 mm unter Wasser		Oberkante 50 ± 2 mm unter Wasser	
Prüfdauer	24 Stunden		28 Tage	
Abtropfzeit nach Versuch	10 ± 0,5 min			
Ermittlung der ... Wasseraufnahme	... flächenbezogenen volumenbez. ...	
Genauigkeit des Ergebnisses	0,01 kg/m ²		0,1 %	

*) Prüfung der Wasseraufnahme bei langfristigem vollständigem Eintauchen ist für Perimeterdämmstoffe verpflichtend

Um eine Beziehung zum Frischbetondruck in Elementwänden herzustellen, ist vor allem die volumenbezogene Wasseraufnahme bei vollständigem Eintauchen zu betrachten. Mit dieser Prüfung kann eine Einschätzung erfolgen, wie viel Prozent des Gesamtvolumens eines Dämmstoffs aus Zwickelvolumen besteht. So kann bewertet werden, welcher Volumenanteil sich beim Betonieren der nachträglichen Ortbetonergänzung in Elementwänden mit Zementleim füllen kann.

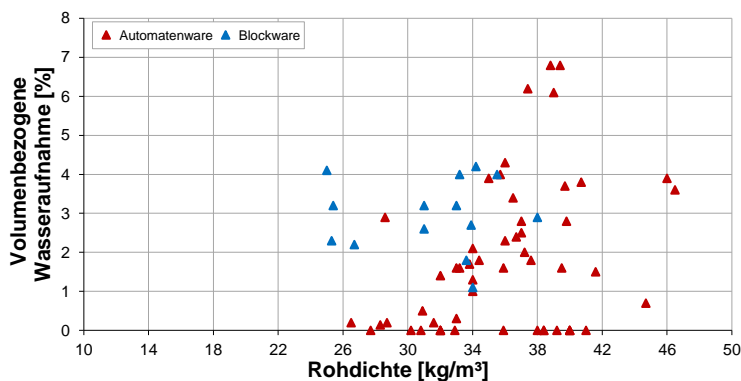


Abb. 4-15: Volumenbezogene Wasseraufnahme bei vollständigem Eintauchen nach DIN EN 12087 für Perimeterdämmstoffe (Datengrundlage: Gellert u. Karrer 2011)

Das Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. in München hat in einem Forschungsvorhaben die volumenbezogene Wasseraufnahme bei vollständigem Eintauchen nach DIN EN 12087 für Perimeterdämmstoffe mit unterschiedlicher Rohdichte und Ausbildung der Oberfläche (Automatenware und Blockware) untersucht (siehe Abb. 4-15). Es ist zu erkennen, dass Blockware nach einer 28-tägigen Lagerung unter Wasser tendenziell mehr Wasser aufnimmt als Automatenware. Dies korreliert mit der besser verschweißten Oberfläche bei Automatenware im Vergleich zu Blockware (siehe Abb. 4-10). Die Ergebnisse zeigen auch, dass bei Automatenware die Wasseraufnahme umso höher ist, je größer die Rohdichte ist. Bei Blockware ist dieser Effekt nicht festzustellen. Für den Großteil der Proben liegt die volumenbezogene Wasseraufnahme bei unter 4,0 %. Bei wenigen Ausnahmen

werden Werte von fast 7,0 % erreicht. Im Bereich üblicher Rohdichten von Dämmstoffen aus EPS in Wandelementen zwischen 15 und 30 kg/m³ liegt das Maximum bei 4,1 %.

Die von *Gellert u. Karrer 2011* ermittelte volumenbezogene Wasseraufnahme ist jedoch für die weitere Vorgehensweise nur bedingt verwendbar, da eine sehr niedrige Druckbelastung in Kombination mit einer langen Einwirkungsdauer nicht mit einer kurzzeitigen, hohen Druckbelastung in Elementwänden einhergeht.

4.4.2 Experimentelle Untersuchung der Wasseraufnahme von Polystyrol-Dämmstoffen bei kurzzeitiger, hoher Druckbelastung

4.4.2.1 Aufbau des Versuchsstands und Versuchsdurchführung

Um Aussagen über die Wasseraufnahme von Dämmstoffen aus Polystyrol treffen zu können, werden insgesamt 15 verschiedene Dämmstoffe untersucht. Davon bestehen 13 aus EPS und zwei aus XPS. Es wird eine Versuchseinrichtung eingesetzt, die zum Testen der Wassereindringtiefe in Festbeton verwendet wird (siehe Abb. 4-16). Ziel der Untersuchungen ist die Feststellung von Korrelationen zwischen den Eigenschaften der Dämmstoffe.

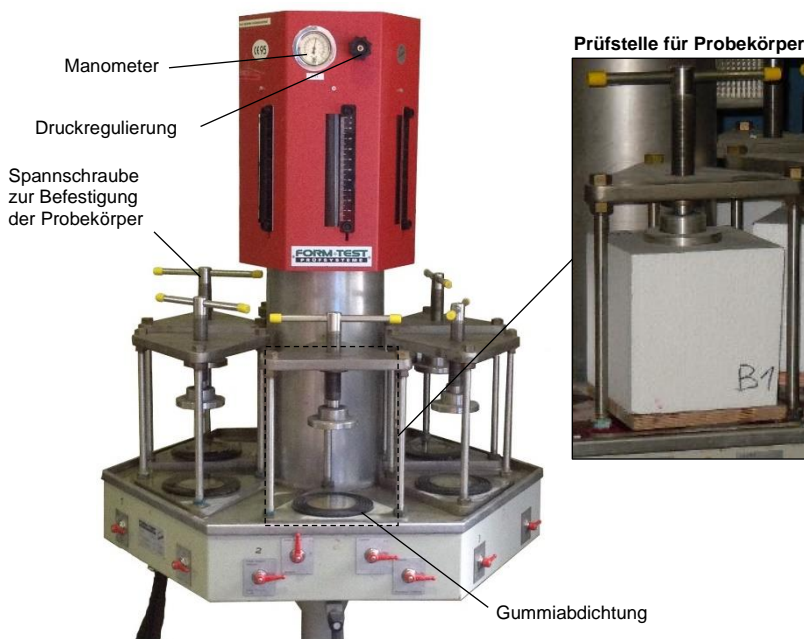


Abb. 4-16: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der volumenbezogenen Wasseraufnahme von Dämmstoffen EPS und XPS

Die Dämmstoffproben werden auf die Prüfplatte mit Gummidichtung aufgestellt und von oben mithilfe einer Spannschraube befestigt. Während der Versuchsdurchführung wird der Wasserdruck von unten aufgebracht und mit der Druckregulierung und dem Manometer eingestellt. Vor der Versuchsdurchführung wird von jedem Dämmstoff die

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

Rohdichte nach *DIN EN 1602* bestimmt. Außerdem werden jeweils zwischen 50 und 100 Poren entnommen, um den mittleren Porendurchmesser und die Standardabweichung des Porendurchmessers zu ermitteln. Die Bestimmung von Rohdichte und Porendurchmesser ist wichtig, um deren Einfluss auf die Wasseraufnahme bewerten zu können. Abb. 4-17 und Tab. 4-5 geben einen Überblick über die untersuchten Dämmstoffe.

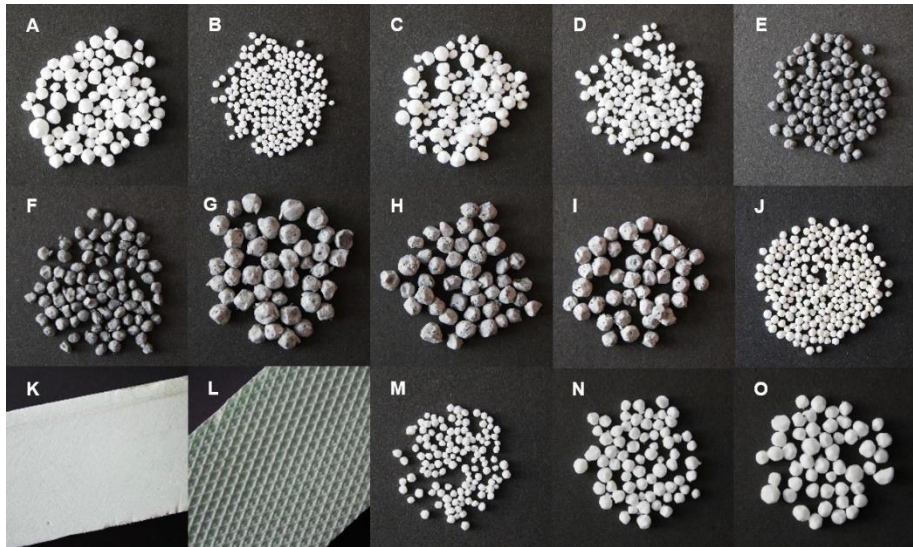


Abb. 4-17: Zusammenstellung aller untersuchten Dämmstoffe

Die Rohdichte der untersuchten Dämmstoffe bewegt sich zwischen 12,8 und 28,3 kg/m³ bei EPS und zwischen 34,1 und 37,4 kg/m³ bei XPS. Die zugehörigen mittleren Porendurchmesser liegen zwischen 2,11 und 5,97 mm. Aufgrund der Zellstruktur von XPS kann für dieses kein Porendurchmesser ermittelt werden.

Tab. 4-5: Zusammenstellung der Rohdichte, des gemessenen Porendurchmessers und der Standardabweichung des Porendurchmessers für alle Dämmstoffe

Dämmstoff	Typ des Dämmstoffs	Herstellung 2)	Mittlere Rohdichte ρ [kg/m ³]	Mittlerer Porendurchmesser d_{pm} [mm]	Standardabweichung [mm]
A	EPS	BW	14,2	3,89	0,84
B	EPS	BW	24,8	2,24	0,41
C	EPS	BW	15,9	2,84	0,85
D	EPS	BW	18,0	2,39	0,48
E	EPS (grau) 1)	BW	20,0	3,05	0,43
F	EPS (grau) 1)	BW	20,2	3,18	0,49
G	EPS (grau) 1)	AW	12,9	5,97	0,83
H	EPS (grau) 1)	AW	20,6	5,27	0,81
I	EPS (grau) 1)	AW	21,8	5,21	0,77
J	EPS	BW	27,6	2,13	0,35
K	XPS	-	37,4	-	-
L	XPS	-	34,1	-	-
M	EPS	BW	28,3	2,11	0,31
N	EPS	BW	21,9	3,62	0,61
O	EPS	BW	12,8	4,26	0,64

1) EPS (grau) bezeichnet einen expandierten Polystyrol-Hartschaum mit Wärmestrahlungsabsorber

2) BW = Blockware, AW = Automatenware

Bei der Prüfung der Wasseraufnahme durch langzeitiges Eintauchen nach *DIN EN 12087* sind je Dämmstoff mindestens drei Proben gefordert. Um statistisch belastbare Ergebnisse zu erzielen, wurden bei den eigenen Untersuchungen je Dämmstoff zwischen sechs und acht Proben untersucht.

Während der Versuchsdurchführung wird ein Wasserdruck von ca. 0,5 bar so lange aufgebracht, bis die Dämmstoffproben vollständig mit Wasser gesättigt sind. Dieser Druck entspricht ungefähr einer 2 m hohen Betonsäule bzw. ca. 50 kN/m² und ist damit weitaus höher als die bisher im Versuch gemessenen Frischbetondrucke. Durch die Zugabe von roter Acrylfarbe kann das seitliche Austreten des Wasser und somit die Sättigung optisch sichtbar gemacht werden. Die Belastungsdauer beträgt 15 bis 30 Sekunden, was der maximalen Dauer einer schlagartigen Druckbelastung beim Verdichten von Frischbeton entspricht (siehe Kapitel 5.2.2). Anschließend werden die Proben in zwei Teile geschnitten, um den Bereich des eingedrungenen Wassers und dessen Volumen zu ermitteln. Der Schnitt durch die Proben bestätigt, dass das gefärbte Wasser lediglich in die Zwickel jedoch nicht in die Poren des Dämmstoffs eindringt (siehe Abb. 4-18). Bei den Dämmstoffen aus XPS findet wie erwartet kein Wassereintrag statt.

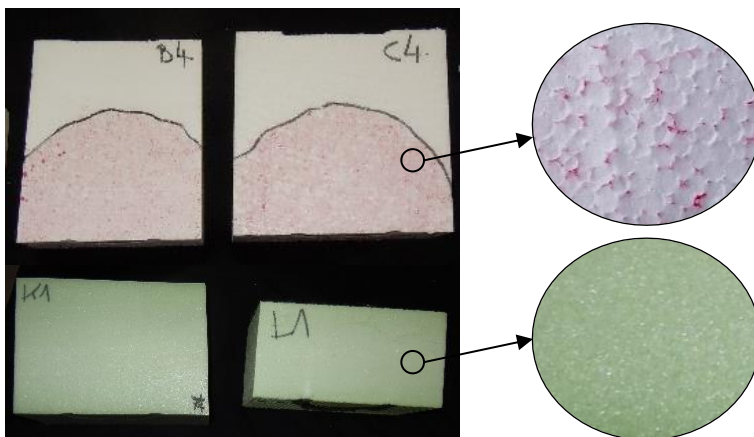


Abb. 4-18: Schnitt durch EPS (oben) und XPS (unten) nach der Versuchsdurchführung

4.4.2.2 Ergebnisse und Auswertung

Für jede Probe werden das Volumen des Wasseranteils im Dämmstoff, die Menge des eingedrungenen Wassers und daraus der volumenbezogene Wassergehalt bestimmt:

$$\psi = \frac{V_W}{V_t} = \frac{m_W}{V_t \cdot \rho_W} = \frac{m_f - m_t}{V_t \cdot \rho_W} \quad (4-6)$$

mit: V_W Volumen des Wasseranteils im Dämmstoff
 V_t Volumen des trockenen Dämmstoffs
 m_f Feuchte Masse des Dämmstoffs

4 Interaktion zwischen Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Wasser

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Zunahme der Rohdichte tendenziell auch eine Erhöhung des volumenbezogenen Wassergehalts zur Folge hat. Eine Ausnahme bilden die Dämmstoffe H und I. Zwischen der Rohdichte und der volumenbezogenen Wasseraufnahme scheint es daher keinen eindeutigen Zusammenhang zu geben (siehe Abb. 4-19 links). Betrachtet man die Ergebnisse zusammen mit denen aus *Gellert u. Karrer 2011* (Markierungen + und x), so kann festgestellt werden, dass die Wasseraufnahme nach *DIN EN 12087* immer niedriger ist als nach eigenen Messungen mit kurzzeitig hoher Druckbelastung. Schlussfolgernd wird bei Dämmstoffen aus EPS nach einer 28-tägigen Lagerung unter Wasser noch keine vollständige Füllung des Zwickelvolumens mit Wasser erreicht.

Trägt man die volumenbezogene Wasseraufnahme in Abhängigkeit des mittleren Porendurchmessers auf, so ist eine deutliche Abhängigkeit der beiden Parameter zu verzeichnen. Je größer der mittlere Durchmesser eines Dämmstoffs ist, desto niedriger ist die volumenbezogene Wasseraufnahme. Der mittlere Kurvenverlauf kann sehr gut durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden (siehe Abb. 4-19 rechts). Der Gültigkeitsbereich für den mittleren Porendurchmesser liegt zwischen 2 und 6 mm:

$$\psi = 8,8 \cdot e^{-0,286 \cdot d_{Pm}} \quad (4-7)$$

mit: d_{Pm} Mittlerer Porendurchmesser des Dämmstoffs

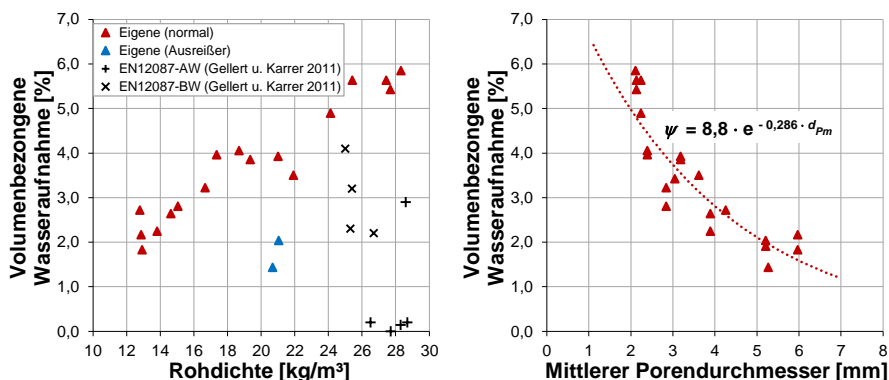


Abb. 4-19: Zusammenhang zwischen Rohdichte (links) bzw. mittlerem Porendurchmesser (rechts) und volumenbezogener Wasseraufnahme eines EPS-Dämmstoffs

Die Ergebnisse bekräftigen die Aussage aus Kapitel 4.3.1, dass je nach Intensität der Expansion bei der Herstellung unterschiedliche Porengrößen mit unterschiedlicher Form entstehen. Je kleiner eine Pore ausgeprägt ist, desto eher nimmt sie die Form einer Kugel an. Bei sehr großen Poren ähnelt die Form einem Dodekaeder. Je größer demnach die Poren sind, desto kleiner sind das Zwickelvolumen und die mögliche Wasseraufnahme. Dieser Effekt wird noch durch die höhere Standardabweichung der Porengröße bei großem mittlerem Porendurchmesser verstärkt, da dadurch eine dichtere Packung erreicht wird. Die gemessenen Wassergehalte beschreiben demnach, wie viel Prozent Zwickelvolumen in einem Dämmstoff vorhanden sind. Die

Mittelwerte der volumenbezogenen Wasseraufnahme für alle untersuchten Dämmstoffe sind in Tab. 4-6 zusammengefasst.

Tab. 4-6: Mittelwerte der volumenbezogenen Wasseraufnahme für alle Dämmstoffe

Dämmstoff	Typ des Dämmstoffs	Mittlerer Porendurchmesser d_{pm} [mm]	Mittelwert der volumenbezogenen Wasseraufnahme ψ_m [%]
A	EPS	3,89	2,45
B	EPS	2,24	5,27
C	EPS	2,84	3,01
D	EPS	2,39	4,01
E	EPS (grau)	3,05	3,43
F	EPS (grau)	3,18	3,89
G	EPS (grau)	5,97	2,00
H	EPS (grau)	5,27	1,44
I	EPS (grau)	5,21	1,97
J	EPS	2,13	5,54
K	XPS	-	-
L	XPS	-	-
M	EPS	2,11	5,85
N	EPS	3,62	3,50
O	EPS	4,26	2,72

4.5 Ansatz für eine automatisierte Porenerkennung

Der mittlere Porendurchmesser eines EPS-Dämmstoffs muss derzeit über manuelle Messung einzelner Poren mühsam bestimmt werden. Um dieses Problem zu lösen, wurde ein Ansatz für einen automatisierten Erkennungsprozess entwickelt. Hierzu wird vom Querschnitt des Dämmstoffs A (siehe Tab. 4-5) ein Foto aufgenommen (siehe Abb. 4-20 (a)), welches anschließend mit Algorithmen aus der Bildverarbeitung nachbearbeitet wird, um die Regionen der einzelnen Poren ausfindig zu machen.

Im Verlauf der Entwicklung eines Algorithmus für einzelne Poren ergab die Literaturrecherche, dass die Erkennung zusammenhängender Regionen, was für den Menschen recht einfach ist, in der Bildverarbeitung bislang ein teilweise ungelöstes Problem darstellt. Als besonders geeignet stellt sich der Algorithmus von *Felzenszwalb u. Huttenlocher 2004* heraus. Allerdings ist auch in diesem Fall eine manuelle Anpassung durch den Menschen erforderlich, um offensichtlich zu kleine oder zu große Regionen herauszufiltern. Die Umsetzung des Algorithmus erfolgt in *Java* mithilfe der quelloffenen Software *BoofCV* aus der *Java Library*.

Der Algorithmus findet im ersten Durchlauf zahlreiche Regionen (siehe Abb. 4-20 (b)). Jede Farbe steht für eine gesonderte Region. Hierbei sind zwei Probleme erkennbar. Zum einen werden zahlreiche, sehr kleine Regionen erkannt, die offensichtlich keine eigene Pore darstellen. Zum anderen werden zusammenhängende Regionen identifiziert, die für das menschliche Auge klar erkennbar zwei Poren darstellen und sich nur berühren. Durch manuelle Einstellung einer Mindestgröße lassen sich die kleinen Regionen größtenteils entfernen (siehe Abb. 4-20 (c)). Durch Anpassung des Faktors k aus *Felzenszwalb u. Huttenlocher 2004* kann die Präferenz des Algorithmus für eine bestimmte Regionsgröße eingestellt werden. Dies erlaubt im Idealfall die Trennung zu großer Regionen (siehe Abb. 4-20 (d)).

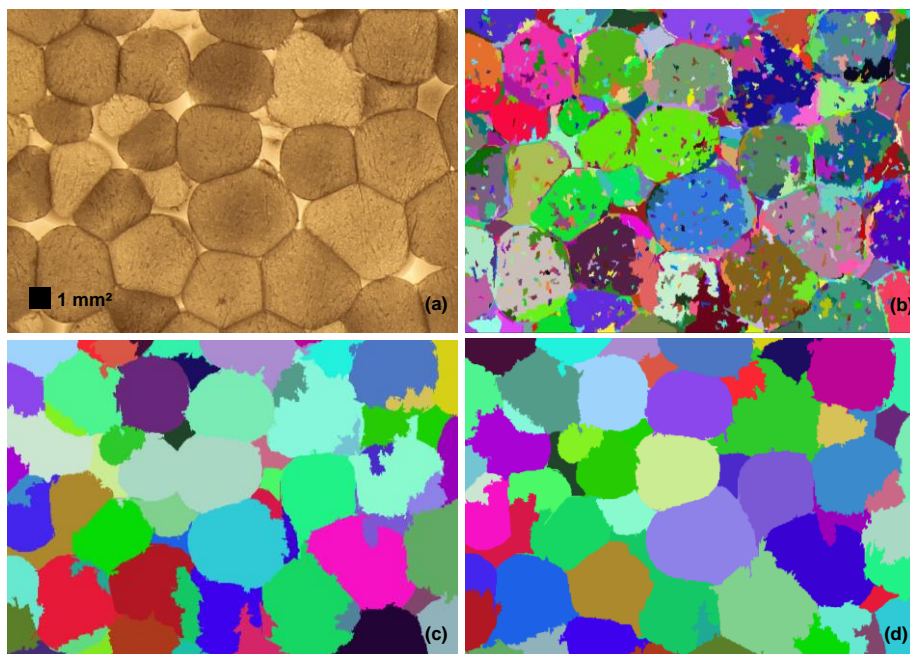


Abb. 4-20: Schritte der automatisierten Porenerkennung: Foto des Dämmstoffquerschnitts (a), erkannte Regionen nach Durchlauf des Algorithmus (b), Regionen nach Einstellung einer Mindestgröße (c) und nach Trennung zu großer Regionen (d)

Auf Grundlage von Abb. 4-20 (d) kann nun die Anzahl der Pixel für jede Region bzw. Pore erfolgen (siehe Abb. 4-21 links). Der Mittelwert der insgesamt 85 Regionen beträgt 6.442 Pixel bei einem Variationskoeffizienten von 109 %. Der sehr hohe Variationskoeffizient deutet auf große Schwankungen und viele Ausreißer hin. Zahlreiche Regionen mit niedriger Pixelanzahl können klar als Porenzwischenräume identifiziert (Anzahl der Pixel kleiner als 8.000) und gleichzeitig ausgeschlossen werden. Der neue Mittelwert und Variationskoeffizient von 22 verbleibenden Regionen bzw. Poren ergibt sich zu 16.191 Pixel und 25 % (siehe Abb. 4-21 rechts).

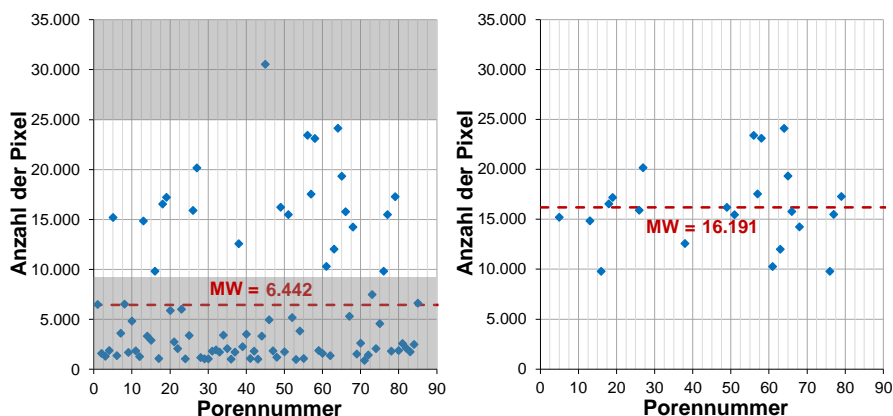


Abb. 4-21: Darstellung der Anzahl der Pixel für alle Poren (links) und für Poren innerhalb des relevanten Größenbereichs (rechts)

Das schwarze Referenzquadrat in Abb. 4-20 entspricht einer Größe von 1 mm² und besitzt 40 x 40 = 1600 Pixel. Der mittlere Flächeninhalt einer Pore A_P beträgt somit:

$$A_P = 16.191 \cdot \frac{1\text{mm}^2}{1.600} = 10,11\text{mm}^2$$

Dies entspricht einem mittleren Porendurchmesser d_{Pm} von 3,59 mm. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei einem Foto um einen Schnitt durch den Dämmstoff handelt und somit nicht immer der maximale Porendurchmesser erfasst wird. Der händisch gemessene Porendurchmesser von Dämmstoff A liegt bei 3,89 mm und unterliegt einem Variationskoeffizienten von 22 % (siehe Tab. 4-5).

Die Untersuchungen zeigen, dass die automatisierte Erfassung der Porengröße zwar möglich ist, jedoch zum aktuellen Stand noch erhebliche Abweichungen auftreten und darüber hinaus manuelle Justierungen notwendig sind. Um den vorgestellten Erkennungsalgorithmus in der Praxis nutzbar zu machen, müsste dessen Genauigkeit erhöht werden. Dies könnte durch den Einsatz hochauflösender Digitalkameras, die Anwendung zusätzlicher Algorithmen zur Erkennung von Polygonen oder eine Einfärbung des Materials zur Schärfung des Kontrastes zwischen Porenninnerem und Porengrenze erreicht werden.

4.6 Zusammenfassung

Das Ziel der theoretischen und experimentellen Untersuchungen in Kapitel 4 war die Erläuterung des Produktionsprozesses und die Beschreibung von relevanten Eigenschaften von Dämmstoffen aus EPS. Anschließend sollten die Einflussparameter auf die Wasseraufnahme solcher Dämmstoffe analysiert werden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Maßgebender Einflussparameter für die Wasseraufnahme eines EPS-Dämmstoffs ist der mittlere Porendurchmesser.
- Zwischen Wasseraufnahme und Porendurchmesser besteht eine Korrelation, die mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden kann.
- Je größer der mittlere Porendurchmesser ist, desto weniger Wasser tritt in den Dämmstoff ein.
- Rohdichte, Ausbildung der Oberfläche sowie Struktur, Größe und Anordnung der Poren steuern maßgeblich die Eigenschaften eines Dämmstoffs aus EPS.
- Die Rohdichte ist von der mittleren Porengröße des Dämmstoffs abhängig.
- Der Feuchtegehalt hat einen hohen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs.

Allgemein ergibt sich bei der Betrachtung des Frischbetondrucks der Unterschied, dass in den Dämmstoff nicht Wasser, sondern eine Mischung von Wasser und Zement (Zementleim) eintritt. Neben der Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs hat dies auch einen Einfluss auf die Eigenschaften des Ortbetons. Das nachfolgende Kapitel 5 beschäftigt sich daher mit der Untersuchung der Zementleimaufnahme von EPS-Dämmstoffen und den resultierenden Einflüssen auf das Wandbauteil.

5 Untersuchung der Zementleimaufnahme von Dämmstoffen aus EPS

Die in Kapitel 3 beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Typ des Dämmstoffs und dessen Aufnahmefähigkeit von Zementleim bei großen Bauteilhöhen eine der maßgebenden Einflussgrößen auf den Frischbetondruck ist. Um ein besseres Verständnis für das Material EPS zu bekommen, wurden deshalb in Kapitel 4 die Herstellung, wichtige Eigenschaften und die Wasseraufnahme von Dämmstoffen aus EPS ausführlich erläutert und untersucht.

Ziel des nachfolgenden Kapitels ist die Untersuchung der Zementleimaufnahme von EPS beim Verfüllen der Ortbetonergänzung. Zuerst werden die Auswirkungen einer Zementleimaufnahme auf das Wandbauteil diskutiert (Kapitel 5.1). Anschließend werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die maßgebenden Einflussparameter analysiert (Kapitel 5.2), sowie deren Auswirkungen quantifiziert (Kapitel 5.3). Am Ende werden die resultierenden Konsequenzen für das Wandbauteil zusammengefasst (Kapitel 5.4).

5.1 Einfluss der Zementleimaufnahme auf Frischbetondruck, Dämmstoff und Ortbeton

Die Umlagerung von Teilen des Zementleims in den EPS-Dämmstoff beeinflusst zum einen die Beanspruchung der Elementwand im Bauzustand und zum anderen die Eigenschaften von Dämmstoff und Ortbeton im Endzustand. Bei einer Grenzwertbetrachtung zwischen einer hohen und niedrigen Zementleimaufnahme des EPS muss zwischen positiven und negativen Auswirkungen unterschieden werden:

Hohe Zementleimaufnahme

- + Reduzierung des Frischbetondrucks durch Konsistenzänderung des Frischbetons
- Verschlechterung der wärmedämmenden Eigenschaften der Wand
- +/- Änderung der Festbetoneigenschaften des Ortbetons

Niedrige Zementleimaufnahme

- + Keine Beeinflussung der wärmedämmenden Eigenschaften
- +/- Keine Beeinflussung der Festbetoneigenschaften des Ortbetons
- Kein Beitrag zur Reduzierung des Frischbetondrucks

Im optimalen Fall sollte sich eine Zementleimmenge einstellen, die überwiegend den Frischbetondruck und die Eigenschaften von Dämmstoff und Ortbeton positiv beeinflussen. Für die drei Einflussbereiche „Frischbetondruck“, „Dämmstoff“ und „Ortbeton“ müssen für die Übertragung in die Praxis in jedem Fall konservative Ansätze gefunden werden.

5.2 Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter (S)

Bei einer Sensitivitätsanalyse wird untersucht, wie empfindlich das Endergebnis auf die Veränderung eines einzelnen Einflussparameters reagiert. Im Folgenden findet nur eine qualitative Betrachtung von geometrischen, werkstoffspezifischen und bauausführungstechnischen Einflussparametern auf den Frischbetondruck statt. Deshalb werden von jeder Kombination von Einflussparametern lediglich ein bis zwei Versuche durchgeführt. Eine Quantifizierung findet in Kapitel 5.3 statt.

5.2.1 Aufbau des Versuchsstands

Es wurde ein Versuchsstand konzipiert (siehe Abb. 5-1), der die Variation folgender Einflussparameter ermöglicht:

- Eigenschaften des Dämmstoffs
 - Oberflächenrauheit (G3)
 - Porendurchmesser (W1)
- Eigenschaften des Frischbetons
 - Wassergehalt (W3)
 - Zementgehalt (W3)
 - Konsistenzklasse (W5)
- Druckhöhe des Frischbetons (B7)
- Verdichtungsdauer des Frischbetons (B3)

Der Versuchsstand besteht aus einer Holzform mit den lichten Maßen 25 x 15 x 15 cm (L x B x H), die den Bereich der Ortbetonergänzung und des Dämmstoffs in einer Elementwand darstellt. An dessen Vorderseite ist eine Plexiglasscheibe angebracht, um das Eindringen des Zementleims in den Dämmstoff beobachten zu können. Der zu testende Dämmstoff besitzt immer eine Dicke von 10 cm, sodass der verbleibende Raum für die Ortbetonergänzung in der Holzform exakt die Maße eines Probewürfels zur Bestimmung der Druckfestigkeit (15 x 15 x 15 cm) aufweist. Die Holzform wird mit einem Deckel verschlossen, an dem Fallrohre mit verschiedener Länge befestigt werden, um unterschiedliche Druckhöhen beim Verdichtungsprozess einzustellen. Da der Beton im Fallrohr immer schon im frischen Zustand entfernt wird, ist der Versuchsstand wiederverwendbar. Der Frischbeton in der Holzform am Fußpunkt kann optional nach der Verdichtung dort verbleiben, sodass nach Erhärtung die Druckfestigkeit des Betons geprüft werden kann. So können etwaige Veränderungen infolge des angrenzenden Dämmstoffs im Vergleich zu der am Normprobewürfel getesteten Druckfestigkeit festgestellt werden. Die Versuchseinrichtung ermöglicht somit die Untersuchung

- der Zementleimaufnahme (Zement- und Wasseranteil) des Dämmstoffs unter Einwirkung des Frischbetondrucks,
- der verbleibenden Wassermenge im Dämmstoff nach Erhärtung des Ortbetons und
- der Änderung der Druckfestigkeit des Ortbetons in einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff aus EPS.

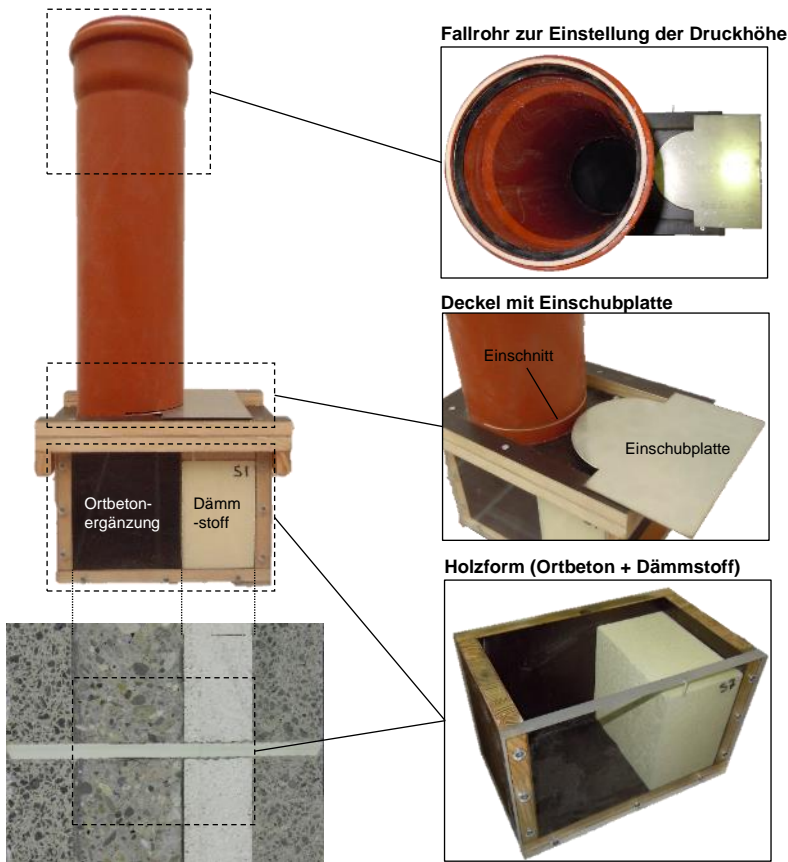


Abb. 5-1: Versuchsaufbau für die Sensitivitätsanalyse

5.2.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Im Rahmen der Versuche werden sowohl Eigenschaften des Dämmstoffs und des Frischbetons, als auch bauausführungstechnische Randbedingungen wie die Betonierhöhe und die Verdichtungsdauer variiert (siehe Tab. 5-1). Es werden zwei verschiedene Dämmstoffe getestet. Dabei handelt es sich um die Dämmstoffe G und J aus Kapitel 4.4.2 mit einem kleinen Porendurchmesser von 2,13 mm (J) und einem großen Porendurchmesser von 5,97 mm (G). Dämmstoff J ist eine heiß geschnittene Blockware und Dämmstoff G eine Automatenware. Um den Einfluss der Ausbildung der Oberfläche zu untersuchen, werden von Dämmstoff G zusätzlich heiß und kalt geschnittene Proben hergestellt. Insgesamt werden vier verschiedene Betonrezepturen verwendet. Diese unterscheiden sich im Wassergehalt (187,5 kg und 230,0 kg), Zementgehalt (288 kg, 354 kg und 450 kg), w/z-Wert und in der Konsistenz des Frischbetons. Zudem wird bei einer Rezeptur ein Fließmittel verwendet, um einen möglichen Einfluss bei sonst unveränderlichen Randbedingungen zu beobachten. Es findet stets eine Betrachtung der Grenzwerte statt, um die Höhe des Einflusses möglichst gut abschätzen zu können. Demnach werden der w/z-Wert zu 0,42 oder 0,65 und die Frischbetonkonsistenz zu F1 oder F4 eingestellt. Die Fallrohrhöhe und somit

Druckhöhe beträgt in den Versuchen 0,5 und 1,0 m (übliche Höhe einer Betonierlage) sowie 2,0 m (beschreibt die bisher maximal festgestellte Tiefe, in der noch hydrostatischer Druck wirkt; siehe Kapitel 3.6). Bei der Verdichtungsdauer des Frischbetons wurde zwischen 0 s (keine Verdichtung), 60 s (sehr lange) und 15 s (Annahme einer ausreichenden Verdichtung nach *Düsterhaupt 2006*) unterschieden.

Tab. 5-1: Versuchsprogramm der Sensitivitätsanalyse

Bez.	Dämmstoff		Frischbeton					Ausführung				
	Porendurchmesser ¹⁾	Oberfläche ²⁾	Rez. ³⁾	Wasser [kg]	Zement [kg]	w/z [-]	Konsistenz	FM ⁴⁾	Druckhöhe [m]	Verdichtungsdauer [s]		
S01	2,13 mm (J) „klein“	BW(h)	1	230,0	354,0	0,65	F4	-	0,5	15		
S02								-	1,0			
S03								-	2,0			
S04	5,97 mm (G) „groß“	BW(k)						-	1,0			
S05		BW(h)						-				
S06		AW						-				
S07	2,13 mm (J) „klein“	BW(h)	2	187,5	450,0	0,42	F1	-		0		
S08								-		60		
S09								-		0		
S10	5,97 mm (G) „groß“		3				2	2	F4	ja	-	15
S11											-	60
S12											2,13 mm (J) „klein“	2
S13	-											
S14 ⁵⁾	-											
S15	2	4	-	-	-	-						
S16 ⁵⁾						-						
S17						-						
S18 ⁵⁾	-											

1) Die verwendeten Dämmstoffe werden in Tab. 4-5 aufgeführt.

2) Ausbildung der Oberfläche: BW(h) = Blockware (heiß); BW(k) = Blockware (kalt); AW = Automatenware

3) Betonrezepturen siehe Tab. F 4

4) Fließmittelzugabe (ACE 30)

5) Nach einem Versuch verbleiben Dämmstoff und Frischbeton zur Erhärtung in der Holzform

Die Durchführung eines Versuchs findet nach einem festgelegten Ablaufplan mit unveränderlichen Randbedingungen statt (siehe Tab. 5-2), wobei zwischen Variante A und Variante B unterschieden wird. Die Schritte 1 bis 6 sind bei beiden Varianten gleich. Bei Variante A (S01 bis S13, S15, S17) liegt der Fokus der Untersuchungen auf der während der Verdichtung eingedrungenen Zementleimmenge in den Dämmstoff und somit auf dem Einflussbereich „Frischbetondruck“. Variante B (S14, S16 und S18) zielt auf die Einflussbereiche „Dämmstoff“ und „Ortbetonerfüllung“ ab. Es wird untersucht, wie viel Wasser und Zement im Dämmstoff nach der Erhärtung des Betons verbleibt und ob die Druckfestigkeit des Ortbetons beeinflusst wird.

Nach Bestimmung der trockenen Masse der Dämmstoffprobe m_0 (1) wird diese in den Versuchsstand eingebaut (2). Anschließend wird der Frischbeton gemischt und das Ausbreitmaß bestimmt. Um die Druckfestigkeit des Betons testen zu können, werden zusätzlich jeweils drei Normprobewürfel hergestellt (3). Anschließend wird der Frischbeton bis zur Oberkante in das Fallrohr gefüllt (4) und bis zum Fußpunkt mit einem Innenrüttler verdichtet (5). Danach wird in den Einschnitt im Fallrohr eine Einschubplatte eingeschoben und der Deckel inklusive Fallrohr und Frischbeton zur Entsorgung entfernt (6).

5.2 Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter (S)

Tab. 5-2: Versuchsdurchführung (Sensitivitätsanalyse)

Arbeitsschritte bei der Sensitivitätsanalyse	
1. Bestimmung der trockenen Masse des Dämmstoffs m_0	
2. Einbau des Dämmstoffs in den Versuchsstand	
3. Mischen des Frischbetons <ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung des Ausbreitmaßes nach <i>DIN EN 12350-5</i> - Herstellung von Würfeln zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach <i>DIN EN 12390-3</i> 	
4. Einfüllen des Frischbetons in das Fallrohr des Versuchsstands	
5. Verdichten des Frischbetons bis zum Fußpunkt mit einem Innenrüttler	
6. Einschlagen der Einschubplatte in den Einschnitt im Fallrohr und Entfernung des Deckels inklusive Fallrohr und Frischbeton	
Variante A Einflussbereich „Frischbetondruck“ (S01-S13, S15, S17)	Variante B Einflussbereiche „Dämmstoff“ und „Ortbeton“ (S14, S16, S18)
7a. Entfernen des Dämmstoffs aus der Holzform	7b. Verschließen der Holzform mit Frischbeton und Dämmstoff
8a. Grobes Abschaben der Frischbetonreste vom Dämmstoff	8b. Aushärtung des Betons in der Holzform für 3 Tage und anschließendes Entfernen des Dämmstoffs
9a. Bestimmung der feuchten Masse des Dämmstoffs m_{1A} (Zement + Wasser <u>im und am</u> Dämmstoff)	9b. Bestimmung der feuchten Masse des Dämmstoffs m_{1B} (Zement + Wasser <u>im und am</u> Dämmstoff)
10a. Bestimmung der Masse des Dämmstoffs nach Trocknung m_2 (Zement <u>am und im</u> Dämmstoff)	10b. Bestimmung der Masse des Dämmstoffs nach Trocknung m_2 (Zement <u>am und im</u> Dämmstoff)
11a. Entfernung des überschüssigen Zements und erneute Bestimmung der Masse m_3 (nur Zement <u>im</u> Dämmstoff)	11b. Entfernung des überschüssigen Zements und erneute Bestimmung der Masse m_3 (nur Zement <u>im</u> Dämmstoff)
12a. -	12b. Bestimmung der Druckfestigkeit des Würfels nach 28 Tagen, der neben dem Dämmstoff ausgehärtet ist
13. Bestimmung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen der Normprobewürfel von Schritt 3	

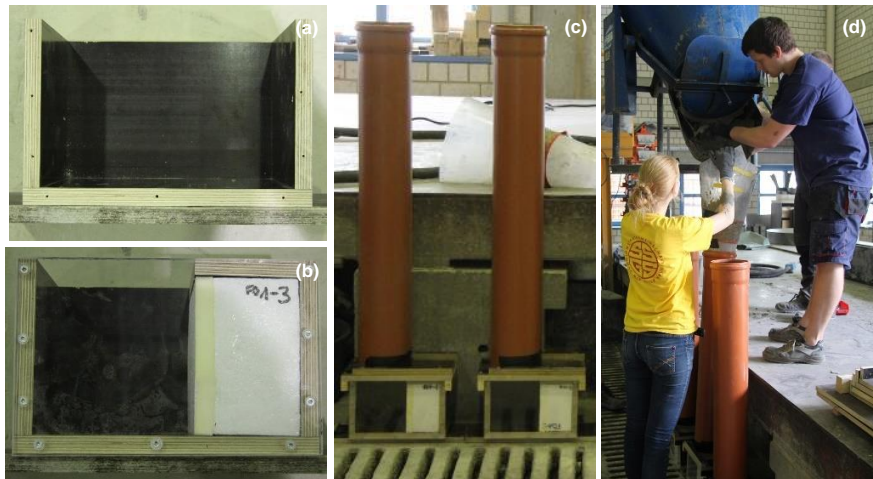


Abb. 5-2: Leere Holzform (a), Holzform mit eingebautem Dämmstoff (b), vorbereiteter Versuchsstand (c) und Füllung des Fallrohrs mit Frischbeton (d)

5 Untersuchung der Zementleimaufnahme von Dämmstoffen aus EPS

Bei Variante A (siehe Abb. 5-3) wird die Plexiglasscheibe von der Holzform gelöst und der Dämmstoff entfernt (7a). Danach werden noch verbleibende Frischbetonreste vom Dämmstoff grob abgeschabt (8a) und der Dämmstoff gewogen (9a). Die ermittelte Masse beinhaltet die trockene Masse des Dämmstoffs inklusive der während des Versuchs eingedrungenen und außen haftenden Zementleimmenge. Nach vollständiger Trocknung des Dämmstoffs im Wärmeschrank wird dieser erneut gewogen (10a), um die in den Dämmstoff eingedrungene Wassermenge zu ermitteln. Anschließend wird der getrocknete Zement, der sich nicht im Zwickelvolumen des Dämmstoffs sondern außen am Dämmstoff befindet, entfernt (siehe Abb. 5-3 (c)) und die Masse der Probe erneut bestimmt (11a). Dies ermöglicht die Berechnung der Zementmenge, die sich in dem Dämmstoff befindet. Nach 28 Tagen wird die Druckfestigkeit des Betons anhand der hergestellten Probewürfel bestimmt (13).

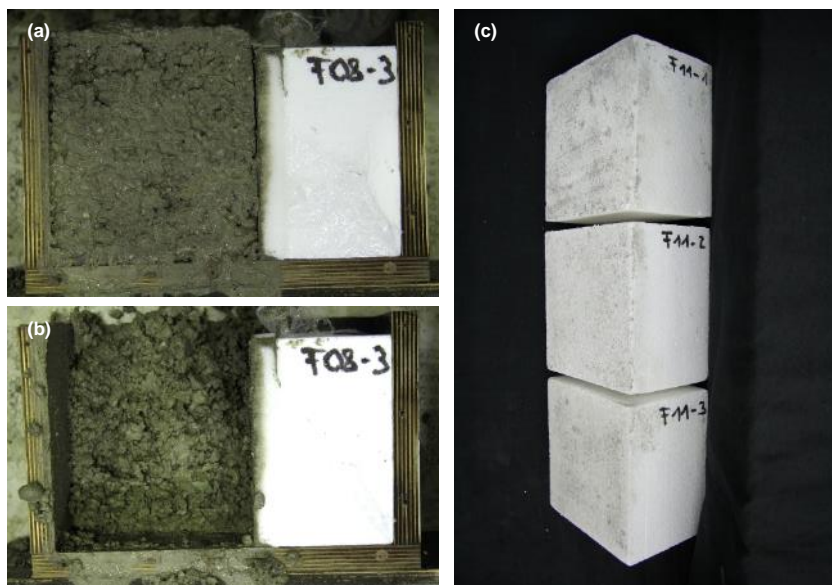


Abb. 5-3: Variante A: Entfernung der Plexiglasscheibe (a), Entfernung von Frischbeton und Dämmstoff (b) und Dämmstoff im getrockneten Zustand (c)

Bei Variante B (siehe Abb. 5-4) wird die Oberfläche des Frischbetons in der Holzform geglättet und mit einem Deckel verschlossen (7b). Anschließend härtet der Beton in der Form für drei Tage aus (8b). Nach dieser Zeit ist sichergestellt, dass die während der Erhärtung entstandene Hydratationswärme abgeflossen ist. Im Anschluss wird die Holzform geöffnet und die Masse des feuchten Dämmstoffs ermittelt (9b). Dies dient zur Einschätzung, ob ein Teil des Wassers im Dämmstoff zur Nachbehandlung des Ortbetons während der Aushärtung genutzt wird. Nach vollständiger Trocknung im Wärmeschrank wird die Masse erneut bestimmt (10b). Anschließend wird der außen haftende Zement entfernt und die Probemasse erneut bestimmt (11b). Nach 28 Tagen wird die Druckfestigkeit des Betonwürfels, der unmittelbar neben dem Dämmstoff ausgehärtet ist, getestet (12b). Gleichzeitig wird die Druckfestigkeit der während des Versuchs hergestellten Normprobewürfel bestimmt (13), um einen möglichen Unterschied feststellen zu können.

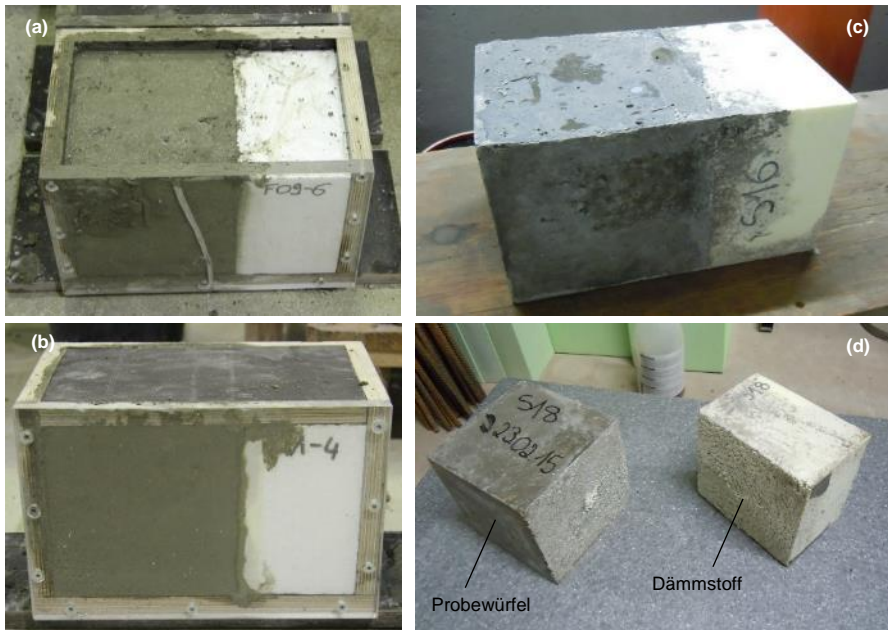


Abb. 5-4: Variante B: Glättung der Frischbetonoberfläche (a), Schließen der Form mit einem Deckel (b) u. entfernter Probewürfel mit Dämmstoff nach 3 Tagen Aushärtung (c, d)

5.2.3 Ergebnisse und Auswertung

Für einen besseren Überblick werden in Abb. 5-5 die Schritte der Massenermittlung (m_0 bis m_3) schematisch dargestellt. Die Bezeichnungen bedeuten hierbei:

- m_0 Masse des trockenen Dämmstoffs
- $m_{1A/B}$ Masse des Dämmstoffs inklusive Zementleim im und um den Dämmstoff unmittelbar nach dem Versuch (Variante A) und nach drei Tagen Aushärtung in der Holzform (Variante B)
- m_2 Masse des Dämmstoffs nach vollständiger Trocknung (Zement im und um den Dämmstoff vorhanden)
- m_3 Masse des Dämmstoffs nach Entfernen des überschüssigen Zements um den Dämmstoff

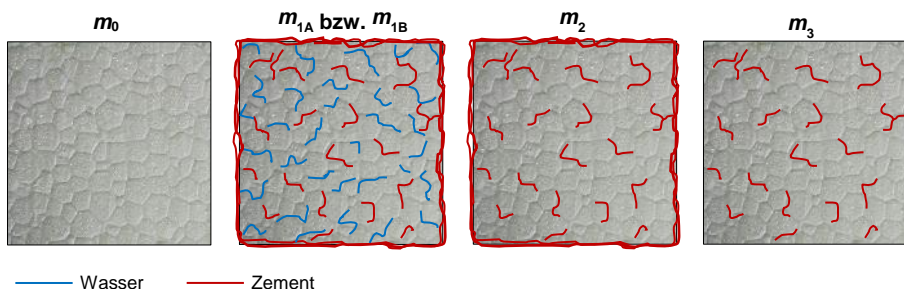


Abb. 5-5: Schritte der Massenermittlung vor, während und nach der Versuchsdurchführung

5 Untersuchung der Zementleimaufnahme von Dämmstoffen aus EPS

Die in den Dämmstoff eingedrungene Wassermenge unmittelbar nach einem Versuch m_{WA} (Variante A) und die verbleibende Wassermenge im Dämmstoff nach drei Tagen Aushärtung in der Holzform m_{WB} (Variante B) ergibt sich zu:

$$m_{WA} = m_{1A} - m_2 \quad (5-1)$$

$$m_{WB} = m_{1B} - m_2 \quad (5-2)$$

Anschließend kann die in den Dämmstoff eingedrungene Zementmenge m_Z bestimmt werden:

$$m_Z = m_3 - m_0 \quad (5-3)$$

Die Zusammenfassung aller im Versuch ermittelten Massen, den daraus errechneten Wasser- und Zementmengen sowie den gemessenen Betonierhöhen und Ausbreitmaßen ist in Tab. D 1 in Angang D zu finden. Zur Ergebnisdarstellung und Auswertung in den nachfolgenden Unterkapiteln wird das Bezeichnungsschema gemäß Tab. 5-3 verwendet:

Tab. 5-3: Bezeichnungsschema für die Ergebnisdarstellung der Sensitivitätsanalyse

-	Variante A	Dämmstoff J (kleine Poren)	Einzelwert
▲			Mittelwert
-		Dämmstoff G (große Poren)	Einzelwert
▲			Mittelwert
-	Variante B	Dämmstoff J (kleine Poren)	Einzelwert
▲			Mittelwert

5.2.3.1 Druckhöhe und Ausbildung der Oberfläche des Dämmstoffs

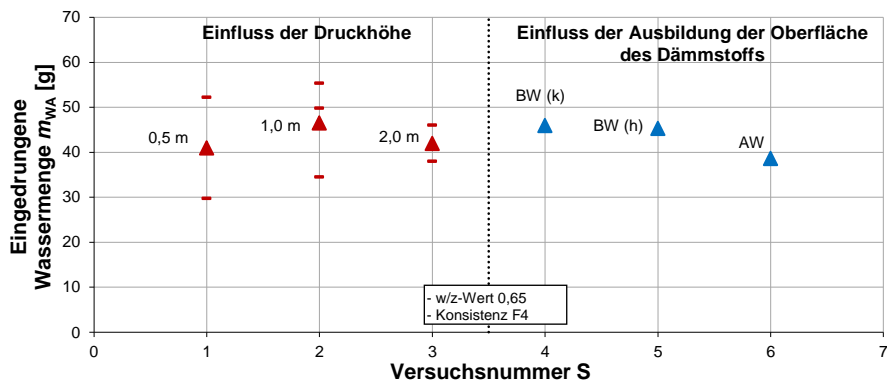


Abb. 5-6: Einfluss der Druckhöhe des Frischbetons und der Ausbildung der Oberfläche des Dämmstoffs auf die eingedrungene Wassermenge

5.2 Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung maßgebender Einflussparameter (S)

Abb. 5-6 und Tab. 5-4 beinhalten die Variation der Druckhöhe bei Verwendung von Dämmstoff J und die Variation der Oberflächenausbildung bei Dämmstoff G. Die Ergebnisse zeigen, dass weder die Druckhöhe des Frischbetons noch die Ausbildung der Oberfläche des Dämmstoffs einen maßgebenden Einfluss auf die Wasseraufnahme des Dämmstoffs haben.

Tab. 5-4: Zusammenfassung der Ergebnisse (Einfluss von Druckhöhe und Herstellungsart)

Versuchsbezeichnung	Druckhöhe			Ausbildung der Oberfläche		
	0,5 m S01	1,0 m S02	2,0 m S03	BW (k) S04	BW (h) S05	AW S06
Eingedrungene Wassermenge m_{WA} [g]	40,96	46,55	42,01	45,95	45,31	38,65
Mittelwert [g]	43,18			43,30		
Standardabweichung [g]	2,97			4,04		
Variationskoeffizient [%]	6,88			9,34		

Bei Variation der Druckhöhe ist ab 1,0 m sogar eine leicht abnehmende Tendenz zu erkennen, welche jedoch noch im Bereich der zu erwartenden Toleranzen liegt. Deshalb kann bei der Druckhöhe von keinem Einfluss ausgegangen werden.

Beim Vergleich der Oberflächenausbildung fällt die etwas niedrigere Wasseraufnahme bei Automatenware im Vergleich zu Blockware auf. Heiß geschnittene und kalt geschnittene Blockware nehmen die gleiche Wassermenge auf. Somit ist der Einfluss der Ausbildung der Dämmstoffoberfläche als gering einzustufen. Die Variationskoeffizienten liegen bei der Druckhöhe des Frischbetons bei 6,88 % und bei der Oberflächenausbildung des Dämmstoffs bei 9,34 %.

5.2.3.2 Verdichtungsdauer des Frischbetons

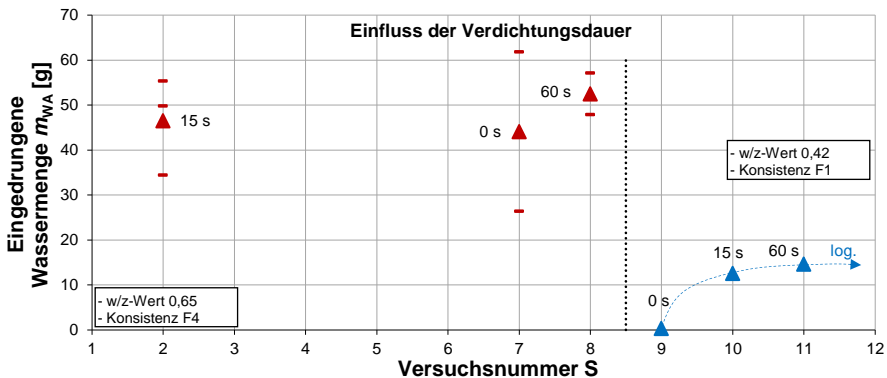


Abb. 5-7: Einfluss der Verdichtungsdauer auf die eingedrungene Wassermenge

Um die Unter- und Obergrenze der Wasseraufnahme zu ermitteln, wird zum einen ein fließfähiger Beton ($w/z = 0,65$ und F4) in Kombination mit einem Dämmstoff mit kleinen Poren und zum anderen ein steifer Beton ($w/z = 0,42$ und F1) in Kombination mit einem Dämmstoff mit großen Poren untersucht (siehe Abb. 5-7 und Tab. 5-5).

Tab. 5-5: Zusammenfassung der Ergebnisse (Einfluss der Verdichtungsdauer)

Versuchsbezeichnung	Dämmstoff J (kleine Poren)			Dämmstoff G (große Poren)		
	S07	S02	S08	S09	S10	S11
Verdichtungsdauer	0 s	15 s	60 s	0 s	15 s	60 s
Eingedrungene Wassermenge m_{WA} [g]	44,10	46,55	51,05	0,38	12,61	14,67
Mittelwert [g]	47,23			9,22		
Standardabweichung [g]	3,52			7,72		
Variationskoeffizient [%]	7,46			83,78		

Bei dem Dämmstoff mit kleinen Poren ist mit Erhöhung der Verdichtungsdauer von 15 auf 60 s auch eine leichte Zunahme der eingedrungenen Wassermenge zu verzeichnen. Findet gar keine Verdichtung statt, dringt in den Dämmstoff nur minimal weniger Wasser ein. Der Variationskoeffizient beträgt lediglich 7,46 %, was auf einen geringen Einfluss der Verdichtungsdauer auf die Wasseraufnahme hindeutet.

Bei dem Dämmstoff mit großen Poren dringt bei fehlender Verdichtung so gut wie kein Wasser ein. Bei Steigerung der Verdichtungszeit auf 15 s und 60 s findet eine Erhöhung der eingedrungenen Wassermenge auf 12,61 g und 14,67 g statt. Es kann jedoch noch immer von einem geringen Einfluss ausgegangen werden. Der logarithmische Verlauf der Erhöhung der eingedrungenen Wassermenge in Abhängigkeit der Verdichtungszeit (siehe Abb. 5-7) weist darauf hin, dass diese bei einer noch längeren Verdichtungszeit nicht mehr viel ansteigen würden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verdichtungsdauer keinen Einfluss hat.

Beim Vergleich zwischen der Verwendung von fließfähigem und steifen Beton kann beobachtet werden, dass bei einem w/z-Wert von 0,65 und einer Konsistenz F4 deutlich mehr Wasser in den Dämmstoff eindringt als bei einem w/z-Wert von 0,42 und einer Konsistenz F1.

5.2.3.3 Wassergehalt und Konsistenz des Betons

Um den Einfluss des Wassergehalts im Frischbeton zu analysieren, werden die Rezepturen 1 und 4 miteinander verglichen. Diese besitzen beide einen w/z-Wert von 0,65 und sind der Konsistenzklasse F4 zugeordnet. Rezeptur 1 beinhaltet 225 l und Rezeptur 4 nur 188 l Wasser pro m³ Frischbeton. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei Verwendung von Dämmstoff J keinen Unterschied bei der eingedrungenen Wassermenge gibt (siehe Abb. 5-8). Die Wassermenge im Frischbeton steht demnach nicht mit der in den Dämmstoff eingedrungenen Wassermenge in Verbindung. Der Variationskoeffizient beträgt 6,86 %.

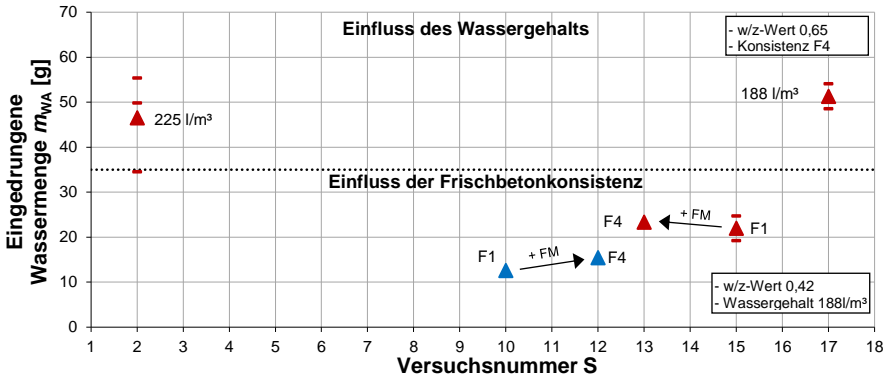


Abb. 5-8: Einfluss des Wassergehalts und der Konsistenzklasse des Frischbetons auf die eingedrungene Wassermenge

Zur Einschätzung des Einflusses der Konsistenzklasse wurde ein Beton der Konsistenzklasse F1 mit einem w/z-Wert von 0,42 (Rezeptur 2) mithilfe eines Fließmittels auf die Konsistenzklasse F4 (Rezeptur 3) gebracht. Bei Betrachtung eines Dämmstoffs mit kleinen Poren (S13 und S15) resultiert aus der fließfähigeren Konsistenz nur eine geringe Erhöhung der eingedrungenen Wassermenge (Variationskoeffizient 7,30 %). Bei großen Dämmstoffporen gibt es einen größeren Einfluss. Der Variationskoeffizient liegt hier bei 14,09 %. Für beide Dämmstoffe J und G kann jedoch von einem geringen Einfluss ausgegangen werden. Auch hier kann gezeigt werden, dass bei einem niedrigen w/z-Wert viel weniger Wasser in den Dämmstoff eindringt als bei einem hohen w/z-Wert.

Tab. 5-6: Zusammenfassung der Ergebnisse (Einfluss des Wassergehalts und der Konsistenz des Frischbetons)

	Wassergehalt [l/m³]		Frischbetonkonsistenzklasse			
	225	188	F1	F4 (FM) ^{*)}	F1	F4 (FM) ^{*)}
Versuchsbezeichnung	S02	S17	S10	S12	S15	S13
Eingedrungene Wassermenge m_{WA} [g]	46,55	51,30	12,61	15,40	24,34	21,95
Mittelwert [g]	48,93		14,00		23,15	
Standardabweichung [g]	3,36		1,97		1,69	
Variationskoeffizient [%]	6,86		14,09		7,30	

*) Die Frischbetonkonsistenzklasse F4 wird mithilfe des Fließmittels ACE 30 eingestellt

5.2.3.4 Mittlerer Porendurchmesser des Dämmstoffs und w/z-Wert des Frischbetons

Die Betrachtungen in den Kapiteln 5.2.3.1 bis 5.2.3.3 haben gezeigt, dass vor allem die Höhe des w/z-Werts des Frischbetons und die Porengröße des Dämmstoffs maßgebende Einflussparameter sind. Deshalb wird nachfolgend der Einfluss dieser beiden Parameter auf die Wasseraufnahme (siehe Abb. 5-9) und die Zementaufnahme (siehe Abb. 5-10) dargestellt.

5 Untersuchung der Zementleimaufnahme von Dämmstoffen aus EPS

Für Dämmstoffe aus EPS können folgende Aussagen hinsichtlich der Wasseraufnahme getroffen werden:

- Die Wasseraufnahme ist umso höher, je größer der w/z-Wert ist.
- Die Wasseraufnahme ist umso höher, je kleiner der Porendurchmesser ist.
- Der Einfluss des w/z-Werts ist größer als der Einfluss des Porendurchmessers.
- Bei hohen w/z-Werten ist nur noch ein geringer Einfluss des Porendurchmessers zu verzeichnen.

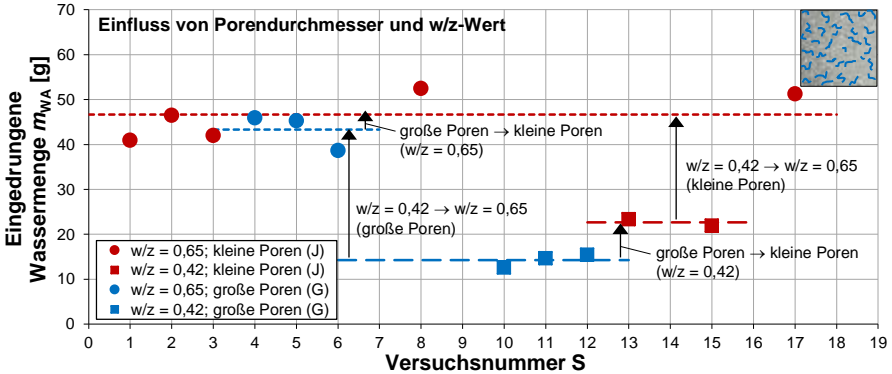


Abb. 5-9: Einfluss des w/z-Werts des Frischbetons und der Porengröße des Dämmstoffs auf die eingedrungene Wassermenge

Die Gegenüberstellung mit der zu den Versuchen jeweils zugehörigen Zementaufnahme zeigt eine ähnliche Tendenz:

- Die Zementaufnahme ist umso höher, je größer der w/z-Wert ist.
- Die Zementaufnahme ist umso höher, je kleiner der Porendurchmesser ist.
- Der Einfluss des Porendurchmessers ist größer als der Einfluss des w/z-Wertes.
- Bei großem Porendurchmesser ist nur noch ein sehr geringer Einfluss des w/z-Werts zu verzeichnen.

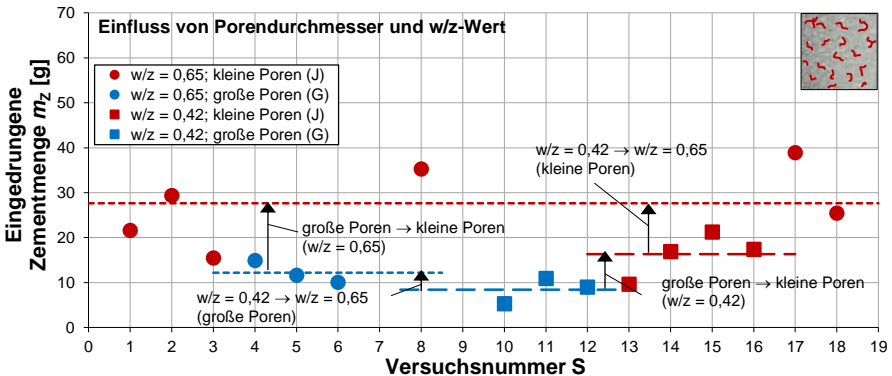


Abb. 5-10: Einfluss des w/z-Werts des Frischbetons und der Porengröße des Dämmstoffs auf die eingedrungene Zementmenge

5.2.3.5 Hydratation des Ortbetons

Die bisherige Ergebnisdarstellung und Auswertung haben sich auf die Zementleimaufnahme des Dämmstoffs während der Verfüllung der Ortbetonergänzung beschränkt (Variante A). Nach Beendigung des Betoniervorgangs beginnt die Hydratation des Ortbetons. In einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff härtet der Ortbeton unmittelbar neben dem Dämmstoff aus. Im Folgenden wird eingeschätzt, ob ein Teil des Wassers im Dämmstoff zur Nachbehandlung des Ortbetons während der Aushärtung genutzt wird und sich dadurch die eingedrungene Wassermenge im Dämmstoff reduziert. Der Vergleich der eingedrungenen Wassermenge vor und nach der Hydratation ist in Abb. 5-11 dargestellt.

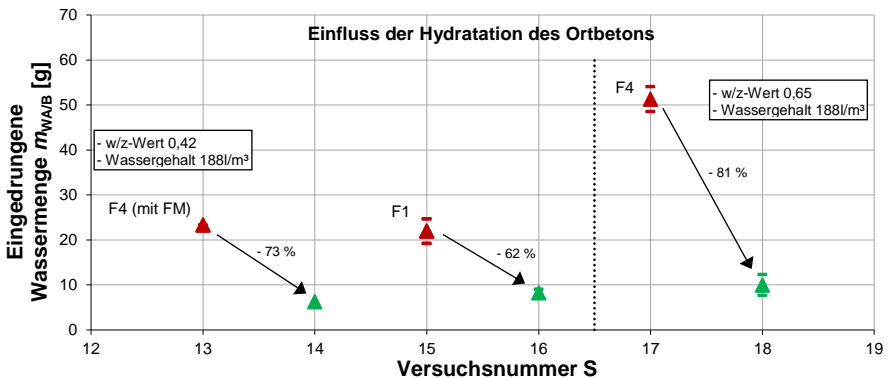


Abb. 5-11: Einfluss der Hydratation des Ortbetons in Kontakt mit dem Dämmstoff auf die eingedrungene Wassermenge

Die Versuche zeigen, dass mit dem Hydratationsverlauf des Ortbetons eine erhebliche Reduzierung der eingedrungenen Wassermenge einhergeht. Die Reduzierung ist bei hohem w/z-Wert (0,65) ausgeprägter als bei niedrigem w/z-Wert (0,42).

Tab. 5-7: Zusammenfassung der Ergebnisse (Einfluss der Hydratation des Ortbetons)

w/z-Wert	0,42				0,65	
Versuchsbezeichnung	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Eingedrungene Wassermenge unmittelbar nach dem Versuch (Variante A) m_{wA} [g]	23,35	-	21,95	-	51,30	-
Verbleibende Wassermenge nach 3 Tagen Aushärtung in der Holzform (Variante B) m_{wB} [g]	-	6,26	-	8,28	-	9,98
Reduktion der Wassermenge [g]	17,09		13,67		41,32	
Prozentuale Reduktion [%]	73,2		62,3		80,5	

Die Reduktion beträgt zwischen 62 und 81 %, sodass in allen drei Fällen im Dämmstoff nur noch weniger als 10 g Wasser verbleiben. Dies entspricht einer Menge von weniger als 500 ml pro m² Wand. Eine Quantifizierung der Reduktion der Wassermenge infolge Hydratation erfolgt in Kapitel 5.3.

5.2.3.6 Druckfestigkeit des Ortbetons und der Normprobewürfel

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt der Versuche ist die Beeinflussung der Eigenschaften des Ortbetons infolge eines Entzugs von Zementleim (siehe Abb. 5-12). Neben einer Konsistenzänderung, die den Frischbetondruck beeinflusst, kommt es auch zur Veränderung der Druckfestigkeit des Ortbetons.

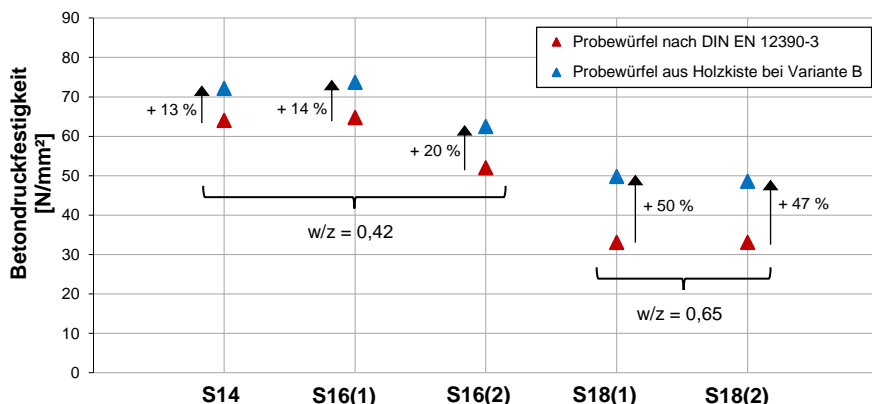


Abb. 5-12: Einfluss des Entzugs von Zementleim aus dem Frischbeton auf die Betondruckfestigkeit

Zur Feststellung einer Druckfestigkeitsänderung werden zum einen die Normprobewürfel und zum anderen die aus derselben Mischung stammenden Probewürfel aus Variante B der Versuchsdurchführung nach 28 Tagen (trockene Lagerung) getestet. Für Betone mit einem w/z-Wert von 0,42 ist im Schnitt eine Festigkeitssteigerung von 16 % zu verzeichnen. Bei dem Beton mit einem w/z-Wert von 0,65 erhöht sich die Festigkeit sogar um bis zu 50 % (siehe Tab. 5-8).

Tab. 5-8: Veränderung der Druckfestigkeit des Ortbetons durch Aushärtung neben einem Dämmstoff im Vergleich zum Normprobewürfel nach *DIN EN 12390-3*

Versuchsbezeichnung	Betonrezeptur	w/z [-]	Druckfestigkeit nach 28 Tagen [N/mm ²]		Zuwachs Druckfestigkeit [%]
			Normprobewürfel nach <i>DIN EN 12390-3</i>	Würfel aus Variante B	
S14	3	0,42	64,00	72,13	13
S16(1)	2	0,42	64,79	73,71	14
S16(2)			51,98	62,49	20
S18(1)	4	0,65	33,11	49,82	50
S18(2)			33,11	48,58	47

Grund für die Festigkeitssteigerung ist der reduzierte w/z-Wert der Mischung und der positive Effekt der Nachbehandlung durch das im Dämmstoff vorhandene Wasser (siehe Kapitel 5.2.3.5). Eine Quantifizierung der Festigkeitsänderung in Abhängigkeit der Randbedingungen findet in Kapitel 5.3 statt.

5.2.3.7 Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass beim Verfüllen der Ortbetonergänzung Teile des Zementleims in den Dämmstoff aus EPS eindringen. Eine Erhöhung des Feuchte-

und Zementgehalts führt zu einem enormen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und somit zu einer Reduzierung der Dämmwirkung. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass während der Hydratation ca. 60 bis 80 % des eingedrungenen Wassers wieder aus dem Dämmstoff entzogen wird. Der Zement verbleibt vollständig im Dämmstoff. Eine Quantifizierung des Einflusses auf die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Randbedingungen findet in Kapitel 5.3 und 5.4 statt.

5.2.4 Fazit

Ziel der Sensitivitätsanalyse ist die Identifizierung von Einflussparametern, die nur geringe Auswirkungen auf die Beanspruchung oder die Eigenschaften der Elementwand haben. Für die anschließenden Untersuchungen wird so der Aufwand beträchtlich reduziert, da einige Parameter nicht mehr berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse und damit die qualitative Einschätzung der Einflussparameter ist in Tab. 5-9 zusammengefasst. Bei der vorliegenden Versuchsreihe wird von keinem oder einem geringen Einfluss gesprochen, wenn der Variationskoeffizient des Einflussparameters weniger als 15 % beträgt.

Tab. 5-9: Qualitative Einschätzung der Einflussparameter

Einflussbereich	Einflussparameter	Kein Einfluss	Geringer Einfluss	Hoher Einfluss
Frischbeton- druck	Druckhöhe	x		
	Ausbildung der Oberfläche		x	
	Verdichtungsdauer		x	
	Wassergehalt	x		
	Frischbetonkonsistenz		x	
	Porendurchmesser			x
	w/z-Wert			x
Dämmstoff	Wärmeleitfähigkeit			x
Ortbetonergänzung	Druckfestigkeit			x

Die Ergebnisse zeigen, dass für die weiteren Betrachtungen zum Einflussbereich „Frischbetondruck“ der Porendurchmesser des Dämmstoffs und der w/z-Wert des Frischbetons zu betrachten sind. Die Druckhöhe, die Verdichtungsdauer, der Wassergehalt und die Konsistenz des Frischbetons sowie die Ausbildung der Dämmstoffoberfläche haben keinen oder nur einen geringen Einfluss und werden nicht weiter berücksichtigt. Einen hohen Einfluss auf das Wandelement haben die im Dämmstoff nach der Hydratation verbleibende Wasser- und Zementmenge und die resultierende Verminderung der Dämmwirkung des Wandelements. Die positive Erhöhung der Druckfestigkeit des Ortbetons infolge der Umlagerungsprozesse des Zementleims vom Frischbeton in den Dämmstoff sollte ebenfalls näher untersucht werden.

Nach qualitativer Einschätzung der Auswirkung der verschiedenen Einflüsse werden im folgenden Kapitel die maßgebenden Einflüsse aus Tab. 5-9 mit hohem Einfluss quantifiziert.

5.3 Quantifizierung der eingedrungenen Zementleimmenge (F)

Im diesem Kapitel findet eine quantitative Betrachtung der Einflüsse von

- mittlerem Porendurchmesser d_{Pm} des Dämmstoffs und
- w/z-Wert des Frischbetons

auf die resultierende Wasser- und Zementaufnahme des Dämmstoffs und die damit einhergehende Druckfestigkeitsänderung des Ortbetons statt. Außerdem soll quantitativ dargelegt werden, wie viel Wasser nach Erhärtung des Ortbetons noch in dem Dämmstoff verbleibt und welche Auswirkungen dies auf dessen Wärmeleitfähigkeit hat.

5.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen wird der gleiche Versuchsaufbau wie in Kapitel 5.2 verwendet. Die Versuchsdurchführung erfolgt analog zur Sensitivitätsanalyse. Um eine hohe Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten, werden von jeder Versuchskombination (F01 bis F12) je drei Versuche nach Variante A und drei Versuche nach Variante B durchgeführt (siehe Kapitel 5.3.2).

5.3.2 Versuchsprogramm

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werden der Porendurchmesser des Dämmstoffs und der w/z-Wert variiert (siehe Tab. 5-10). Folgende Randbedingungen werden während den Versuchen konstant gehalten, da ihr Einfluss durch die Sensitivitätsanalyse als gering eingestuft werden konnte (siehe Tab. 5-9):

- Ausbildung der Dämmstoffoberfläche: Blockware (heiß)
- Konsistenzklasse des Frischbetons: F3
- Verdichtungszeit des Frischbetons: 15 s
- Betonierhöhe: 1,0 m

Es werden drei verschiedene Porendurchmesser und vier verschiedene Betonrezepturen (siehe Tab. F 5) mit unterschiedlichen w/z-Werten verwendet, d. h. insgesamt 12 Kombinationen. Der Wassergehalt ist bei allen Mischungen gleich, lediglich der Zementgehalt wird verändert, um gezielt einen definierten w/z-Wert einzustellen. Die sechs Versuche jeder Kombination F01 bis F12 werden zeitgleich mit derselben Betonmischung durchgeführt. Bei den drei Versuchen nach Variante A wird der Dämmstoff unmittelbar nach dem Verdichten ausgebaut und gewogen. Zusätzlich werden drei Normprobewürfel zur Bestimmung der Druckfestigkeit hergestellt. Bei den drei Versuchen von Variante B verbleibt der Dämmstoff noch drei Tage in der Holzform und wird dann erst entfernt und gewogen. Die entstehenden Probewürfel dienen zum Vergleich mit den Normprobewürfeln aus Variante A (Festigkeit nach 28 Tagen bei trockener Lagerung).

5.3 Quantifizierung der eingedrungenen Zementleimmenge (F)

Tab. 5-10: Versuchsprogramm zur Quantifizierung der eingedrungenen Zementleimmenge

Bez.	Variante ¹⁾	Anzahl	Dämmstoff	Frischbeton				
			Porendurchmesser ²⁾	Rezeptur ³⁾	Wasser [kg]	Zement [kg]	w/z [-]	
F01	A	3	4,26 mm (O) "groß"	1	184,5	450,0	0,41	
	B							
F02	A	3		2				
	B							
F03	A	3		3				
	B							
F04	A	3		4				
	B							
F05	A	3		3,62 mm (N) "mittel"		1	450,0	0,41
	B							
F06	A	3				2		
	B							
F07	A	3	3					
	B							
F08	A	3	4					
	B							
F09	A	3	2,11 mm (M) "klein"		1	450,0	0,41	
	B							
F10	A	3			2			
	B							
F11	A	3		3				
	B							
F12	A	3		4				
	B							

1) Varianten nach Tab. 5-2

2) Die verwendeten Dämmstoffe werden in Tab. 4-5 aufgeführt

3) Betonrezepturen siehe Tab. F 5

5.3.3 Ergebnisse und Auswertung

Die im Versuch ermittelten Massen für Wasser und Zement beziehen sich immer auf eine Dämmstofffläche von 15 x 15 cm, welche aus dem Versuchsaufbau resultiert (siehe Abb. 5-1). Zur besseren Übersichtlichkeit und zur Weiterverwendung der Ergebnisse zur Entwicklung eines Modells werden diese im Folgenden auf 1 m² Dämmstofffläche umgerechnet und dargestellt.

Die Zusammenfassung aller im Versuch ermittelten Massen, den daraus errechneten Wasser- und Zementmengen sowie den gemessenen Betonierhöhen und Ausbreitmaßen ist in Tab. E 1 und Tab. E 2 in Anhang E zu finden. Zur Ergebnisdarstellung und Auswertung in den nachfolgenden Unterkapiteln wird das Bezeichnungsschema gemäß Tab. 5-11 verwendet.

Tab. 5-11: Bezeichnungsschema für die Ergebnisdarstellung der Zementleimquantifizierung

- X	Dämmstoff O ($d_{pm} = 4,26$ mm)	Einzelwerte
▲ ●		Mittelwerte
- X	Dämmstoff N ($d_{pm} = 3,62$ mm)	Einzelwerte
▲ ●		Mittelwerte
- X	Dämmstoff M ($d_{pm} = 2,11$ mm)	Einzelwerte
▲ ●		Mittelwerte

5.3.3.1 Wassermenge im Dämmstoff (Variante A und Variante B)

Nachfolgende Abb. 5-13 zeigt die in den Dämmstoff eingedrungenen Wassermengen unmittelbar nach dem Versuch (Variante A) und nach Hydratation des Ortbetons (Variante B). Da für beide Varianten und jede Versuchsnummer je drei Versuche durchgeführt werden, sind die Einzelwerte (- oder x) und die zugehörigen Mittelwerte (Δ oder O) dargestellt. Für jeden der drei untersuchten Dämmstoffe ist der lineare Trend der eingedrungenen Wassermenge in Abhängigkeit des w/z-Wertes abgebildet.

Die Ergebnisse bestätigen, dass bei ansteigendem w/z-Wert die eingedrungene Wassermenge unmittelbar nach dem Versuch (Variante A) linear ansteigt. Bei kleiner werdendem mittlerem Porendurchmesser des Dämmstoffs und gleichem w/z-Wert erhöht sich die Wassermenge m_{WA} ebenfalls. Maximal dringen bei einem w/z-Wert von 0,65 in Dämmstoff M ca. 1250 g/m² ein. Beim Vergleich mit der im Dämmstoff verbleibenden Wassermenge m_{WB} nach drei Tagen ist für alle Versuchskörper wie erwartet eine deutliche Reduktion der Wassermenge zwischen 76 und 94 % zu verzeichnen, sodass die maximale noch im Dämmstoff verbleibende Wassermenge ca. 275 g/m² beträgt (Dämmstoff M). Dies würde einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von ca. 1 % entsprechen (siehe Kapitel 4.3.3). Bei den beiden Dämmstoffen N und O verbleiben maximal 170 g/m² Wasser im Dämmstoff.

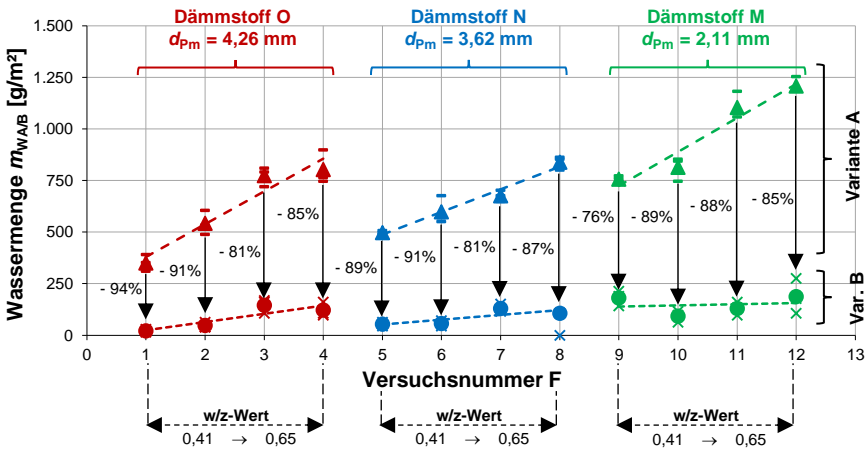


Abb. 5-13: Eindrungene Wassermenge m_{WA} unmittelbar nach dem Versuch (Variante A) und verbleibende Wassermenge m_{WB} nach Hydratation des Ortbetons (Variante B)

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl der Porendurchmesser als auch der w/z-Wert einen nahezu linearen Zusammenhang mit der eingedrungenen Wassermenge eingehen. Mit dieser Information lassen sich Ebenengleichungen erstellen, die die Errechnung der eingedrungenen Wassermenge m_{WA} und der verbleibenden Wassermenge m_{WB} für beliebige Porendurchmesser und w/z-Werte ermöglichen (siehe Gleichung (5-4) und (5-5)). Die Gleichungen sind für mittlere Porendurchmesser des Dämmstoffs zwischen 2 und 6 mm und w/z-Werte des Frischbetons zwischen 0,4 und 0,7 anwendbar.

5.3 Quantifizierung der eingedrungenen Zementleimmenge (F)

$$m_{WA} \left(\frac{W}{Z}, d_{Pm} \right) = 248,6 + 1985,6 \cdot \frac{W}{Z} - 160,5 \cdot d_{Pm} \geq 0 \quad (5-4)$$

$$m_{WB} \left(\frac{W}{Z}, d_{Pm} \right) = 48,6 + 497,8 \cdot \frac{W}{Z} - 53,7 \cdot d_{Pm} \geq 0 \quad (5-5)$$

Die nachfolgend dargestellten Abb. 5-14 und Abb. 5-15 visualisieren die abgeleiteten Ebenengleichungen.

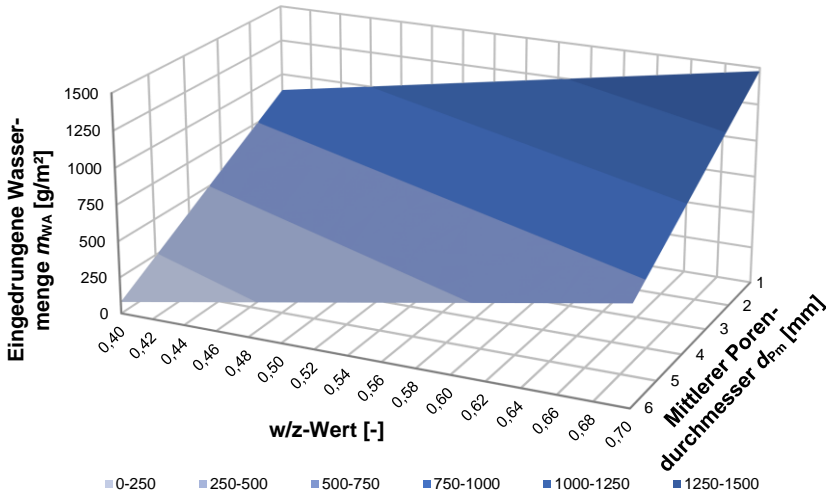


Abb. 5-14: Grafische Darstellung der Ebenengleichung zur Berechnung der in den Dämmstoff eingedrungenen Wassermenge m_{WA} (Variante A)

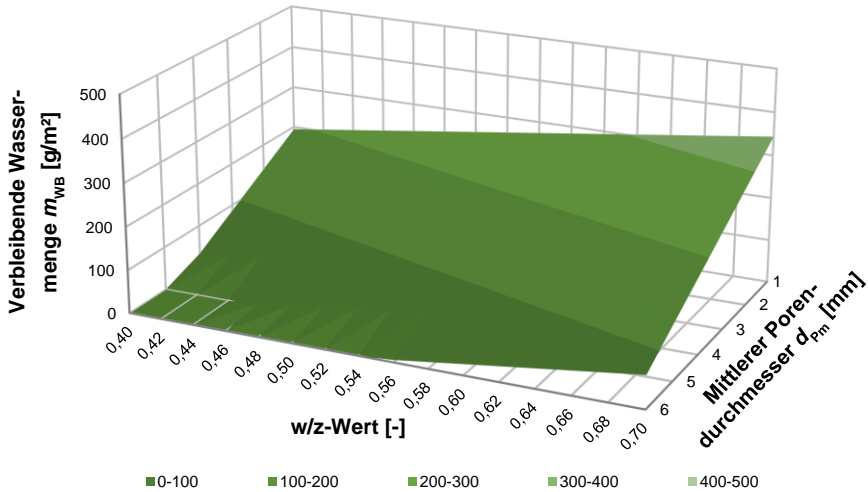


Abb. 5-15: Grafische Darstellung der Ebenengleichung zur Berechnung der im Dämmstoff verbleibenden Wassermenge m_{WB} (Variante B)

5.3.3.2 Zementmenge im Dämmstoff

Neben der Wassermenge wird auch die Zementmenge im Dämmstoff ermittelt. Abb. 5-16 zeigt für alle 12 Versuchskombination die sechs Einzelmesswerte (Variante A und Variante B) sowie den zugehörigen Mittelwert. Es ist die gleiche Tendenz wie bei der Wassermenge zu erkennen. Bei steigendem w/z-Wert und kleiner werdendem Porendurchmesser steigt die eingedrungene Zementmenge nahezu linear an. Bei einem w/z-Wert von 0,65 erhöht sich die mittlere Zementmenge von 196 g/m² für Dämmstoff O auf 261 g/m² für Dämmstoff N und bis zu 333 g/m² für Dämmstoff M.

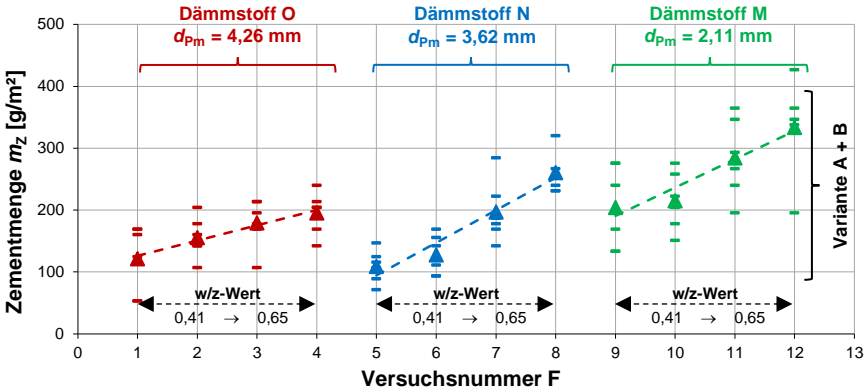


Abb. 5-16: Eindrungene Zementmengen m_z aus Variante A und Variante B

Für die Errechnung der im Dämmstoff eingedrungenen Zementmenge m_z für beliebige Porendurchmesser und w/z-Werte ergibt sich folgende Ebenengleichung:

$$m_z \left(\frac{w}{z}, d_{Pm} \right) = 20,5 + 570,4 \cdot \frac{w}{z} - 30,1 \cdot d_{Pm} \geq 0 \tag{5-6}$$

Die Gleichung ist für mittlere Porendurchmesser zwischen 2 und 6 mm und w/z-Werte zwischen 0,4 und 0,7 anwendbar. Auf die Herleitung der Gleichung wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Abb. 5-17 zeigt die grafische Darstellung der abgeleiteten Ebenengleichung.

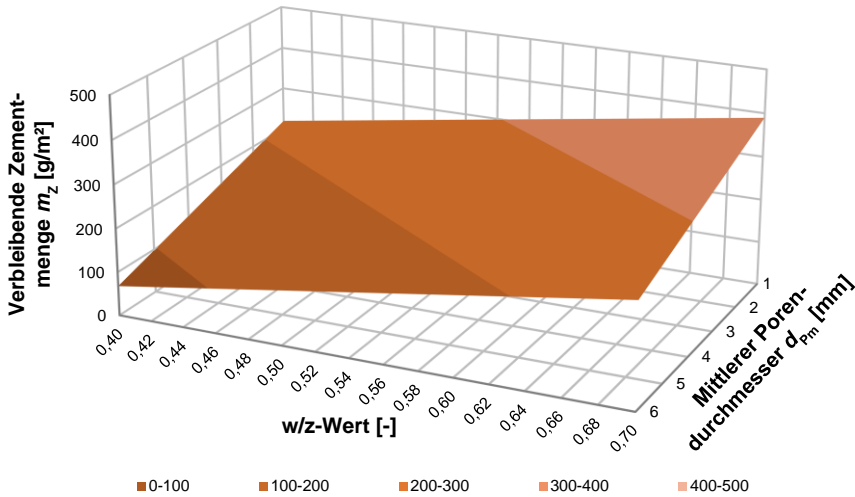


Abb. 5-17: Grafische Darstellung der Ebenengleichung zur Berechnung der im Dämmstoff verbleibenden Zementmenge m_z (Variante A und Variante B)

5.3.3.3 Druckfestigkeit des Ortbetons

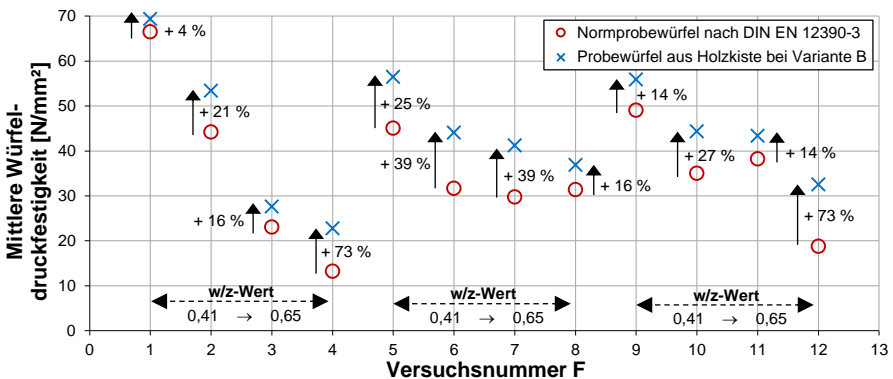


Abb. 5-18: Druckfestigkeitserhöhung durch den Entzug von Zementleim aus dem Frischbeton

Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass der Entzug von Zementleim und die Hydratation des Ortbetons in Kontakt mit dem Dämmstoff eine Druckfestigkeitssteigerung mit sich bringt. In Abb. 5-18 sind für jede Versuchskombination die Mittelwerte der Betondruckfestigkeit der drei Probewürfel aus Variante A (Normprobewürfel) und Variante B (Erhärtung in Kontakt mit dem Dämmstoff) dargestellt.

Tab. 5-12: Druckfestigkeitszuwächse des Ortbetons infolge Aushärtung neben einem Dämmstoff im Vergleich zum Normprobewürfel nach DIN EN 12390-3

Versuchsnummer	w/z [-]	Mittelwert Druckfestigkeit [N/mm ²]		Charakteristische Druckfestigkeit [N/mm ²]		Druckfestigkeitszuwachs [%]	
		Normprobewürfel Var. A	Probewürfel Variante B	Normprobewürfel Var. A	Probewürfel Variante B	Mittelwert	Charakt. Wert
F01	0,41	66,5	69,4	63,1	59,6	4,4	-5,5
F05		45,1	56,5	41,0	47,1	25,3	14,9
F09		49,1	56,0	20,6	24,4	14,0	18,4
F02	0,49	44,2	53,4	6,7	18,3	20,9	173,3
F06		31,7	44,8	35,4	48,5	39,2	37,1
F10		35,0	44,4	26,6	42,0	26,7	57,8
F03	0,57	23,8	27,7	25,5	38,4	16,3	50,8
F07		29,8	41,3	19,6	33,7	38,6	71,7
F11		38,2	43,4	38,3	46,3	13,5	21,1
F04	0,65	13,2	22,8	28,6	34,5	72,7	20,7
F08		31,7	36,9	35,9	41,0	16,5	14,2
F12		18,8	32,6	13,2	23,4	73,3	77,9

Bei allen untersuchten Dämmstoffen und w/z-Werten ist eine Druckfestigkeitssteigerung zu beobachten. Tendenziell kann festgestellt werden, dass bei niederfesten Betonen bzw. bei höherem w/z-Wert ein größerer Zuwachs der Druckfestigkeit auftritt. Stellt man die prozentualen Druckfestigkeitszuwächse für die untersuchten w/z-Werte bzw. in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit der Normprobewürfel nach DIN EN 12390-3 dar, so kann dies bestätigt werden (siehe Abb. 5-19). Um eine Annahme für die Bemessung zu treffen, ist der Bezug zum w/z-Wert nicht sinnvoll, da die Druckfestigkeit auch von der Zementart oder der Gesteinskörnung abhängig ist.

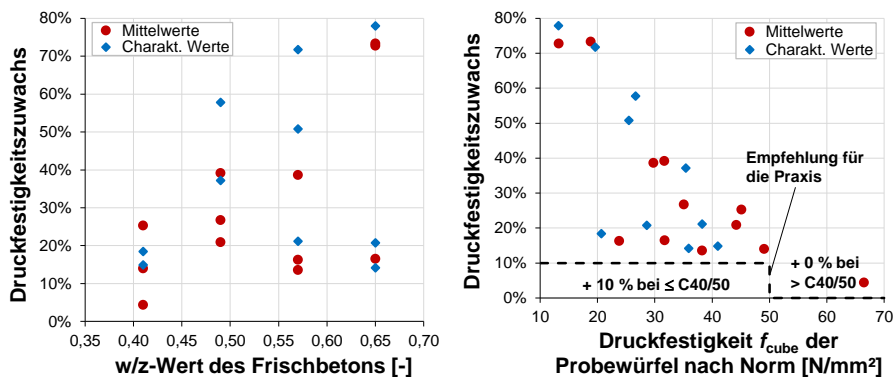


Abb. 5-19: Druckfestigkeitserhöhung des Ortbetons in Abhängigkeit des w/z-Wertes (links) und in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit der Normprobewürfel (rechts)

Deshalb ist es sinnvoll, die Druckzuwächse in Abhängigkeit der charakteristischen Druckfestigkeit festzulegen. In Abb. 5-19 (rechts) ist die Empfehlung für die Praxis grafisch dargestellt. Bei Betonen der Betondruckfestigkeitsklasse C40/50 oder niedriger kann für die Bemessung des Ortbetons eine 10 %-ige Erhöhung der charakteristischen Betondruckfestigkeit angesetzt werden. Ist bereits eine höhere Betondruckfestigkeitsklasse als C40/50 vorhanden, so wird keine Erhöhung empfohlen. Die ermittelten Druckfestigkeitszuwächse korrelieren mit denen aus der Sensitivitätsanalyse.

5.3.4 Fazit

Die Versuchsergebnisse zur Zementleimaufnahme korrelieren mit der Porenstruktur von Dämmstoffen aus EPS. In Kapitel 4 wurde bereits erläutert, dass die Form der Dämmstoffporen, je nach Stärke der Expansion bei der Herstellung, sehr unterschiedlich sein kann. So entstehen bei hohen Rohdichten nahezu kugelförmige, kleine Poren und bei niedrigen Rohdichten große Poren, die eher Polyedern (Dodekaeder) gleichen. Das daraus resultierende große Zwickelvolumen bei kleinen Dämmstoffporen führt zu einer leichten Zementleimaufnahme. Sogar ohne Verdichtung des Frischbetons dringen schon hohe Wasser- und Zementmengen in den Dämmstoff ein (siehe Abb. 5-7). Bei großen Poren liegt ein sehr kleines Zwickelvolumen im Dämmstoff vor. Die Zementpartikel verstopfen dieses und verhindern so ein übermäßiges Eindringen von Wasser und Zement.

Aus einer im Dämmstoff verbleibenden Wasser- und Zementmenge resultiert eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, welche berücksichtigt werden muss (siehe Kapitel 5.4.3). Zudem konnte gezeigt werden, dass der Entzug von Zementleim einen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit des Ortbetons hat. Bei allen Versuchen konnte eine Erhöhung der Druckfestigkeit verzeichnet werden.

5.4 Zusammenfassung

Die Einflüsse der Zementleimaufnahme des Dämmstoffs können in die drei Bereiche

- Frischbetondruck,
- Ortbeton und
- Dämmstoff

unterteilt werden.

5.4.1 Beeinflussung des Frischbetondrucks

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Zementleimaufnahme von Dämmstoffen aus EPS zu einer Reduktion des Frischbetondrucks führt (siehe Kapitel 3). Ein wesentliches Ergebnis dieses Kapitels sind empirisch abgeleitete Ebenengleichungen ((5-4) und (5-5)), welche die während des Betoniervorgangs der Ortbetonergänzung in den Dämmstoff eingedrungene Wasser- und Zementmenge in Abhängigkeit von w/z-Wert und Porendurchmesser bestimmen. Ein Entzug von Wasser und Zement aus dem frischen Ortbeton führt zu einer Reduktion des Ausbreitmaßes und damit zu einer steiferen Frischbetonkonsistenz. Somit wird auch der ursprüngliche Seitendruckbeiwert λ_0 des Frischbetons auf den Wert $\lambda_{0,red}$ reduziert, was eine rechnerische Verringerung des Frischbetondrucks zur Folge hat. Wie hoch der Einfluss auf den Seitendruckbeiwert ist, hängt von der Rezeptur des Frischbetons und dessen ursprünglicher Konsistenz ab. Der Algorithmus zur Errechnung des reduzierten Seitendruckbeiwerts $\lambda_{0,red}$ wird im Rahmen der Entwicklung des Modells zur Berechnung des Frischbetondrucks in Kapitel 7 ausführlich erläutert.

5.4.2 Beeinflussung des Ortbetons

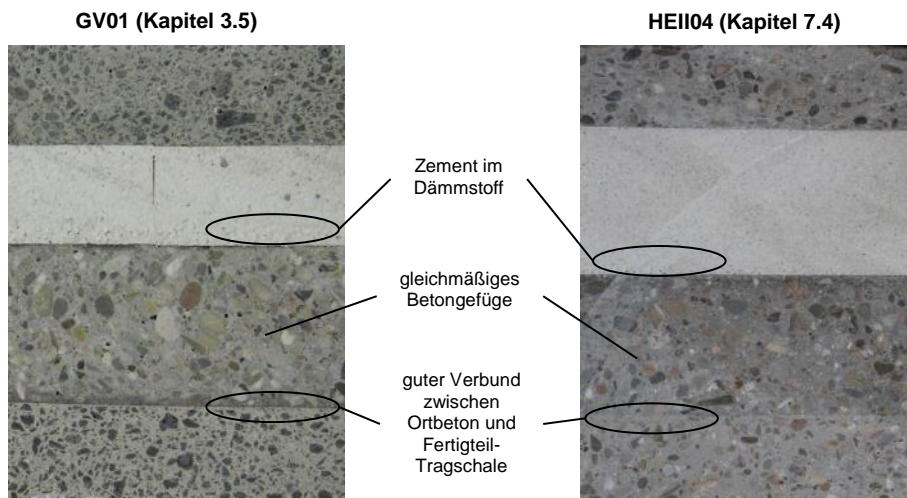


Abb. 5-20: Schnitt durch zwei Elementwände nach Verfüllung der Ortbetonergänzung

Bei der Umlagerung von Teilen des Zementleims in den Dämmstoff ändern sich die Frischbetoneigenschaften, die auch zur Beeinflussung der Festbetoneigenschaften führen. Um visuell erkennbare Schädigungen des Ortbetons sichtbar zu machen, werden alle Elementwände aus den experimentellen Untersuchungen in den Kapiteln 3.5, 3.6 und 7.3 nach Erhärtung des Ortbetons durchtrennt. Bei keinem der Versuchskörper konnte ein geschädigter Bereich des Ortbetons in der Nähe des Dämmstoffs beobachtet werden (siehe Abb. 5-20). Über die gesamte Dicke der Ortbetonergänzung sind immer eine gleichmäßige Verteilung der Zuschlagskörner und ein guter Verbund zwischen Ortbeton und Fertigteil-Tragschale zu erkennen.

In Kapitel 5.3 fand eine umfangreiche Untersuchung der Druckfestigkeitsänderung des Ortbetons infolge der Zementleimaufnahme des Dämmstoffs statt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass in jedem Fall eine Erhöhung der Druckfestigkeit stattfindet. Hierfür können zum aktuellen Wissensstand drei Gründe genannt werden:

- Der Entzug von Zementleim reduziert den w/z-Wert der Betonmischung und führt demzufolge zu einer höheren Druckfestigkeit.
- Das in den Dämmstoff eingedrungene Wasser hat bei der Hydratation des Ortbetons einen positiven Effekt, da es eine nachbehandelnde Wirkung erzielt. Die Reduktion der Wassermenge im Dämmstoff während der Hydratation des Ortbetons konnte im Rahmen der Versuche bestätigt werden.
- Die Normprobewürfel (Variante A) werden mithilfe eines Rütteltischs verdichtet. Die Probewürfel nach Variante B befinden sich am Fußpunkt des Versuchsaufbaus (siehe Abb. 5-1) und erfahren somit unter Umständen eine bessere Verdichtung, da der Beton unter Druck der darüber liegenden Betonsäule verdichtet wird.

Wie hoch der Einfluss der aufgeführten Gründe ist, kann an dieser Stelle nicht angegeben werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff durch den Entzug von Zementleim die Druckfestigkeit des Ortbetons über die gesamte Wandhöhe erhöht wird. Die Empfehlung zur Berücksichtigung einer veränderten Druckfestigkeit des Ortbetons in der Bemessung wird in Kapitel 8.3 gegeben.

5.4.3 Beeinflussung des Dämmstoffs

Neben den Auswirkungen der Zementleimaufnahme auf den Frischbetondruck und den Ortbeton, hat diese auch einen Einfluss auf die wärmeleitende Eigenschaft des Dämmstoffs. Sowohl Wasser als auch Zement besitzen eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der Dämmstoff selbst, was je nach prozentualem Anteil die Wärmeleitfähigkeit und damit den Wärmedurchlasskoeffizient stark erhöhen kann. Die Ergebnisse der zuvor aufgeführten Untersuchungen sind Ebenengleichungen ((5-5) und (5-6)), welche die im Dämmstoff verbleibende Wasser- und Zementmenge bestimmen. Bei der Wassermenge handelt es sich um die Menge, die sich nach drei Tagen noch im Dämmstoff befindet. Für einen konservativen Ansatz wird angenommen, dass diese Wassermenge für die gesamte Nutzungsdauer des Bauteils in dem Dämmstoff verbleibt.

5.4.3.1 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts

Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen infolge eines Feuchteintrags wurde bereits in Kapitel 4.3.3 behandelt. Bei Polystyrol-Hartschaum ergibt sich nach *Fischer u. a. 2008* eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von ca. 3,6 % pro 1 % volumenbezogenem Feuchtegehalt.

5.4.3.2 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Zementgehalts

Die Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs durch Zement wurde bisher nicht behandelt. Deshalb werden Untersuchungen mit einem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät (Modell: TAURUS instruments TLP 500 - GX1) durchgeführt (siehe Abb. 5-21 links).

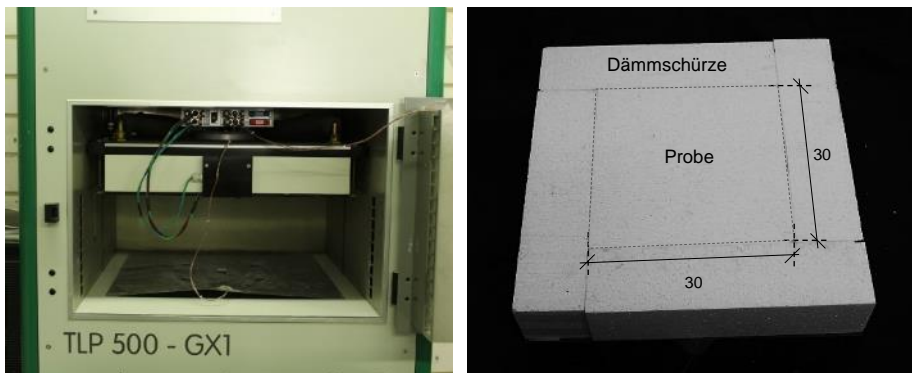


Abb. 5-21: Plattenprüfgerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen (links) und Dämmstoffprobe mit Dämmschürze (rechts)

Im ersten Schritt wird von drei verschiedenen Dämmstoffen (Dämmstoffe M, N und O aus Tab. 4-5) die Wärmeleitfähigkeit ohne den Einfluss von eingedrungenem Zement in Anlehnung an *DIN EN 12667* bestimmt. Die Dämmstoffproben werden nach Vorgaben der Prüfeinrichtung auf die Abmessungen 30 x 30 cm zugeschnitten und von einer Dämmschürze umhüllt, um seitliche Wärmeverluste während der Messung und damit Messtoleranzen zu minimieren. Die Liefer- und Prüfdicke des Dämmstoffs beträgt bei allen Proben 10 cm.

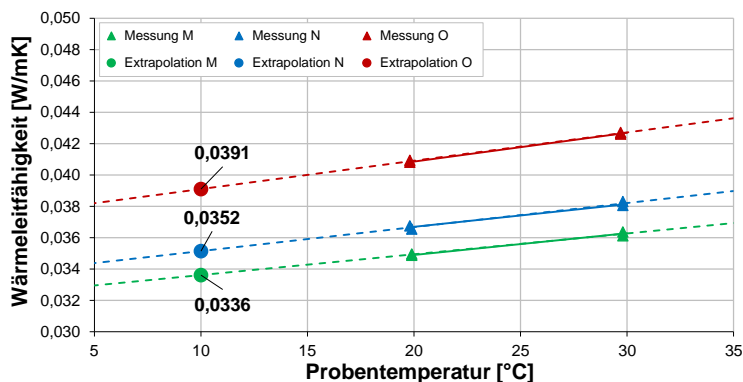


Abb. 5-22: Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit bei einer Probentemperatur von 20°C und 30°C sowie Extrapolation der Wärmeleitfähigkeit für 10°C

Mithilfe des Wärmeleitfähigkeitsmessgeräts wird von jeweils zwei Proben der Dämmstoffe M, N und O die Wärmeleitfähigkeit bei einer Probentemperatur von 10, 20 und 30°C bestimmt. Abb. 5-22 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf der Wärmeleitfähigkeit. Bei den Messwerten bei 20 und 30°C handelt es sich jeweils um den Mittelwert von zwei Proben (M1 und M2, N1 und N2, O1 und O2). Da es Schwierigkeiten bei der Messung bei 10°C gab, wurde die zugehörige Wärmeleitfähigkeit unter Annahme eines linearen Verlaufs (*Fischer u. a. 2008*) extrapoliert. Die Temperatur von 10°C stellt die geforderte Bezugstemperatur nach *DIN EN 13163* dar. Die Ergebnisse bestätigen den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei abnehmender Rohdichte des Dämmstoffs (siehe Abb. 4-13) und bei zunehmender Probentemperatur (siehe Abb. 4-14). Es ergibt sich eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,4 % je 1 K, was mit den Angaben in *Fischer u. a. 2008* korreliert.

Im Anschluss werden die Dämmstoffe in Anlehnung an die Versuche in Kapitel 5.2 und 5.3 mit Frischbeton in Kontakt gebracht, um ein Eindringen von Zementleim zu verursachen. Damit für jeden Dämmstoff zwei unterschiedliche Zementgehalte untersucht werden können, wird jeweils bei der Probe 1 (z. B. M1) für 5 Sekunden und bei der Probe 2 (z. B. M2) für 60 Sekunden verdichtet und somit die Einwirkdauer des Frischbetondrucks reguliert.

Es ist zu beachten, dass sich die gemessene Wärmeleitfähigkeit auf einen Dämmstoff bezieht, bei dem sich nur in dem zur Frischbetondruckbeanspruchung zugewandten Bereich Zement befindet (siehe Abb. 5-24). Für alle weiteren Betrachtungen wird deshalb die Zementmenge als über die Dämmstoffdicke verschmiert und gleichmäßig verteilt angenommen.

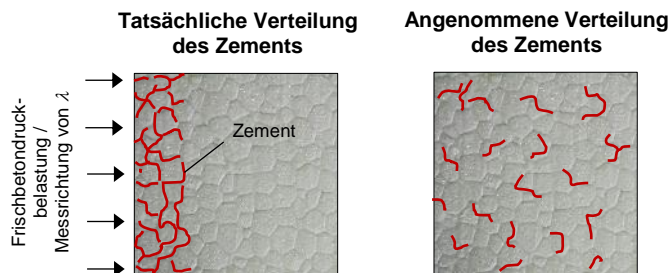


Abb. 5-24: Tatsächliche und angenommene Verteilung des Zements

5.4.3.3 Erhöhter Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit

Durch Kombination der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit infolge verbleibendem Wasser und Zement kann unter Berücksichtigung der Dämmstoffdicke ein erhöhter Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_z des Dämmstoffs und gleichzeitig ein Korrekturfaktor k_{zW} errechnet werden. Eine Empfehlung zur Berücksichtigung einer veränderten Wärmeleitfähigkeit in der Bemessung wird in Kapitel 8.4 gegeben.

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

Die Untersuchungen zur Identifizierung der maßgebenden Einflussparameter in Kapitel 3 haben gezeigt, dass die dynamische Tiefenwirkung der Rüttelflasche in Abhängigkeit der Schalungsflächen der Elementwand (Beton und Dämmstoff) einen maßgeblichen Einfluss auf den Frischbetondruck haben. Da Elementwände mit integriertem Dämmstoff in der Praxis mit Innenrüttlern verdichtet werden, sind andere Rüttelmechaniken (z. B. Außenrüttler) nicht Gegenstand der weiteren Betrachtungen.

Zuerst wird die Verdichtung von Frischbeton mit Innenrüttlern in der Praxis erläutert (Kapitel 6.1). Anschließend werden theoretische Grundlagen zur Übertragung von Rüttelschwingungen in Frischbeton erarbeitet (Kapitel 6.2) und auf Besonderheiten bei der Schwingungsübertragung im System „Elementwand mit integriertem Dämmstoff“ eingegangen (Kapitel 6.3). Danach werden praktische Untersuchungen durchgeführt, um relevante Größen zur Entwicklung eines realitätsnahen Frischbetondruckmodells zu ermitteln (Kapitel 6.4). Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst (Kapitel 6.5).

6.1 Verdichtung von Frischbeton mit Innenrüttlern

Um bei einem Betonbauteil die geforderten Festbetoneigenschaften und gute Verbundbedingungen zwischen Beton und Bewehrung zu erreichen, ist eine einwandfreie Verdichtung des Frischbetons notwendig (Bauer 1994). Ziel der Verdichtung ist es, eine möglichst dichte Packung des Betongefüges durch Umordnung der Zuschlagskörner und Verdrängung der Luftblasen zu erreichen. Der Luftporengehalt eines Festbetons soll minimal sein, da dieser einen reduzierenden Einfluss auf die Druck- und Zugfestigkeit hat (siehe Abb. 6-1). Zusätzlich wird durch den Luftporengehalt die Frostbeständigkeit des Betons gesteuert. Die Verdichtung des Frischbetons ist neben der Zusammensetzung und der Nachbehandlung der wichtigste Vorgang bei der Herstellung von Betonbauteilen (Beton 2013).

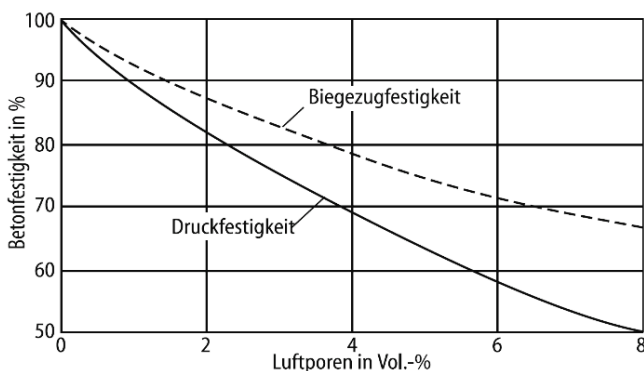


Abb. 6-1: Einfluss des Luftporengehalts auf die Festigkeit (Zilch u. a. 2011)

Durch das Einleiten von Vibrationen bei der Verdichtung wird der Frischbeton verflüssigt, da die innere Reibung bzw. die aufnehmbare Scherspannung im

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungs Vorgang

Frischbeton auf ein sehr niedriges Niveau herabgesetzt wird. Während des Verdichtungsprozesses findet durch die dynamische Belastung des Frischbetons eine Umordnung des Betongefüges statt. Aus einem instabilen Gefüge entsteht so ein stabiles Gefüge. Der größte Teil der im Frischbeton eingeschlossenen Luft kann bereits in den ersten Sekunden der Verdichtung entweichen, wodurch ein schnelles Absinken des Betonspiegels zu beobachten ist.

Bei einem frühzeitigen Beenden des Verdichtungs Vorgangs besteht die Gefahr einer unzureichenden Entlüftung des Frischbetons. Bei zu langer Verdichtungszeit erhöht sich das Risiko der Entmischung. Da sich der Frischbeton bei der Verdichtung wie eine Flüssigkeit verhält, kommt es zu einer dichteabhängigen Verschiebung der Bestandteile. Schwere Zuschläge sinken zum Boden und der leichte Zementleim, insbesondere das Wasser, steigt an die Oberfläche. Letzteres führt zu einer negativen Beeinflussung der Frostbeständigkeit. Im Idealfall sollte der Beton nach der Verdichtung einen Luftporengehalt von 1 bis 2 % aufweisen (Schwabe 2002, DIN 4235-2).

Es gibt drei Einflussparameter auf die Betonverdichtung. Hierzu gehört zum einen die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, die vor allem durch dessen Konsistenz gesteuert wird. Die Konsistenz ist unmittelbar von der Betonrezeptur (w/z-Wert, Zementart, Zuschläge, Zusatzmittel und -stoffe) abhängig. Zum anderen kommt es auf die Ausbildung von Schalung und Bewehrung an. Das Größtkorn des Frischbetons und lichte Abstände in der Schalung müssen aufeinander abgestimmt sein. Letzter Einflussfaktor ist die Art der Verdichtung, die sich stringent nach der Konsistenz des Frischbetons richtet (siehe Abb. 6-2). Aufgrund des breiten Anwendungsbereiches hat sich im Betonbau als maßgebendes und hauptsächlich verwendetes Verfahren das Rütteln etabliert. Hier wird zwischen Innenrüttlern und Außenrüttlern unterschieden. Diese Arbeit behandelt die Untersuchung des Frischbetondrucks in Elementwänden. Da deren Ortbetonergänzung in der Praxis fast ausschließlich mit Innenrüttlern verdichtet wird, werden andere Verdichtungsarten nicht weiter berücksichtigt.







F1	F2	F3	F4	F5	F6	SVB
Stampfen	starkes Verdichten	normales Verdichten	wenig Verdichten	leichtes Verdichten (Stochern, Klopfen)	leichtes Verdichten (Schwabbeln)	kein Verdichten
						
Verdichtungsaufwand						

Abb. 6-2: Verdichtungsaufwand in Abhängigkeit der Konsistenz des Betons (Beton 2013)

Zur Sicherstellung gleicher Betoneigenschaften über die Bauteilhöhe, findet die Betonage von Wandbauteilen lagenweise statt. Nach Einbringen und Verdichten einer Betonlage mit einer Höhe von maximal 50 cm (siehe DIN 4235-2) wird die nächste Lage mit vergleichbarer Höhe in die Schalung eingebracht. Der Innenrüttler sollte rasch in den Frischbeton bis in die tiefere, bereits verdichtete Lage eingetaucht werden

6.2 Theoretische Grundlagen zur Übertragung von Rüttelschwingungen in Frischbeton

(mindestens 10 bis 15 cm Überschneidung). Hierdurch wird eine optimale Verbindung der Lagen gewährleistet. Nach ausreichender Verdichtung wird der Rüttler wieder langsam heraus gezogen, damit der Beton nachfließen kann und keine Hohlräume im Frischbeton entstehen. Bei der Verdichtung sollte darauf geachtet werden, dass sich bei den gewählten Eintauchstellen des Rüttlers auch eine horizontale Überlappung der Wirkungsbereiche der Rüttelschwingungen ergibt (siehe Abb. 6-3).

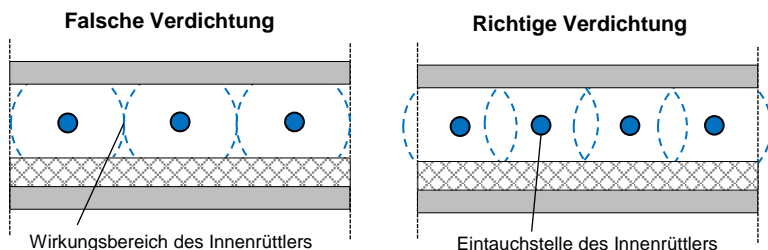


Abb. 6-3: Wirkungsbereiche eines Innenrüttlers

Wie groß der Wirkungsbereich beim Verdichten ist, hängt von den mechanischen Eigenschaften des Innenrüttlers und des Frischbetons ab. Nach *DIN 4235-1* können Innenrüttler in drei Gruppen eingeteilt werden, die abhängig von Durchmesser, Gewicht, Schwingfrequenz und Fliehkraft des Rüttlers sind. Je nach Rüttlergruppe werden unterschiedliche Durchmesser des Wirkungsbereichs und Abstände der Eintauchstellen angegeben (siehe Tab. 6-1). Als Faustregel kann in der Praxis für den Abstand der Eintauchstellen der 10-fache Durchmesser des Innenrüttlers gewählt werden (*Bauer 1994, Forssblad 1965*). Die Theorie zur Errechnung des Wirkungsbereichs eines Innenrüttlers wird in Kapitel 6.2 behandelt.

Tab. 6-1: Richtwerte für den Durchmesser des Wirkungsbereichs und den Abstand der Eintauchstellen (in Anlehnung an *DIN 4235-1*)

Rüttlergruppe	Durchmesser des Innenrüttlers [mm]	Durchmesser des Wirkungsbereichs [cm]	Abstand der Eintauchstellen [cm]
1	< 40	30	25
2	40 bis 60	50	40
3	> 60	80	70

Die Verdichtung des Betons ist abgeschlossen, wenn sich der Frischbeton nicht mehr setzt, keine großen Luftblasen mehr an die Oberfläche aufsteigen und sich das Geräusch des Innenrüttlers nicht mehr verändert. Außerdem sollte eine mit Feinmörtel geschlossene Oberfläche sichtbar sein (*DIN 4235-2*).

6.2 Theoretische Grundlagen zur Übertragung von Rüttelschwingungen in Frischbeton

6.2.1 Rüttelgeräte und Rüttelmechanik

Innenrüttler zur Verdichtung von Frischbeton bestehen aus einem Gehäuse, in dem sich eine exzentrisch angeordnete Schwungmasse (Unwucht) befindet. Bei Rotation

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

der Unwucht wird der Rüttler in mechanische Schwingungen versetzt, welche auf den Frischbeton übertragen werden. Die Schwingung entspricht einer harmonischen Kreisschwingung mit der Frequenz f und der Schwingungsamplitude s (siehe Abb. 6-4).

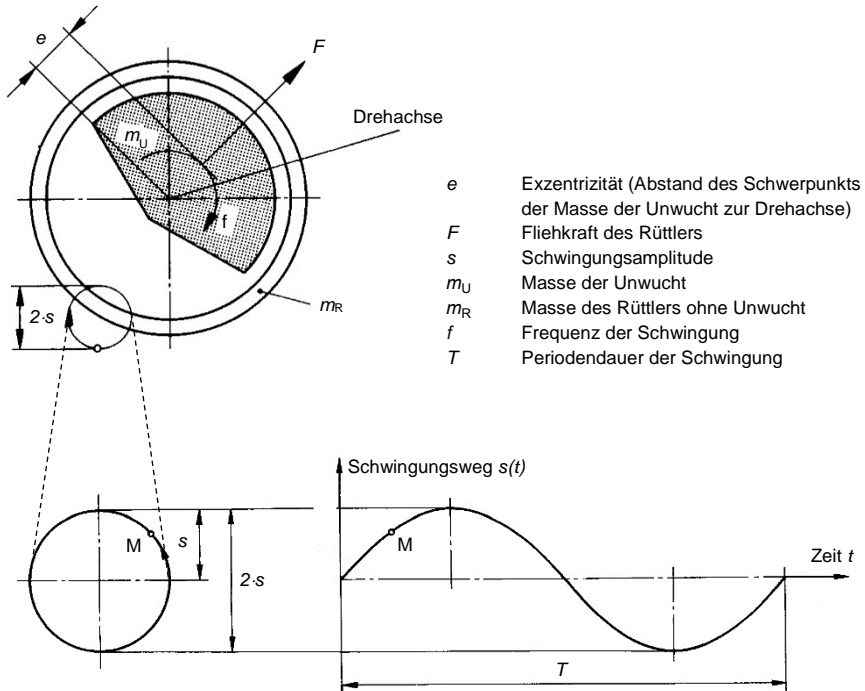


Abb. 6-4: Querschnitt durch einen Innenrüttler und Erzeugung einer harmonischen Kreisschwingung (in Anlehnung an DIN 4235-1)

Für die Verdichtung ist die auf den Frischbeton wirkende Beschleunigung a die maßgebende Größe. Diese berechnet sich zu:

$$a = s \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \quad (6-1)$$

Nach DIN 4235-1 sollten folgende Kennwerte eines Innenrüttlers nicht unterschritten werden:

- Beschleunigung a 30 m/s²
- Schwingungsamplitude s 0,05 mm
- Frequenz f 50 Hz

6.2 Theoretische Grundlagen zur Übertragung von Rüttelschwingungen in Frischbeton

Die vom Rüttler verursachte Fliehkraft F kann aus dem Produkt aus der Masse des Rüttlers und der Beschleunigung gebildet werden:

$$F = s \cdot (m_U + m_R) \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 = e \cdot m_U \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \quad (6-2)$$

Ein Innenrüttler kann entweder elektrisch oder mit Druckluft angetrieben werden. Für die Berechnung der Fliehkraft und Beschleunigung macht dies jedoch keinen Unterschied. Eine Größe zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit ist das Produkt aus der Masse der Unwucht und dessen Exzentrizität, der sog. m·r-Wert.

$$\text{m} \cdot \text{r-Wert} = e \cdot m_U = s \cdot (m_U + m_R) \quad (6-3)$$

Je höher der m·r-Wert eines Rüttlers ist, desto höher ist dessen Verdichtungswirkung.

6.2.2 Ausbreitung mechanischer Wellen im Frischbeton

Beim Einführen eines Innenrüttlers in Frischbeton findet eine Schwingungsübertragung vom Rüttler in den Beton (siehe Abb. 6-5 A) und eine anschließende räumliche Weiterleitung der Schwingungen im Frischbeton in Form von Wellen (siehe Abb. 6-5 B) statt. Sowohl im Bereich A (Schnittstelle zwischen Rüttler und Frischbeton), als auch im Bereich B (Frischbeton) werden die von dem Rüttler erzeugten mechanischen Schwingungen gedämpft.

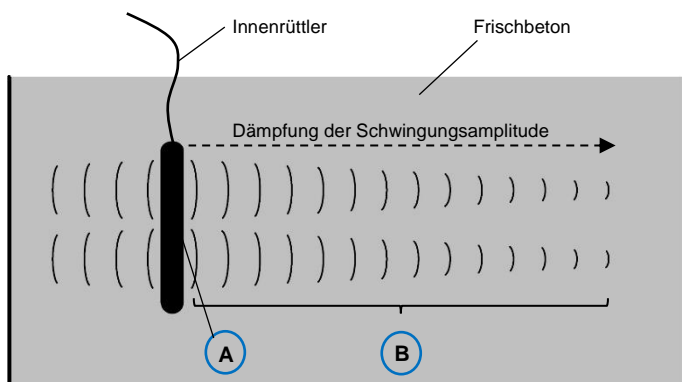


Abb. 6-5: Ausbreitung mechanischer Wellen im Frischbeton

Bereich A

Die von einem Innenrüttler induzierten Schwingungen müssen zuerst vom Gehäuse des Rüttlers auf den Frischbeton übertragen werden. Durch die Inhomogenität von Frischbeton und das Aufsteigen von Luftblasen während des Verdichtungs Vorgangs entsteht ein Übergangswiderstand, weshalb die Schwingungsamplitude des Rüttlers nicht der Schwingungsamplitude im angrenzenden Frischbeton entspricht. Nach

ACI 309.1R beträgt die Amplitude im Frischbeton zwischen 70 und 75 % von der in Luft. Auch Soutsos u. a. 1999 konnten im Rahmen eigener Untersuchungen eine Reduktion der Amplitude auf ca. 78 % feststellen. Generell ist das Bewegungsverhalten eines Innenrüttlers von den Eigenschaften des Rüttlers und den Materialkennwerten der erregten Masse abhängig (Jurecka 1968).

Bereich B

Die in den Frischbeton eingetragenen Rüttelschwingungen reduzieren sich mit zunehmendem Abstand zum Rüttler. Grund hierfür ist die innere Reibung im Frischbeton und die damit einhergehende Energieabsorption. Die Größe des Absorptionskoeffizienten bzw. der Dämpfungskonstanten Ω ist von der Zusammensetzung des Frischbetons, dem Zeitpunkt der Verdichtung und den Eigenschaften des Rüttlers abhängig. Zu Beginn der Verdichtung besitzt der Frischbeton einen hohen Absorptionskoeffizienten, da sich der Beton in einem lockeren Zustand befindet und Schwingungsenergie schnell aufgenommen werden kann (Garbotz u. Ersoy 1964). Innerhalb weniger Sekunden reduziert sich die Dämpfung bis der Absorptionskoeffizient Ω_V für den vollständig verdichteten Frischbeton erreicht wird.

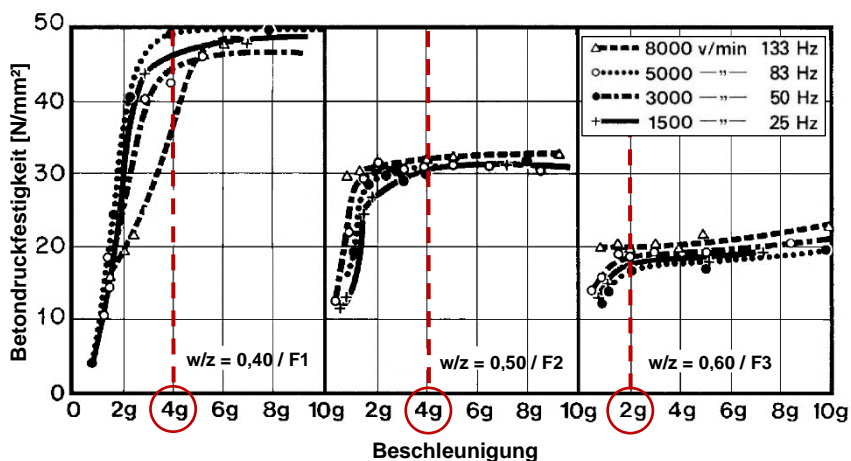


Abb. 6-6: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit von erhärtetem Beton und der Beschleunigung während der Verdichtung (in Anlehnung an ACI 309.1R)

Aus der Reduktion der Schwingungsamplitude mit zunehmendem Abstand zum Rüttler resultiert die Begrenzung des Wirkungsbereichs eines Rüttlers (siehe Tab. 6-1). Der Wirkungsbereich wird an dem Ort erreicht, an dem der Rütteldruck gerade noch die innere Reibung des Frischbetons überwinden kann. Im verflüssigten Zustand beträgt die innere Reibung im Vergleich zum Ausgangswert noch maximal 5 % (L'Hermite u. Tournon 1948). Die Verdichtung von Frischbeton beginnt bei einer Beschleunigung von ca. 0,5 g bzw. 5 m/s² und steigt linear bis zu einer Beschleunigung von ca. 4 g bzw. 40 m/s² an. Dies wird durch den Vergleich von Beschleunigung bei der Verdichtung mit der zugehörigen Druckfestigkeit des erhärteten Betons ersichtlich (siehe Abb. 6-6).

6.2 Theoretische Grundlagen zur Übertragung von Rüttelschwingungen in Frischbeton

Die Höhe der notwendigen Beschleunigung bei der Verdichtung richtet sich nach dem w/z-Wert bzw. der Konsistenz des Frischbetons. Je flüssiger der Frischbeton ist, desto niedriger darf die Beschleunigung sein. Bei w/z-Werten von 0,40 (F1) und 0,50 (F2) kann bei 4 g bzw. 40 m/s² und bei einem w/z-Wert von 0,60 (F3) sogar schon bei 2 g bzw. 20 m/s² eine vollständige Verdichtung festgestellt werden. Ähnliche Beobachtungen konnten auch in Garbotz u. Ersoy 1964 bei einem Beton mit einem w/z-Wert von 0,45 gemacht werden. Zwischen 0 und 4 g findet ein rascher Anstieg der Verdichtungswirkung statt. Diese stagniert jedoch bei weiterer Erhöhung der Beschleunigung. Die Werte korrelieren auch mit den Angaben in DIN 4235-1, die eine Mindestbeschleunigung von 3 g bzw. 30 m/s² vorschreibt. Eine höhere Beschleunigung des Betons als 4 g ist somit in der Praxis nicht erforderlich, da dies keine weitere Steigerung der Betonqualität mit sich bringt. Wie hoch die Beschleunigung der vom Innenrüttler verursachten Schwingung ist, ist abhängig von dessen Schwingungsamplitude s und Frequenz f (siehe Gleichung (6-1)).

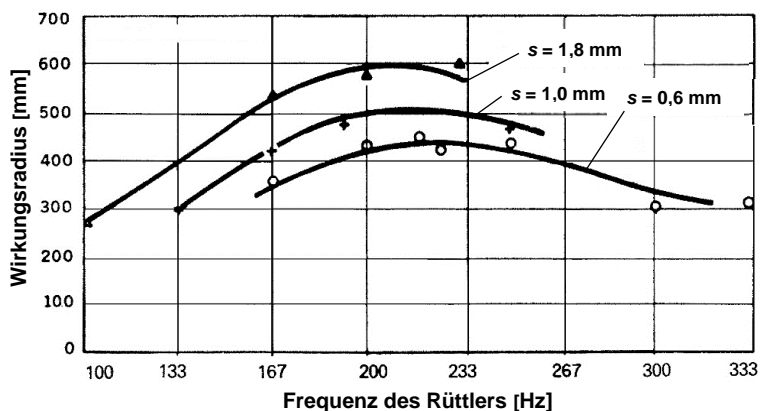


Abb. 6-7: Zusammenhang zwischen dem Wirkungsradius, der Frequenz und der Amplitude eines Innenrüttlers mit einem Durchmesser von 60 mm (ACI 309.1R)

Wie bereits in Abb. 6-6 gezeigt, kann eine angemessene Verdichtung mit einer breiten Spanne an Frequenzen erreicht werden. Untersuchungen an einem Rüttler mit einem Gehäusedurchmesser von 60 mm haben jedoch gezeigt, dass eine optimale Verdichtung und damit der größte Wirkungsradius bei einer Rüttelfrequenz f von ca. 200 Hz auftritt (siehe Abb. 6-7). Deshalb besitzen gegenwärtig verfügbare Produkte meist eine Rüttelfrequenz von 200 Hz. Die Untersuchungen verdeutlichen außerdem, dass sich der Wirkungsradius bei steigender Schwingungsamplitude s des Innenrüttlers vergrößert.

Werte für die Dämpfungskonstante von Frischbeton sind in der Literatur kaum vorhanden. Zudem weichen die Werte voneinander erheblich ab und gelten nicht für alle Randbedingungen (Frischbeton- und Rüttlereigenschaften). Eine Übersicht über bislang ermittelte Dämpfungskonstanten für Frischbeton aus ACI 309.1R und Garbotz u. Ersoy 1964 wird in Kapitel 6.4 gegeben.

6.2.3 Herleitung mathematischer Zusammenhänge zur Beschreibung von Rüttelschwingungen in Frischbeton

Bei der Ausbreitung von Rüttelschwingungen in Frischbeton handelt es sich um einen zeitlich und örtlich veränderlichen Zustand, bei dem Energie durch schwingende Bestandteile des Frischbetons an benachbarte Teilchen in Form einer Kompressions- oder Longitudinalwelle übertragen wird. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c solcher Wellen in einer „Flüssigkeit“ beträgt:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6-4)$$

mit: K Kompressionsmodul des Frischbetons
 ρ Rohdichte des Frischbetons

Untersuchungen von *Beutel u. Große 2005* und *Beutel 2009* haben ergeben, dass die Wellengeschwindigkeit in Frischbeton ca. 250 bis 500 m/s beträgt. Bei einer Rohdichte von 2400 kg/m³ ergibt sich ein Kompressionsmodul zwischen 1,5 und 6,0 · 10⁸ Pa.

Mithilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit c und der Schwingungsfrequenz f kann die Wellenlänge λ errechnet werden:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6-5)$$

Die allgemeine Gleichung zur Beschreibung der Schwingungsauslenkung s einer ungedämpften Welle in Abhängigkeit der Zeit t und dem Ort x ergibt sich zu:

$$s(x,t) = s_0 \cdot \sin 2\pi \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (6-6)$$

mit: s_0 Schwingungsamplitude zum Zeitpunkt $t = 0$
 f Frequenz der Schwingung

Aus der ersten Ableitung nach der Zeit t entsteht die Geschwindigkeit des Schwingers in Abhängigkeit der Zeit t und dem Ort x :

$$v(x,t) = 2\pi \cdot f \cdot s_0 \cdot \cos 2\pi \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (6-7)$$

Für die Kreisfrequenz ω einer harmonischen Schwingung gilt:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (6-8)$$

mit: D Federkonstante des Schwingsystems
 m Schwingende Masse

6.2 Theoretische Grundlagen zur Übertragung von Rüttelschwingungen in Frischbeton

Die Gesamtenergie in einem schwingenden System berechnet sich immer aus der Summe aus kinetischer Energie E_{kin} und potentieller Energie E_{pot} . Nach Einsetzen von Gleichung (6-6) und (6-7) in (6-10) ergibt sich:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} \quad (6-9)$$

$$= \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Ds^2 \quad (6-10)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2}m \cdot [2\pi f \cdot s_0 \cdot \cos 2\pi(f \cdot t - \frac{x}{\lambda})]^2 + \frac{1}{2}D \cdot [s_0 \cdot \sin 2\pi(f \cdot t - \frac{x}{\lambda})]^2 \\ &= \frac{1}{2}m \cdot \omega^2 \cdot s_0^2 \cdot [\cos(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda})]^2 + \frac{1}{2}m \cdot \omega^2 \cdot s_0^2 \cdot [\sin(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda})]^2 \\ &= \frac{1}{2}m \cdot \omega^2 \cdot s_0^2 \cdot ([\cos(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda})]^2 + [\sin(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda})]^2) \\ &= \frac{1}{2}m \cdot \omega^2 \cdot s_0^2 \end{aligned} \quad (6-11)$$

Nach dem Gesetz der Energieabsorption (Meschede 2015) geht jedoch bei der räumlichen Weiterleitung einer Schwingung (Welle) infolge Reibung Energie verloren. Der Energieverlust dE bei der Absorption von Wellenenergie ist proportional zur vorhandenen Energie E und zur Laufstrecke der Welle dx :

$$\frac{dE}{dx} = -\Omega \cdot E \Leftrightarrow \frac{dE}{E} = -\Omega \cdot dx \quad (6-12)$$

Der Faktor Ω beschreibt die Dämpfungskonstante des Übertragungsmediums. Durch Integration und Umformung von Gleichung (6-12) ergibt sich für Frischbeton das Newtonsche Reibungsgesetz bzw. ein exponentielles Reibungsgesetz:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{E} &= -\Omega \cdot dx \\ \Leftrightarrow \ln(E) &= -\Omega \cdot x + \ln(E_0) \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) &= -\Omega \cdot x \\ \Leftrightarrow E &= E_0 \cdot e^{-\Omega \cdot x} \end{aligned} \quad (6-13)$$

Durch das Einsetzen von Gleichung (6-11) in (6-13) erhält man die Gleichung (6-14) zur Ermittlung der Schwingungsamplitude s im Abstand x in Abhängigkeit der Dämpfungskonstante Ω des Frischbetons und der Amplitude s_0 am Ort $x = 0$:

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

$$\begin{aligned}\Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot s^2 &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot s_0^2 \cdot e^{-\Omega \cdot x} \\ \Leftrightarrow s^2 &= s_0^2 \cdot e^{-\Omega \cdot x} \\ \Leftrightarrow s &= s_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot x}\end{aligned}\quad (6-14)$$

Für eine gedämpfte Welle leiten sich die Gleichungen für den Schwingungsweg s und die Beschleunigung a am Ort x und zum Zeitpunkt t her:

$$s(x,t) = s_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot x} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (6-15)$$

$$a(x,t) = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot s_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot x} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (6-16)$$

Die Maximalwerte bzw. Amplituden für Schwingungsweg und Beschleunigung errechnen sich zu:

$$s_{\max} = s_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot x} \quad (6-17)$$

$$a_{\max} = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot s_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot x} \quad (6-18)$$

Nach der Festlegung der minimal notwendigen Beschleunigung a_{\min} kann mithilfe der Frequenz f und Schwingungsamplitude des Rüttlers im Frischbeton $s_{0,F}$ sowie der Dämpfungskonstante Ω des Frischbetons der Wirkungsradius des Rüttlers r_W bestimmt werden:

$$r_W = \frac{-2 \cdot \ln\left(\frac{a_{\min}}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot s_{0,F}}\right)}{\Omega} \quad (6-19)$$

Mithilfe von Gleichung (6-16) kann die Abnahme der Beschleunigungsamplitude mit zunehmendem Abstand zum Rüttler errechnet werden.

Abb. 6-8 zeigt die grafische Darstellung der Beschleunigung eines Rüttlers mit einer Schwingfrequenz von 200 Hz und einer Schwingungsamplitude von 0,15 mm im Frischbeton. Es wird angenommen, dass eine vollständige Verdichtung des Frischbetons bis zu einer Beschleunigung von 4 g erreicht wird. Bei einer Verdopplung der Dämpfungskonstante des Frischbetons halbiert sich der Wirkungsradius des Innenrüttlers. Bei einer Erhöhung der Frequenz oder der Schwingungsamplitude, d. h. bei Verwendung eines leistungsstärkeren Rüttlers, würde sich der Wirkungsbereich sinngemäß erhöhen. Generell wirkt sich die Reflexion der Welle an den Schalungsflächen auf den Wirkungsradius positiv aus.

6.3 Schwingungsübertragung in Elementwänden

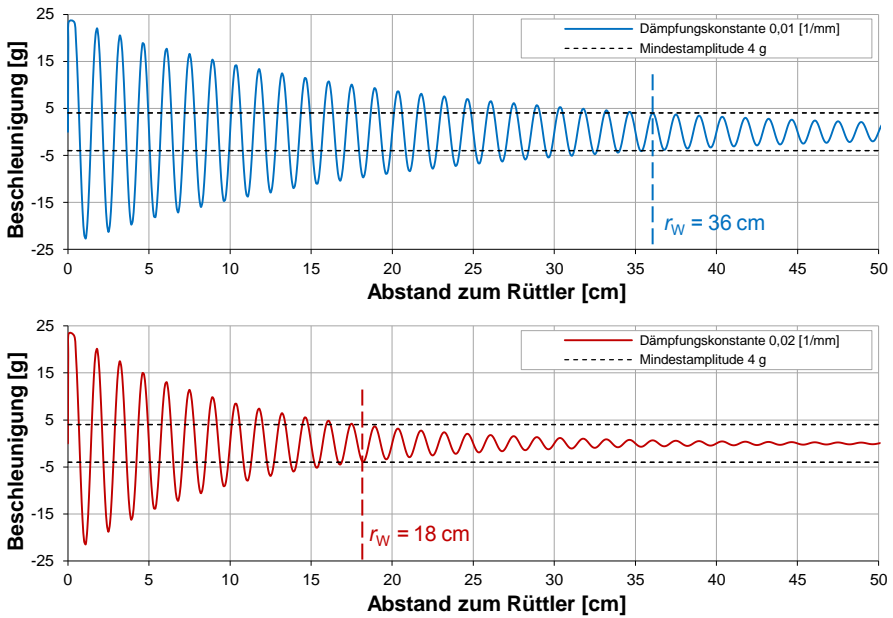


Abb. 6-8: Wirkungsbereich eines Innenrüttlers in Abhängigkeit der Dämpfungskonstante

6.3 Schwingungsübertragung in Elementwänden

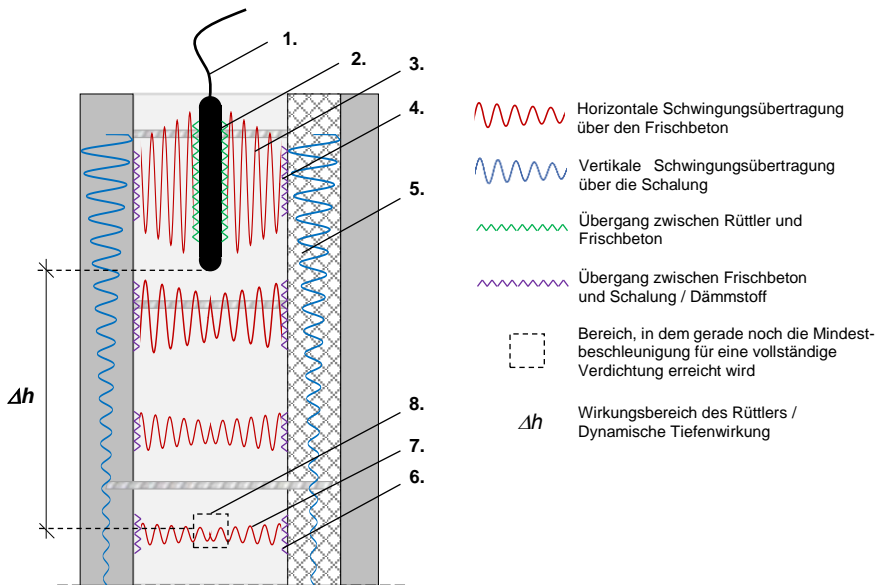


Abb. 6-9: Schwingungsübertragung im System „Elementwand mit integriertem Dämmstoff“

In Kapitel 6.2 wurden die Grundlagen für die Schwingungsübertragung in Frischbeton gelegt. Im nächsten Schritt wird die Übertragung von Schwingungen im System „Elementwand mit integriertem Dämmstoff“ behandelt. Neben einer Übertragung von Schwingungen im Frischbeton orthogonal zur Rüttlerachse, findet auch eine vertikale Weiterleitung der Rüttelschwingungen statt, welche von den Materialeigenschaften der Schalungsflächen und des Frischbetons abhängig ist. Abb. 6-9 zeigt die schematische Darstellung der Schwingungsübertragung im System „Elementwand mit integriertem Dämmstoff“.

Die Schwingungsübertragung kann in mehrere Stufen unterteilt werden:

1. Stufe

Erzeuger und Ausgangspunkt der Wellenübertragung ist der Innenrüttler. Die vom Rüttler verursachte Fliehkraft F ist abhängig von

- der Frequenz f ,
- der Masse des Rüttlers m_R und
- der Schwingungsamplitude s_0 .

Die Dämpfung im Frischbeton ist weitestgehend unabhängig von der Erzeugerfrequenz (*L'Hermite u. Tournon 1948*), jedoch abhängig vom m-r-Wert bzw. der Fliehkraft des Rüttlers (siehe *Garbotz u. Ersoy 1964*). In Kapitel 6.4.1 werden alle genannten Kennwerte für zwei verschiedene Innenrüttler experimentell bestimmt.

2. Stufe

Bei der Übertragung der Schwingungen vom Rüttler auf den Frischbeton findet ein Energieverlust in Form einer Reduktion der Schwingungsamplitude statt (siehe Abb. 6-5). Für die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6.4 wurde keine Reduktion der Schwingungsamplitude angenommen, da heutige Rüttelmechaniken ideal an die Verwendung in Frischbeton angepasst sind. Zudem wird der Frischbeton nur im vollständig verdichteten Zustand betrachtet, wodurch die Beeinflussung durch aufsteigende Luftblasen entfällt.

Es gilt:

$$s_{0,F} = 1,0 \cdot s_0 \quad (6-20)$$

mit: $s_{0,F}$ Schwingungsamplitude des Rüttlers in Frischbeton
 s_0 Schwingungsamplitude des Rüttlers in der Luft

3. Stufe

Nach der Übertragung der Schwingungen von Rüttler zu Frischbeton findet eine horizontale Weiterleitung der Rüttelschwingungen statt (siehe Abb. 6-5). Für die mathematische Beschreibung der horizontalen Schwingungsübertragung muss die

Dämpfungskonstante Ω des Frischbetons bekannt sein (siehe Gleichung (6-17) und (6-18)). Diese ist abhängig von

- der Konsistenz des Frischbetons und
- den Eigenschaften des Rüttlers.

Garbotz u. Ersoy 1964 konnten zwischen der Fliehkraft eines Innenrüttlers und der Dämpfungskonstante einen nichtlinearen Zusammenhang feststellen. Die Ergebnisse werden zusammen mit den eigenen Untersuchungen zur Dämpfungskonstante in Kapitel 6.4.2 dargestellt.

4. Stufe

Bei der Übertragung der Welle von Frischbeton auf die Schalung wird infolge Reflexion nur ein Teil der Wellenenergie auf die Schalung übertragen. Der Anteil von Reflexion und Absorption richtet sich nach

- der Rohdichte von Frischbeton und Schalmaterial sowie
- der Wellengeschwindigkeit in Frischbeton und im Schalungsmaterial.

Für die weiteren Untersuchungen wird auf der sicheren Seite liegend kein Verlust von Wellenenergie beim Übergang zwischen Frischbeton und Schalung angenommen.

5. Stufe

Anschließend findet eine vertikale Schwingungsübertragung über die Schalungsflächen statt. Die Dämpfung der Schwingung in Abhängigkeit von der Tiefe ist vom Schalungsmaterial abhängig und wird in Kapitel 6.4.3 untersucht.

6. Stufe

Bei der Übertragung der Schwingungen von Schalung auf den Frischbeton kommt es erneut zu einer Reduktion der Wellenenergie (siehe 4. Stufe). Dieser Energieverlust wird jedoch bei der Auswertung der experimentellen Untersuchungen vernachlässigt.

7. Stufe

Die horizontale Schwingungsübertragung über den Frischbeton erfolgt analog zur 3. Stufe.

8. Stufe

Um eine Verdichtung des Frischbetons bis zu einer Tiefe Δh zu gewährleisten, muss in der Mitte der Ortbetonergänzung die benötigte Mindestbeschleunigung zur vollständigen Verflüssigung vorhanden sein. Das Maß Δh beschreibt dann den Wirkungsbereich des Innenrüttlers bzw. die dynamische Tiefenwirkung.

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

In Kapitel 6.3 wurden die Stufen der Schwingungsübertragung in einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff erläutert und zu untersuchende Inhalte aufgezeigt. Um die hochfrequenten Schwingungen des Frischbetons bei der Verdichtung erfassen zu können, werden bei allen Versuchen induktive Wegaufnehmer verwendet. Die Messfrequenz beträgt 4800 Hz, wodurch eine ausreichend genaue Aufnahme der Kreisschwingung gewährleistet wird.

6.4.1 Schwingungsfrequenz und -amplitude der verwendeten Innenrüttler

Die Grundlage für die mathematische Beschreibung der dynamischen Tiefenwirkung in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff ist die Bestimmung der Kennwerte der verwendeten Innenrüttler. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werden zwei verschiedene Innenrüttler verwendet (siehe Tab. 6-2).

Tab. 6-2: Herstellerangaben für die verwendeten Innenrüttler

Modell	Flaschendurchmesser [mm]	Frequenz [Hz]	Länge [cm]	Flaschengewicht [kg]
Werner Integ 50	50	200	38	3,9
Wacker Neuson H35 + M2000	35	200	41	2,1

Zur Bestimmung von Schwingungsfrequenz und -amplitude eines Innenrüttlers wird dieser mit dem Schlauch an einer Aufhängung fixiert, sodass ein freies Schwingen ermöglicht wird. Da ein Rüttler beim Betrieb über die Flaschenlänge keine konstante Schwingungsamplitude aufweist (*Grampeix 2014*), wird diese entlang des Rüttlers in Abständen von 5 cm gemessen (siehe Abb. 6-10). Der Verlauf der Amplitude über die Flaschenlänge muss aufgrund der Starrheit der Rüttelflasche linear sein.

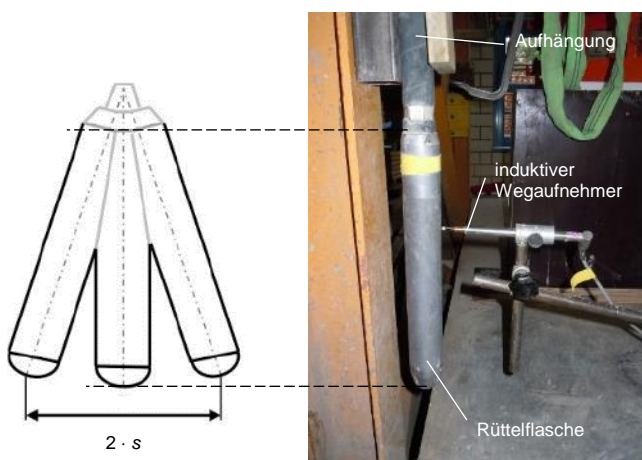


Abb. 6-10: Bestimmung von Schwingungsfrequenz und -amplitude eines Rüttlers

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

Je näher der Wegaufnehmer in Richtung Rüttlerspitze angebracht wird, desto schwieriger ist die Messung von Amplitude und Frequenz, da sich durch die freie Beweglichkeit des Rüttlers die Messstelle des Wegaufnehmers verschiebt (siehe Abb. 6-10). Zwei Beispiele für die Messung von Amplitude und Frequenz sind in Abb. 6-11 dargestellt. Für das Rüttelflaschenmodell „Werner“ ergibt sich eine Schwingungsfrequenz von 200 Hz, für das Modell „Wacker“ von 190 Hz. Somit können die Herstellerangaben nach Tab. 6-2 bestätigt werden. Für beide Rüttler werden durchweg gleichmäßige Sinusschwingungen gemessen.

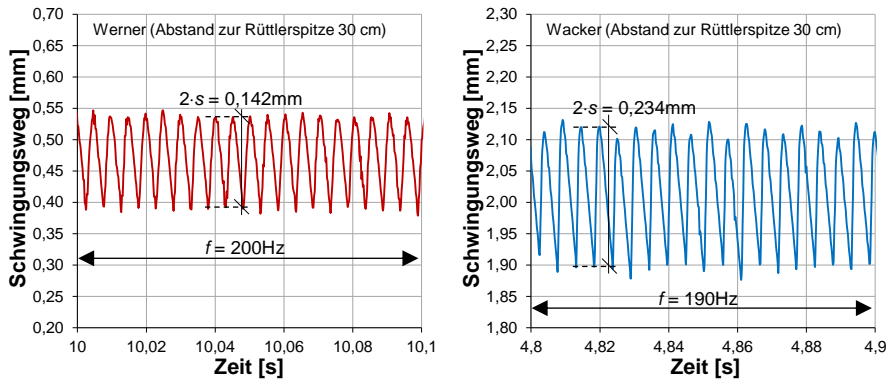


Abb. 6-11: Messung von Schwingungsweg und –frequenz für das Modell „Werner“ (links) und das Modell „Wacker“ (rechts) bei einem Abstand zur Rüttlerspitze von 30 cm

Abb. 6-12 zeigt den Verlauf der Schwingungsamplitude über die Rüttlerlänge. Die mit abnehmender Entfernung zur Rüttlerspitze zunehmenden Abweichungen sind auf versuchsbedingte Messungenauigkeiten zurückzuführen. Aufgrund der Starrheit der Rüttelflasche kann jedoch ein linearer Verlauf der Schwingungsamplitude approximiert werden (siehe Tab. 6-3).

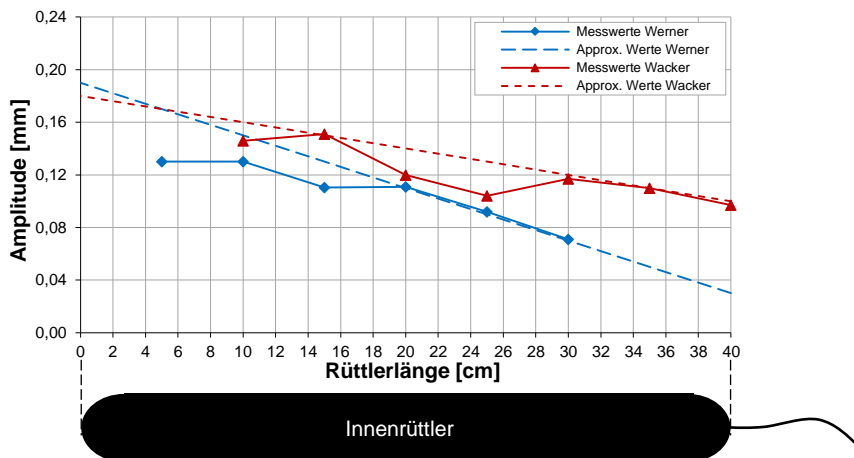


Abb. 6-12: Verlauf der Schwingungsamplitude über die Rüttlerlänge

Tab. 6-3: Darstellung der gemessenen und approximierten Schwingungsamplituden in mm

Abstand zur Rüttlerspitze [cm]	Werner Integ 50		Wacker Neuson H35 + M2000	
	Gemessen	Approximiert	Gemessen	Approximiert
40	-	0,03	0,097	0,10
35	-	0,05	0,110	0,11
30	0,071	0,07	0,117	0,12
25	0,092	0,09	0,104	0,13
20	0,111	0,11	0,120	0,14
15	0,111	0,13	0,151	0,15
10	0,130	0,15	0,146	0,16
5	0,130	0,17	-	0,17
0	-	0,19	-	0,18
	Mittelwert:	0,11	Mittelwert:	0,14

Mithilfe der im Versuch ermittelten Kennwerte zur Frequenz und Schwingungsamplitude können m-r-Wert (Gleichung (6-3)) und Fliehkraft (Gleichung (6-2)) der Rüttler errechnet werden (siehe Tab. 6-4).

Tab. 6-4: Ergebniszusammenfassung aus den experimentellen Untersuchungen

Modell	Mittlere Schwingungsamplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Flaschengewicht [kg]	m-r-Wert [(gs ² cm)/cm]	Fliehkraft [N]
Werner Integ 50	0,11	200	3,9	0,044	677,5
Wacker Neuson H35 + M2000	0,14	190	2,1	0,030	419,0

6.4.2 Dämpfungskonstanten von Frischbeton (DS1)

6.4.2.1 Experimentelle Untersuchungen

In den nachfolgenden Untersuchungen steht die Ermittlung von Dämpfungskonstanten für Frischbeton in Abhängigkeit von der Fliehkraft F bzw. dem m-r-Werts des Rüttlers und der Konsistenz des Frischbetons im Fokus. Die Zeitabhängigkeit von Ω wird nicht untersucht, da nur die Dämpfungskonstante von vollständig verdichtetem Frischbeton Ω_V von Interesse ist.

Schalung A besitzt die Abmessungen 15 x 40 x 50 cm und damit ein inneres Volumen von 30 l (siehe Abb. 6-13). In der Holzschalung befinden sich seitlich zwei Löcher mit eingeschobenen Metallhülsen. Eine für die Hülse passgenaue Metallstange mit beidseitig angeschweißten Messplättchen (innerhalb und außerhalb der Schalung) ermöglicht eine nahezu reibungsfreie Verschiebung in Horizontalrichtung. Wird Frischbeton in die Schalung eingefüllt und verdichtet, so erzwingt dieser gleichzeitig eine Schwingung des Plättchens. Durch die starre Verbindung über die Metallstange mit dem außen liegenden Plättchen kann der zeitliche Verlauf des Schwingungswegs mit einem Wegaufnehmer aufgenommen werden. Wegaufnehmer 1 (WA1) und Wegaufnehmer 2 (WA2) messen den Schwingungsweg im Frischbeton in unterschiedlichen Abständen zum Rüttler (5 und 10 cm). In der Theorie muss die im Versuch ermittelte Dämpfungskonstante an beiden Messstellen gleich sein.

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung der Dämpfungskonstante in Abhängigkeit der Konsistenz des Frischbetons und des Innenrüttlers. Im Rahmen der Versuchsreihe werden drei verschiedene Frischbetonkonsistenzen untersucht (siehe Tab. 6-5). Die Betonrezepturen sind in Anhang F hinterlegt.

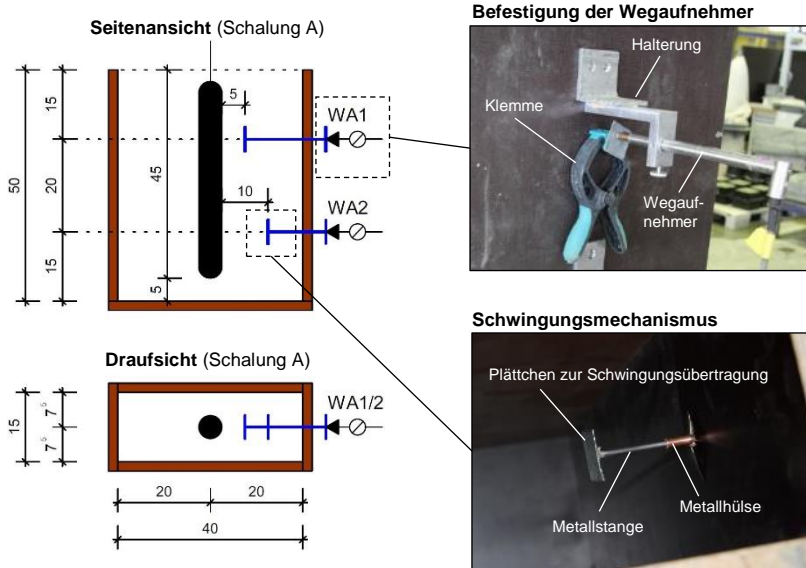


Abb. 6-13: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Dämpfungskonstanten (Schalung A)

Nach Mischen des Frischbetons und Ermittlung des Ausbreitmaßes wird dieser in die Schalung eingefüllt und bereits vor der Messung verdichtet (siehe Abb. 6-14). Bei maximalem Füllstand und Beendigung der Verdichtung werden die Klemmen (siehe Abb. 6-13), die zur Fixierung des Schwingungsmechanismus dienen, entfernt und die Schwingungsmessung gestartet (Messfrequenz: 4800 Hz). Anschließend wird der Innenrüttler erneut in Betrieb genommen und bis zu einem Abstand von 5 cm zum Schalungsboden in den Frischbeton exakt in der Mitte der Schalung eingetaucht. In dieser Position wird der Rüttler für ca. 30 s gehalten.

Tab. 6-5: Versuchsprogramm zur Ermittlung der Dämpfungskonstanten von Frischbeton (Versuchsreihe DS1)

Versuch	Modell	Rüttler		Frischbeton		Schalungsmaterialien
		Amplitude s [mm]		Konsistenzklasse	w/z-Wert [-]	
		WA1	WA2			
DS1-01	Werner Integ 50	0,07	0,15	F2	0,50	Holz
DS1-02				F3	0,55	
DS1-03				F4	0,65	
DS1-04	Wacker Neuson H35 + M2000	0,12	0,16	F2	0,50	
DS1-05				F3	0,55	
DS1-06				F4	0,65	

Es kann augenblicklich der Einschwingvorgang des Frischbetons beobachtet werden, welcher nach ca. einer Sekunde abgeschlossen ist (siehe Abb. 6-15). Durch die vollständige Verflüssigung des Frischbetons haben die Plättchen des

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

Schwingungsmechanismus keinen Widerstand mehr und verschieben sich solange, bis sich die Wegaufnehmer außerhalb des Messbereichs befinden (horizontaler Verlauf bei ca. - 18 mm Schwingungsweg). In diesem abfallenden Ast kann die mittlere Schwingungsamplitude bestimmt werden. Anschließend wird der Schwingungsmechanismus wieder in die Ausgangsposition bewegt (steigender Ast) und es wird erneut verdichtet. Dieser Vorgang wird während eines Versuchs zwischen vier und sieben Mal wiederholt. Durch die manuelle Verschiebung des Schwingungsmechanismus in die Nulllage entsteht kurzzeitig eine Fehlmessung.



Abb. 6-14: Arbeitsschritte vor der Schwingungsmessung: Lagenweises Füllen (links) und Verdichten (mitte) des Frischbetons; Schalung bereit zur Messung (rechts)

In Tab. 6-6 sind die Einzelwerte jedes abfallenden Astes und der Mittelwert des jeweiligen Versuchs für DS1-01 bis DS1-06 zusammengefasst. Die Messwerte zeigen, dass generell bei flüssigerem Beton größere Amplituden gemessen werden und somit ein größerer Wirkungsradius erreicht wird. Bei dem Modell „Werner“ werden im Vergleich zu Modell „Wacker“ ebenfalls größere Amplituden gemessen, was auf die höhere Fliehkraft zurückzuführen ist. Bei den gemessenen Werten fällt auf, dass diese teilweise sogar höher sind, als die Schwingungsamplitude des Rüttlers selbst. Dies ist widersprüchlich, da somit negative Dämpfungskonstanten entstehen würden.

Tab. 6-6: Einzel- und Mittelwerte der gemessenen Amplituden (Versuchsreihe DS1)

Versuch		Schwingungsamplitude am abfallenden Ast [mm]							Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	7	
DS1-01	WA 1	0,074	0,078	0,080	0,063	0,053	0,055	(0,049)	0,0672
	WA 2	0,147*	0,121*	0,121*	0,091	0,094	0,102	-	0,0956
DS1-02	WA 1	0,044	0,091	0,092	0,100	0,059	-	-	0,0772
	WA 2	0,109	0,102	(0,072)	(0,085)	(0,077)	(0,076)	-	0,1057
DS1-03	WA 1	0,094	0,075	0,074	0,075	0,083	-	-	0,0805
	WA 2	(0,068)	(0,024)	0,142	0,138	-	-	-	0,1403
DS1-04	WA 1	0,076	0,068	0,067	0,064	(0,049)	(0,041)	(0,054)	0,0689
	WA 2	0,083*	-	-	0,079*	0,057	0,059	0,057	0,0576
DS1-05	WA 1	0,077	0,071	(0,046)	(0,04)	-	(0,042)	-	0,0739
	WA 2	0,074	0,116*	0,130*	0,109*	0,081	0,068	-	0,0742
DS1-06	WA 1	(0,042)	(0,047)	(0,042)	(0,039)	-	-	-	(0,0425)
	WA 2	0,079	0,085	0,084	0,082	0,089	0,087	0,095	0,0859

() Schwingungsmechanismus durch Zementleim blockiert (keine Verwendung der Messwerte)

* dynamische Anregung der Schalung (keine Verwendung der Messwerte)

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

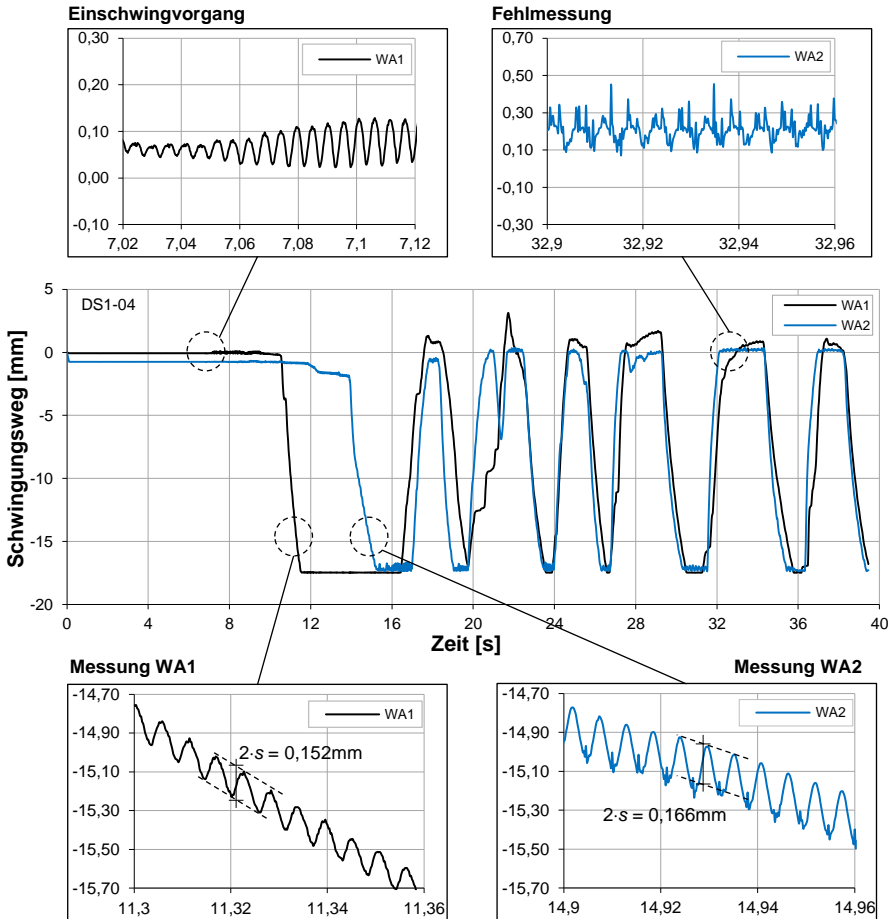


Abb. 6-15: Schwingungsweg über die Zeit inklusive Detailausschnitten von Versuch DS1-04

Die Erklärung für die hohen Messwerte liefert die Wellenüberlagerung der von der Rüttelflasche erzeugten Schwingungen. Die Erarbeitung der Theorie zur Wellenüberlagerung und die anschließende Errechnung der Dämpfungskonstanten erfolgt im nächsten Kapitel.

6.4.2.2 Theorie zur Wellenüberlagerung und Dämpfungskonstanten

Ein Innenrüttler überträgt von jedem Punkt seiner Manteloberfläche orthogonal Schwingungen auf das umgebene Medium. Bei der Schwingungsmessung in Schalung A findet deshalb eine Wellenüberlagerung statt. Dies führt dazu, dass die im Versuch ermittelten Schwingungsamplituden im Abstand von 5 oder 10 cm sogar größer sein können als die Schwingungsamplitude des Innenrüttlers selbst. Im Folgenden wird die Theorie zur Wellenüberlagerung vorgestellt, die den Sachverhalt erklärt und eine Errechnung von Dämpfungskonstanten ermöglicht (siehe Abb. 6-16).

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

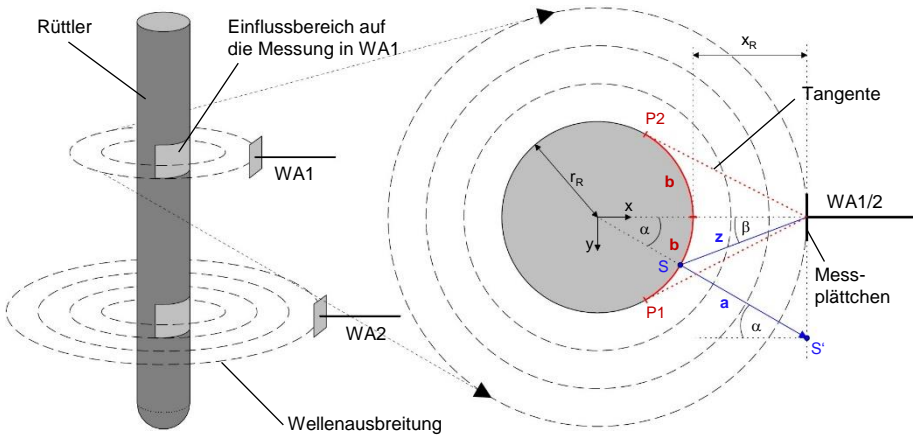


Abb. 6-16: Theorie zur Wellenüberlagerung im Frischbeton

Bildet man ausgehend von dem Messplättchen mit dem Abstand x_R zum Rüttler die beiden Kreistangenten zum Radius r_R des Innenrüttlers, so erhält man zwei Berührungspunkte $P1(x_B/y_B)$ und $P2(x_B/-y_B)$ auf der Oberfläche des Rüttlers:

$$x_B = \frac{r_R^2}{r_R + x_R} \quad (6-21)$$

$$y_B = \sqrt{r_R^2 - x_B^2} \quad (6-22)$$

Die resultierende Bogenlänge b beschreibt den Bereich des Rüttlerumfangs, der einen direkten Einfluss auf die gemessene Schwingungsamplitude hat:

$$b = 2 \cdot \pi \cdot r_R \cdot \frac{\alpha(P1/P2)}{360^\circ} \quad (6-23)$$

Jeder beliebige Punkt $S(x/y)$ auf der Bogenlänge b hat demnach einen Einfluss auf die mit WA1 oder WA2 gemessene Amplitude. Die zugehörigen Winkel α und β berechnen sich zu:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (6-24)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x_R + r_R - x}\right) \quad (6-25)$$

Die Länge z ist der Abstand von Punkt S zum Messplättchen und berechnet sich zu:

$$z = \sqrt{(x_R + r_R - x)^2 + y^2} \quad (6-26)$$

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

Mithilfe von z kann das Maß a errechnet werden, welches der imaginären Lauflänge der Welle vom Punkt S bis zum Erreichen des Messplättchens (Punkt S') entspricht:

$$a = z \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (6-27)$$

Unter Verwendung von Gleichung (6-17) kann der Einfluss von Punkt $S(x/y)$ auf die gemessene Schwingungsamplitude s an dem Messplättchen in x -Richtung errechnet werden:

$$s(x) = s_{0,F} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot a} \cdot \cos \alpha \quad x_B \leq x \leq r_R \quad (6-28)$$

$$s(x) = s_{0,F} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot \frac{\cos(\tan^{-1} \frac{y}{x_R + r_R - x})}{\cos(\tan^{-1} \frac{y}{x})} \cdot \sqrt{(x_R + r_R - x)^2 + y^2}} \cdot \cos(\tan^{-1} \frac{y}{x}) \quad (6-29)$$

Die im Versuch von Wegaufnehmer WA1 bzw. WA2 gemessene Schwingungsamplitude s entspricht dem zweifachen Integral von $s(x)$ über die Bogenlänge b bzw. zwischen $x = x_B$ und $x = r_R$ geteilt durch die Breite des Messplättchens von 3 cm:

$$s = \frac{2}{3} \cdot \int_{x_B}^{r_R} s(x) dx \quad (6-30)$$

mit: s gemessene Schwingungsamplitude im Versuch

Die Unterschiede zwischen einem Rüttler mit kleinem Durchmesser (Wacker - 3,5 cm) und großem Durchmesser (Werner - 5,0 cm) sind in Abb. 6-17 veranschaulicht.

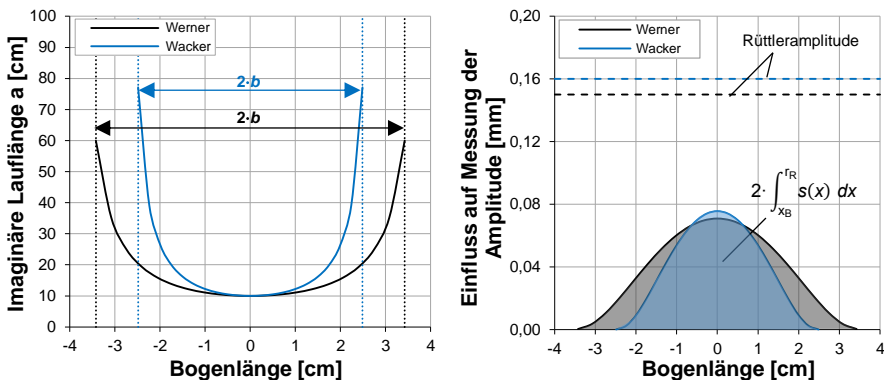


Abb. 6-17: Vergleich der Bogenlänge und imaginären Lauflänge der Welle (links), Einfluss auf die Messung der Schwingungsamplitude in Abhängigkeit vom Rüttler (rechts)

Es ist zu erkennen, dass die auf die Schwingungsübertragung einflussgebende Bogenlänge bei größeren Rüttlern länger ist. Gleichmaßen ist auch die imaginäre

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

Lauf­länge der Welle von jedem Punkt auf der Bogenlänge zum Betrachtungspunkt (in diesem Fall das Messplättchen) geringer. Dies führt insgesamt zu einem höheren Einfluss auf die Messung der Schwingungsamplitude.

Mithilfe der Software *MATLAB* wurde Gleichung (6-30) für alle sechs Versuche numerisch gelöst, um eine Dämpfungskonstante Ω_V zu errechnen. Für Wegaufnehmer WA1 in Versuch DS1-03 sind die Eingangsparameter bspw.:

- s 0,0805 mm
- $s_{0,F}$ 0,07 mm
- x_R 5,0 cm
- r_R 2,5 cm
- x_B 0,83 cm

Hieraus ergibt sich:

$$0,0805 \text{ mm} = \frac{2}{3} \cdot \int_{0,83}^{2,5} s(x) dx$$

$$\Leftrightarrow \Omega_V = 0,00876$$

Die aus allen sechs Versuchen berechneten Dämpfungskonstanten sind in Tab. 6-7 dargestellt.

Tab. 6-7: Dämpfungskonstanten von verdichtetem Frischbeton

Versuch		Rüttler	Ausbreitmaß [cm]	Konsistenzklasse	w/z-Wert	Ω_V [1/mm]	
DS1-01	WA 1	Werner Integ 50	37/38	F2	0,50	0,0140	0,014
	WA 2					0,0138	
DS1-02	WA 1		45/46	F3	0,55	0,0100	0,011
	WA 2					0,0123	
DS1-03	WA 1		48/51	F4	0,65	0,0088	0,008
	WA 2					0,0079	
DS1-04	WA 1	Wacker Neuson H35 + M2000	37/39	F2	0,50	0,0194	0,018
	WA 2					0,0175	
DS1-05	WA 1		44/44	F3	0,55	0,0173	0,015
	WA 2					0,0134	
DS1-06	WA 1		49/52	F4	0,65	-	0,011
	WA 2					0,0111	

Zur Validierung der Ergebnisse können unter Verwendung von Abb. 6-7 und unter Annahme einer Mindestbeschleunigung von 4 g für eine vollständige Verdichtung ebenfalls Dämpfungskonstanten errechnet werden:

$$\Omega_V = \frac{-2 \cdot \ln\left(\frac{4g}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot s_{0,F}}\right)}{r_W} \quad (6-31)$$

Für Frequenzen zwischen 167 und 200 Hz und Schwingungsamplituden des Rüttlers zwischen 0,6 und 1,8 mm ergibt sich nach 30 s Verdichtungszeit (vollständig verdichteter Frischbeton) eine Dämpfungskonstante von 0,015 1/mm. Dieser Wert liegt genau im Bereich der experimentell ermittelten Dämpfungskonstanten.

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

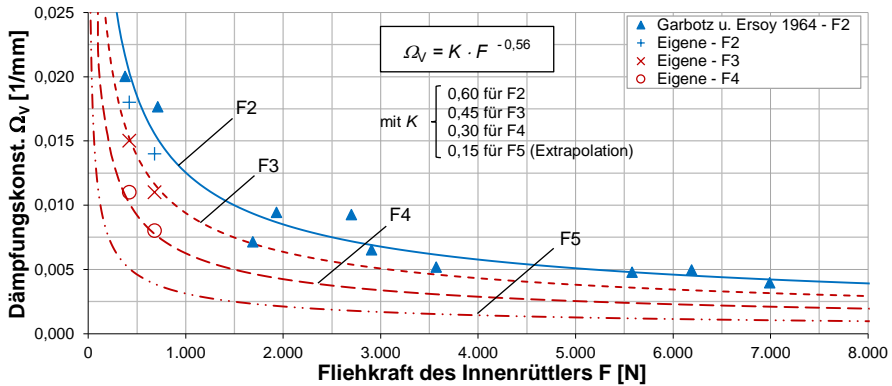


Abb. 6-18: Vergleich der Dämpfungskonstanten aus *Garbotz u. Ersoy 1964* mit den eigenen Messwerten in Schalung A

In *Garbotz u. Ersoy 1964* wurden ebenfalls Schwingungsmessungen in Frischbeton durchgeführt. Die Rezeptur des verwendeten Betons ist in Tab. F 6 aufgeführt. Der Beton kann der Konsistenzklasse F2 zugeordnet werden. Aus den gemessenen Schwingungsamplituden können die Dämpfungskonstanten für verschiedene Innenrüttler mit unterschiedlichen Fliehkräften errechnet und grafisch dargestellt werden (siehe Abb. 6-18). Es ist erkennbar, dass die im Versuch ermittelten Werte für einen Beton der Konsistenzklasse F2 sehr gut mit denen von *Garbotz u. Ersoy 1964* übereinstimmen. Die Zusammenstellung der Daten aus *Garbotz u. Ersoy 1964* ist in Anhang H zu finden. Bei wachsender Fliehkraft des Innenrüttlers ist ein nichtlinearer Abfall der Dämpfungskonstante zu beobachten. Für die Konsistenzklassen F3 bis F5 können anhand der Versuchsergebnisse ähnliche Funktionen abgeleitet werden:

$$\Omega_V = K \cdot F^{-0,56} \quad (6-32)$$

mit: F Fliehkraft des Innenrüttlers
 K Anpassungskoeffizient für die Frischbetonkonsistenz
 0,60 für F2
 0,45 für F3
 0,30 für F4
 0,15 für F5 (lineare Extrapolation)

6.4.3 Dynamische Tiefenwirkung in Wandbauteilen (DS2)

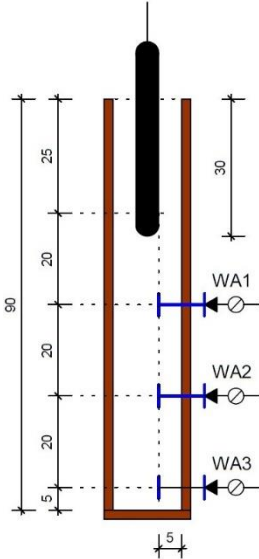
Ein wichtiger Teil der Untersuchungen ist die Erfassung der dynamischen Tiefenwirkung eines Rüttlers bzw. der vertikalen Schwingungsübertragung in einer Elementwand. Insgesamt werden vier verschiedene Schalungsmaterialien und drei verschiedene Frischbetonkonsistenzen mit drei verschiedenen w/z -Werten untersucht (siehe Tab. 6-8). Neben einer konventionellen Holzschalung (siehe Abb. 6-19, Schalung B) werden Konstellationen einer typischen Elementwand mit integriertem Dämmstoff betrachtet (siehe Abb. 6-19, Schalung C). Hierzu gehören ein weicher und ein steifer EPS sowie ein XPS in Kombination mit einer rauen Betonschale. Im Rahmen der Versuche wird das Rüttlermodell „Werner“ verwendet.

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

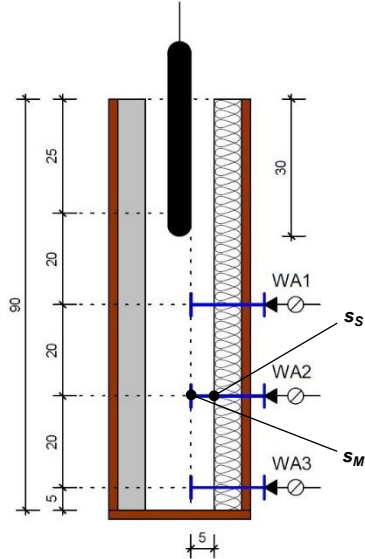
Tab. 6-8: Versuchsprogramm zur Untersuchung der vertikalen Schwingungsübertragung (Versuchsreihe DS2)

Versuch	Rüttler		Frischbeton		Materialien	
	Modell	Schwingungsamplitude s [mm]	Konsistenzklasse	w/z-Wert [-]	1. Schalung	2. Schalung
		Mittelwert				
DS2-01	Werner Integ 50	0,11	F2	0,50	Holz	Holz
DS2-02			F3	0,55		
DS2-03			F4	0,65		
DS2-04			F2	0,50	Dämmstoff O EPS $d_{pm} = 4,26$ mm	Beton rau
DS2-05			F3	0,55		
DS2-06			F4	0,65		
DS2-07			F2	0,50	Dämmstoff M EPS $d_{pm} = 2,11$ mm	Beton rau
DS2-08			F3	0,55		
DS2-09			F4	0,65		
DS2-10			F2	0,50	Dämmstoff K XPS	Beton rau
DS2-11			F3	0,55		
DS2-12			F4	0,65		

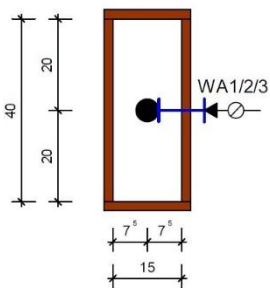
Seitenansicht (Schalung B)



Seitenansicht (Schalung C)



Draufsicht (Schalung B)



Draufsicht (Schalung C)

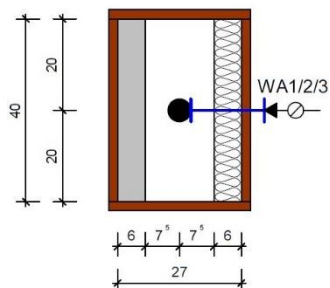


Abb. 6-19: Versuchsaufbau zur Untersuchung der dynam. Tiefenwirkung (Schalung B und C)

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

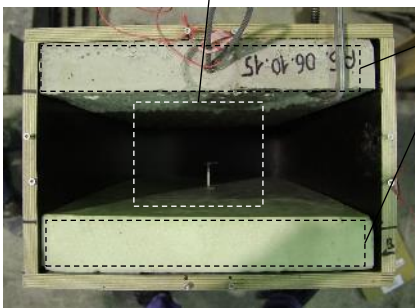
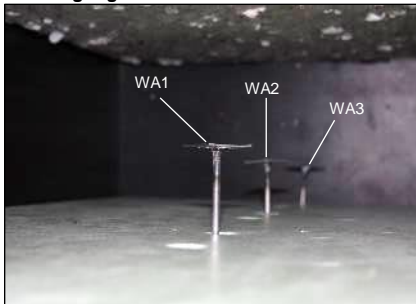
Die Schalungen B und C weisen eine Höhe von 90 cm auf. In drei unterschiedlichen Tiefen mit einem Abstand von je 20 cm sind Wegaufnehmer zur Schwingungsmessung nach dem gleichen Prinzip wie in Abb. 6-13 angeordnet. Somit ist eine Dämpfung der Schwingung im Frischbeton in Abhängigkeit der Tiefe messbar.

Abb. 6-20 zeigt die Draufsicht auf Schalung C kurz vor der Versuchsdurchführung. Um eine Schwingungsmessung zu ermöglichen, werden in den Dämmstoff Löcher gebohrt, damit die Metallstange des Schwingungsmechanismus hindurchgeführt werden kann.

Die Durchführung der Versuche erfolgt analog zu Kapitel 6.4.2 mit fünf bis neun Wiederholungen:

- Mischen des Frischbetons und Bestimmung des Ausbreitmaßes nach *DIN EN 12350-5*
- Lagenweises Einfüllen in die Schalung und Verdichten des Frischbetons
- Lösen der Klemmen zur Fixierung des Schwingungsmechanismus
- Start der Messung mit einer Messfrequenz von 4800 Hz
- Eintauchen des Innenrüttlers um 30 cm in den Frischbeton
- Warten bis die Wegaufnehmer außerhalb des Messbereichs liegen und anschließende Bewegung des Schwingungsmechanismus zurück in die Nulllage

Schwingungsmechanismus



Schalungsmaterialien

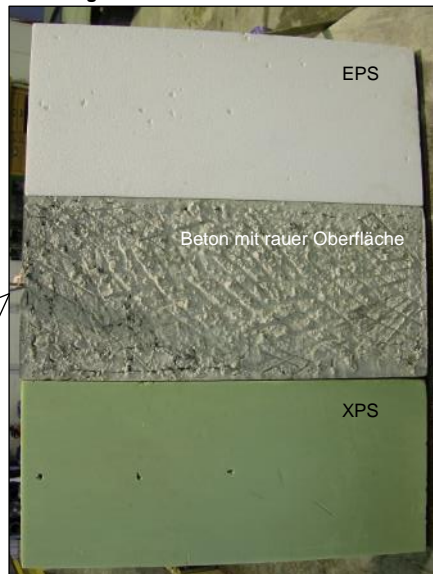


Abb. 6-20: Schalung C vor der Versuchsdurchführung und Darstellung der verwendeten Schalungsmaterialien

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

Die Ermittlung der Schwingungsamplitude an den Stellen WA1, WA2 und WA3 erfolgt analog zu Abb. 6-15 an den abfallenden Ästen der Kurven. Die Abbildungen des gemessenen Schwingungswegs über die Zeit aller Versuche sind in Anhang H dargestellt.

Auch in dieser Versuchsreihe treten Fehlmessungen durch dynamische Anregung der Schalung oder Blockierung des Schwingungsmechanismus mit Zementleim auf. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 6-21 gegeben. Links ist ein Ausschnitt der Schwingung am ersten abfallenden Ast dargestellt. Der Verlauf der Schwingung ist sauber und eine Schwingungsamplitude kann gut ermittelt werden. Bereits am zweiten abfallenden Ast ist eine Störung der Schwingung zu verzeichnen, welche auf eine Blockierung des Schwingungsmechanismus durch Zementleim zurückzuführen ist. Die Amplitude ist in diesem Fall sowohl unregelmäßig als auch viel zu gering und darf deshalb für die weiteren Betrachtungen nicht herangezogen werden. Eine Übersicht über alle Einzel- und Mittelwerte der gemessenen Schwingungsamplituden aus Versuchsreihe DS2 befindet sich in Tab. H 2 von Anhang H.

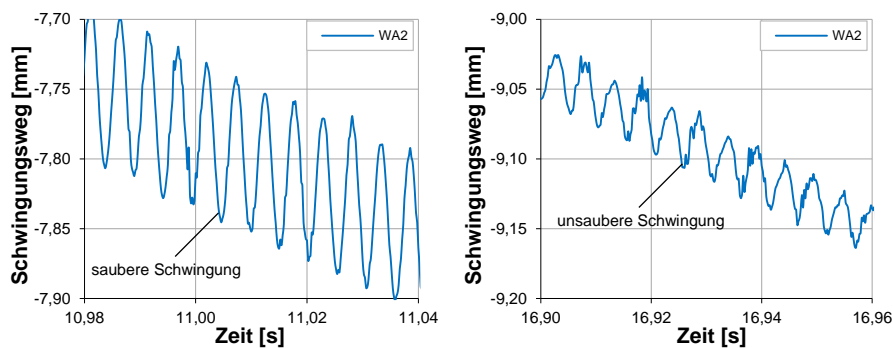


Abb. 6-21: Identifizierung von Fehlmessungen: Saubere Schwingung (links) und unsaubere Schwingung (rechts)

Nach Ermittlung der Mittelwerte der Schwingungsamplitude für die Wegaufnehmer WA1 bis WA3 können diese für jeden Versuch DS2-01 bis DS2-12 über den Ort in der Schalung dargestellt werden (siehe Abb. 6-22). Hierdurch wird die dämpfende Wirkung des Frischbetons mit zunehmendem vertikalem Abstand zum Rüttler ersichtlich. Da die Dämpfung in Frischbeton einem exponentiellen Reibungsgesetz unterliegt, muss sich zwangsläufig ein rechtsgekrümmter Verlauf der Schwingungsamplitude in Abhängigkeit des Ortes in der Schalung ergeben. Bei allen Versuchen wird an der Position WA1, d. h. in einem vertikalen Abstand von 20 cm zur Rüttlerspitze, eine mittlere Schwingungsamplitude zwischen 0,05 und 0,06 mm gemessen. Ab einer Tiefe von 40 cm (WA2) ergeben sich größere Unterschiede. Die gemessenen Werte reichen von 0,020 mm bei Dämmstoff O bis zu 0,046 mm bei einer glatten Holzschalung. An der Stelle WA3 fallen die Unterschiede noch ausgeprägter aus. Insgesamt werden bei der beidseitig glatten Holzschalung die größten Amplituden gemessen, was auf die größte dynamische Tiefenwirkung hindeutet. Bei den EPS-Dämmstoffen ist eine höhere Dämpfung bei einem größeren Porendurchmesser zu verzeichnen. Bei dem Dämmstoff aus XPS fällt eine Linkskrümmung der Verläufe auf, welche mit dem exponentiellen Reibungsgesetz in Konflikt stehen. Grund hierfür sind ebenfalls

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

Fehlmessungen an der Stelle WA3 (siehe Abb. 6-23). Für die weiteren Betrachtungen wurden diese Messwerte deshalb nicht berücksichtigt.

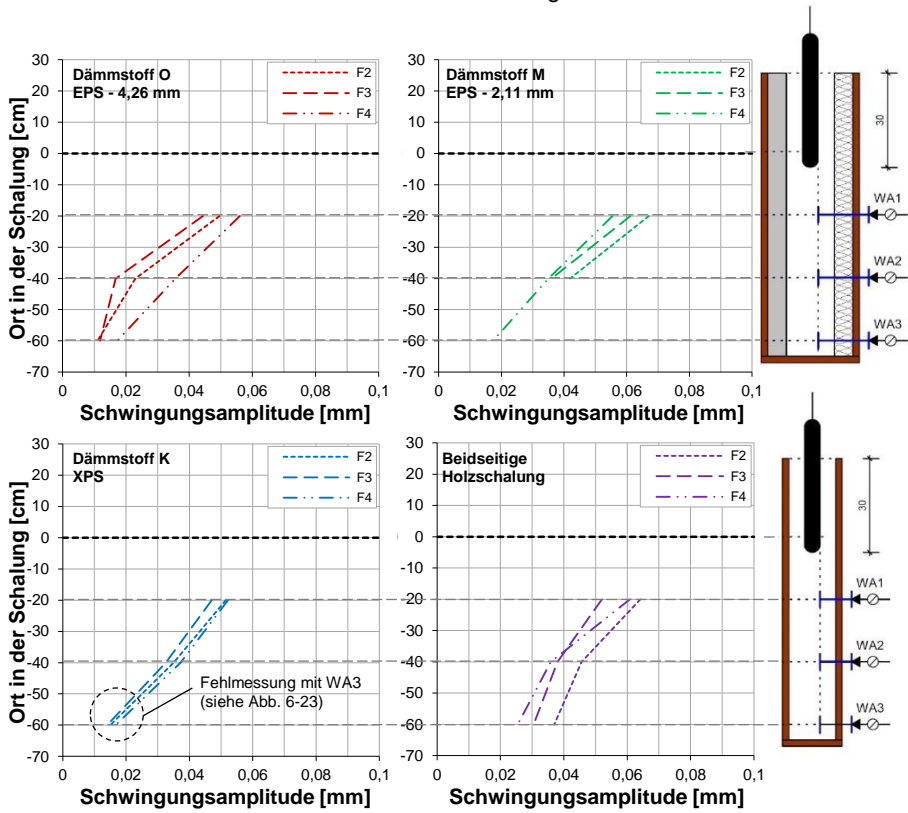


Abb. 6-22: Schwingungsamplitude im Frischbeton in Abhängigkeit des Ortes und den verwendeten Schalungsmaterialien

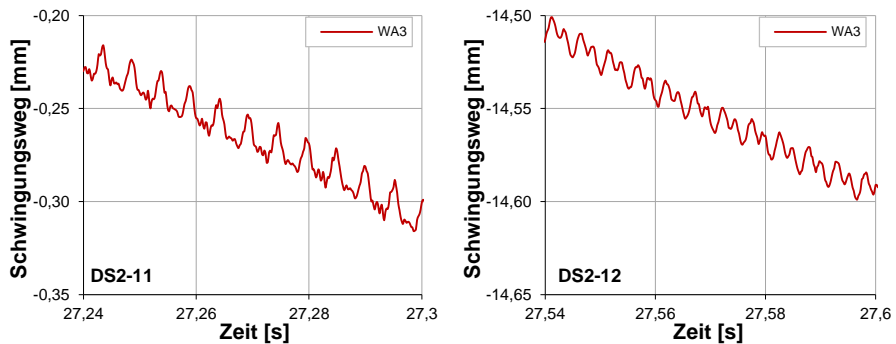


Abb. 6-23: Beispiele für Fehlmessungen mit WA3 bei den Versuchen DS2-10 bis DS2-12

6 Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung beim Verdichtungsvorgang

Um einen Berechnungsansatz für die dynamische Tiefenwirkung zu entwickeln, müssen vom Frischbeton und von der Geometrie der Elementwand unabhängige Dämpfungskonstanten Ω_S der Schalungsmaterialien ermittelt werden. Hierzu muss die vom Wegaufnehmer gemessene Schwingungsamplitude im Frischbeton s_M auf die Amplitude an der Schalung s_S umgerechnet werden (siehe Abb. 6-19).

$$s_S = \frac{s_M}{e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega_V \cdot 50\text{mm}}} \tag{6-33}$$

- mit: s_S Amplitude an der Schalung
- s_M Amplitude im Beton mit einem Abstand von 50 mm zur Schalung
- Ω_V Dämpfungskonstante im Frischbeton nach Gleichung (6-32)

In Abhängigkeit der Konsistenzklasse des Frischbetons ergeben sich im Vergleich zu den Messwerten höhere Schwingungsamplituden an der Schalung (siehe Abb. 6-9, 7. Stufe). Mit den resultierenden Schwingungsamplituden an der Schalung kann eine logarithmische Funktion der Amplitude in Tiefenrichtung generiert werden.

In den Abb. 6-24 bis Abb. 6-27 sind für alle Versuche die gemessenen Amplituden s_M , die errechneten Amplituden an der Schalung s_S und die resultierenden Logarithmus-Funktionen dargestellt. Die Abbildungen zeigen, dass in glatter Holzschalung nur eine relativ schwache Dämpfung auftritt. Dahingegen dämpfen die Dämmstoffe aus EPS sehr stark. Beim Einsatz von XPS liegen die Schwingungsamplituden zwischen denen von glatter Holzschalung und EPS.

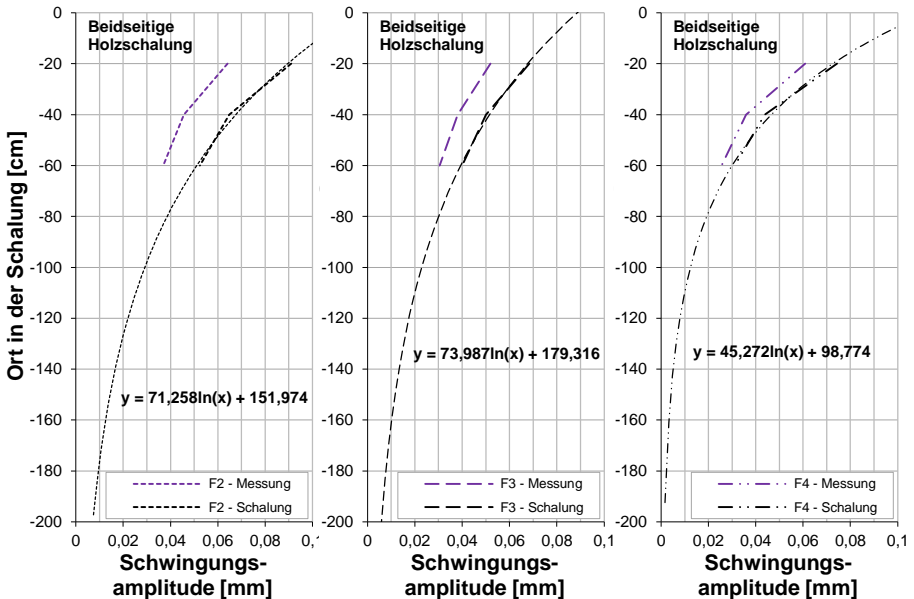


Abb. 6-24: Rückrechnung von den im Versuch gemessenen Schwingungsamplituden zu dem Verlauf der Schwingungsamplitude in den Schalungsflächen (DS2-01 bis DS2-03)

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

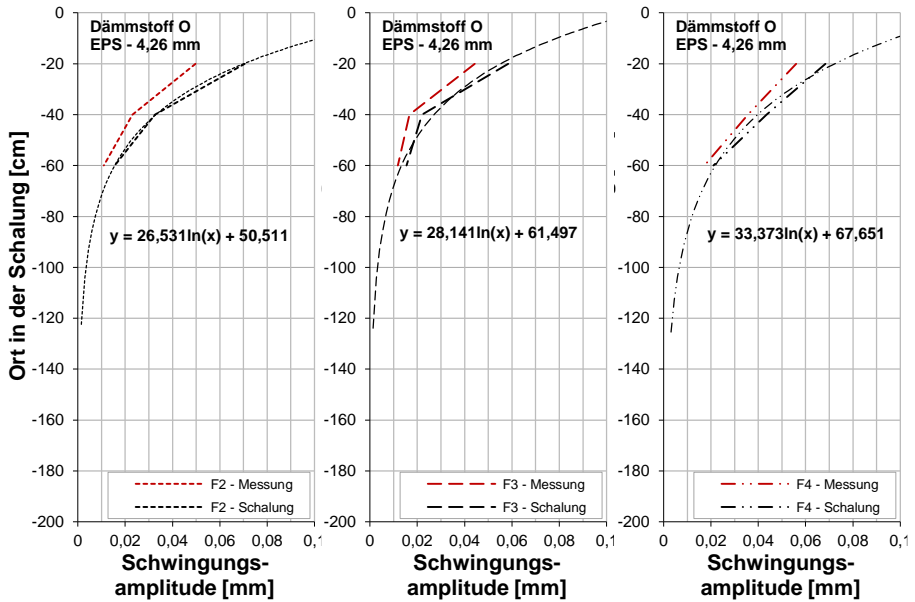


Abb. 6-25: Rückrechnung von den im Versuch gemessenen Schwingungsamplituden zu dem Verlauf der Schwingungsamplitude in den Schalungsflächen (DS2-04 bis DS2-06)

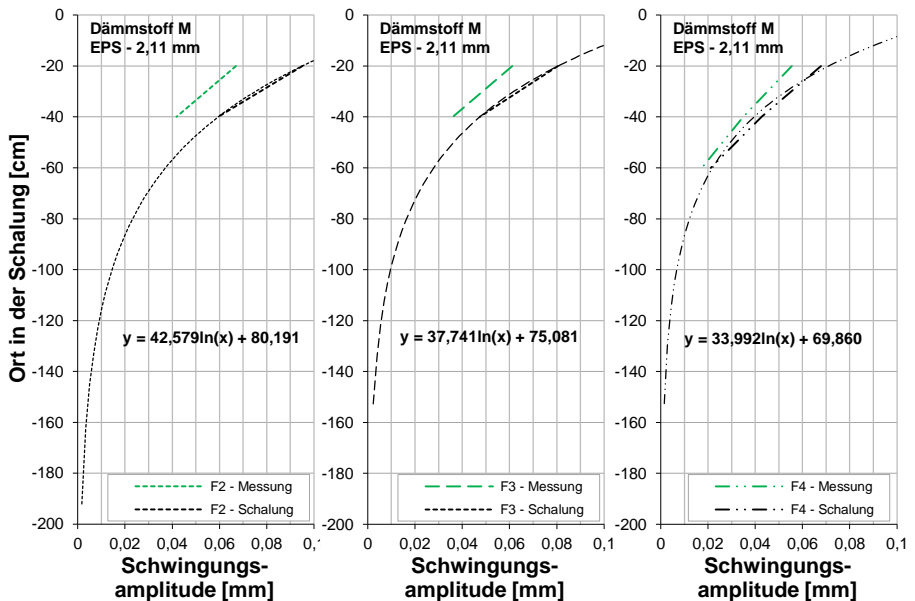


Abb. 6-26: Rückrechnung von den im Versuch gemessenen Schwingungsamplituden zu dem Verlauf der Schwingungsamplitude in den Schalungsflächen (DS2-07 bis DS2-09)

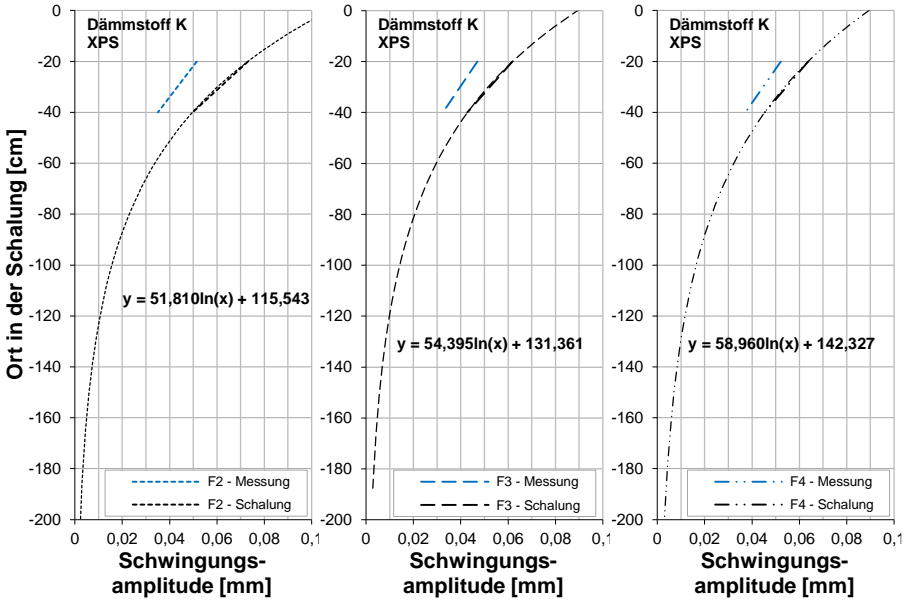


Abb. 6-27: Rückrechnung von den im Versuch gemessenen Schwingungsamplituden zu dem Verlauf der Schwingungsamplitude in den Schalungsflächen (DS2-10 bis DS2-12)

Mithilfe der logarithmischen Gleichungen kann zum einen eine Dämpfungskonstante Ω_S für die Schalung errechnet werden und zum anderen die Schwingungsamplitude an der Schalung $s_{S,0}$ in Höhe der Rüttlerspitze (Ort $y = 0$) bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 -y &= a \cdot \ln x + b \\
 \Leftrightarrow \frac{-y - b}{a} &= \ln x \\
 \Leftrightarrow x &= e^{-\frac{1}{a} \cdot y - \frac{b}{a}} \\
 \Leftrightarrow x &= e^{-\frac{b}{a}} \cdot e^{-\frac{1}{a} \cdot y}
 \end{aligned}$$

mit: $e^{-\frac{b}{a}}$ Amplitude an der Schalung in Höhe der Rüttlerspitze $s_{S,0}$
 $\frac{1}{a}$ Dämpfungskonstante der Schalung Ω_S

Hieraus entsteht die Gleichung zur Errechnung der Schwingungsamplitude in der Schalung in Abhängigkeit des vertikalen Abstands y von der Rüttlerspitze:

$$s_S(y) = s_{S,0} \cdot e^{-\Omega_S \cdot y} \tag{6-34}$$

6.4 Experimentelle Untersuchungen zur Übertragung von Rüttelschwingungen

Tab. 6-9 beinhaltet die Zusammenfassung aller logarithmischer Funktionen inklusive der errechneten Dämpfungskonstanten in der Schalung und der Schwingungsamplitude in der Schalung in Höhe der Rüttlerspitze.

Tab. 6-9: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Untersuchung der dynam. Tiefenwirkung

Versuch			Gleichung	ss,0 [mm]	Ω_s [1/cm]	
Holz	DS2-01	F2	$y = 71,25777 \cdot \ln(x) + 151,97354$	0,119	0,107	0,0140
	DS2-02	F3	$y = 73,98707 \cdot \ln(x) + 179,31592$	0,089		0,0135
	DS2-03	F4	$y = 45,27221 \cdot \ln(x) + 98,77391$	0,113		(0,0221)
Dämmstoff O EPS $d_{pm} = 4,26$ mm	DS2-04	F2	$y = 26,53103 \cdot \ln(x) + 50,51098$	0,149	0,131	0,0377
	DS2-05	F3	$y = 28,14141 \cdot \ln(x) + 61,49698$	0,112		0,0355
	DS2-06	F4	$y = 33,37260 \cdot \ln(x) + 67,65088$	0,132		0,0300
Dämmstoff M EPS $d_{pm} = 2,11$ mm	DS2-07	F2	$y = 42,57886 \cdot \ln(x) + 80,19075$	0,152	0,139	0,0235
	DS2-08	F3	$y = 37,74100 \cdot \ln(x) + 75,08122$	0,137		0,0265
	DS2-09	F4	$y = 33,99186 \cdot \ln(x) + 69,86018$	0,128		0,0294
Dämmstoff K XPS	DS2-10	F2	$y = 51,80958 \cdot \ln(x) + 115,54284$	0,108	0,095	0,0193
	DS2-11	F3	$y = 54,39550 \cdot \ln(x) + 131,36132$	0,089		0,0184
	DS2-12	F4	$y = 58,95986 \cdot \ln(x) + 142,32669$	0,089		0,0170

Die Ergebnisse zeigen, dass Holz die niedrigste Dämpfungskonstante von 0,0138 1/cm besitzt und damit die Rüttelschwingungen am effektivsten in die vertikale Richtung geleitet werden. Ca. 30 % höher ist die Dämpfungskonstante von XPS (0,0182 1/cm). Die für die EPS-Dämmstoffe O und M ermittelten Werte liegen bei 0,0344 und 0,0265 1/cm, was für eine deutlich geringere dynamische Tiefenwirkung bei der Verdichtung des Frischbetons spricht. Bei kleiner werdendem Porendurchmesser des EPS sinkt die Dämpfungskonstante. Grund dafür ist die höhere Wasser- und Zementaufnahme des feinporigen Dämmstoffs (siehe Kapitel 5.3) und gleichzeitig die bessere Schwingungsfähigkeit des Materials aufgrund der höheren Masse. Für Dämmstoffe aus EPS wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem mittleren Porendurchmesser und der Dämpfungskonstante angenommen.

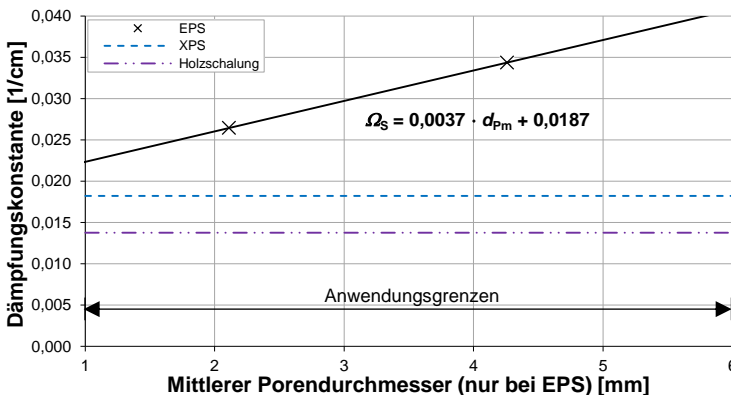


Abb. 6-28: Dämpfungskonstante von verschiedenen Schalungsmaterialien

Für die Berechnung der Dämpfungskonstante eines beliebigen Dämmstoffs aus EPS kann nachfolgender Zusammenhang angenommen werden. Hierbei sind die Anwendungsgrenzen (mittlerer Porendurchmesser zwischen 2 und 6 mm) zu beachten.

$$\Omega_S = 0,0037 \cdot d_{pm} + 0,0187 \quad (6-35)$$

Im Rahmen der Versuche konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die ermittelte Schwingungsamplitude in der Schalung auf Höhe der Rüttlerspitze der mittleren Schwingungsamplitude des Rüttlers selbst entspricht. Grund hierfür sind Schwingungsüberlagerungen im Bereich der Eintauchstelle des Rüttlers.

6.5 Zusammenfassung

Die Verdichtung des Frischbetons stellt einen wichtigsten Arbeitsschritt bei der Herstellung von Betonbauteilen dar, da diese wichtige Festbetoneigenschaften wie die Druckfestigkeit oder die Frostbeständigkeit des Betons steuert. Der Wirkungsbereich eines Rüttelgeräts steht in direktem Zusammenhang mit der Zusammensetzung des Frischbetons und den Eigenschaften des Rüttlers. Bei Elementwänden findet die Verdichtung fast ausschließlich über Innenrüttler statt. Hier ergibt sich die Besonderheit, dass die Rüttelschwingungen nicht nur über den Frischbeton selbst, sondern auch über die begrenzenden Schalungsflächen weitergeleitet werden.

Mithilfe experimenteller Untersuchungen konnten sowohl Dämpfungskonstanten von vollständig verdichtetem Frischbeton Ω_V (siehe (6-32)) als auch Dämpfungskonstanten für die vertikale Schwingungsübertragung Ω_S in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff (siehe (6-35)) ermittelt werden.

Die mathematische Herleitung zur Berechnung der dynamischen Tiefenwirkung Δh aus den Dämpfungskonstanten Ω_V und Ω_S findet im Rahmen der Entwicklung des Berechnungsmodells in Kapitel 7.2.4 statt.

7 Realitätsnahes Modell zur Berechnung des Frischbetondrucks

7.1 Der Weg zum Berechnungsmodell

Die Ausgangsbasis aller Untersuchungen ist die Zusammenstellung aller möglichen Einflussparameter auf den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff in Tab. 3-1. Diese werden in geometrische (G), werkstoffspezifische (W) und bauausführungstechnische (B) Einflussparameter unterteilt und kurz erläutert.

Vor der Durchführung experimenteller Untersuchungen werden zuerst auf Grundlage von theoretischen Betrachtungen einige Parameter ausgeschlossen (siehe Abb. 7-1).

Theoretische Betrachtungen zum Ausschluss von Parametern (Kapitel 3.2)	G5 Rasterfläche Verbindungsmittel	G7 Bewehrungsgrad in Ortbetonergänzung	B4 Fallhöhe des Frischbetons
	W8 Biege- und Dehnsteifigkeit der Verbindungsmittel	W9 Biege- und Dehnsteifigkeit der FT-Betonschalen	

Abb. 7-1: Theoretischer Ausschluss von Einflussparametern

Anschließend werden im Rahmen von drei Versuchsreihen weitere geometrische Einflüsse als vernachlässigbar definiert und maßgebende Einflüsse identifiziert (siehe Abb. 7-2).

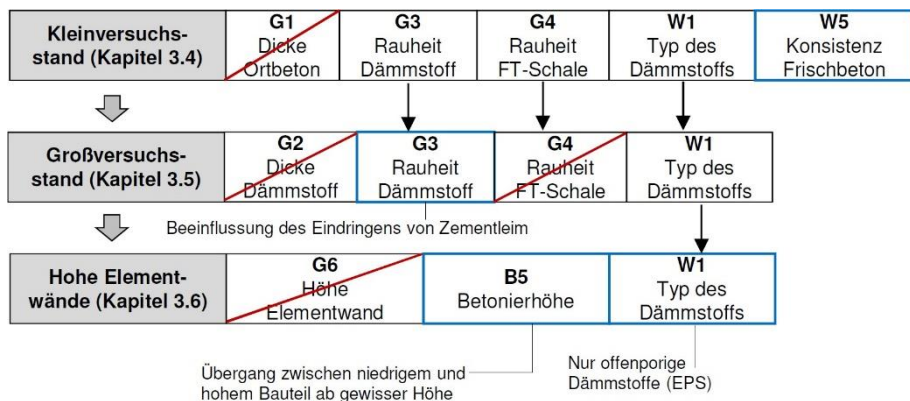


Abb. 7-2: Identifikation maßgebender Einflussparameter

Das Ergebnis der Untersuchungen ist, dass bei der Bestimmung des Frischbetondrucks eine Trennung zwischen niedrigen und hohen Bauteilen vollzogen werden muss, da sich die Einflüsse eines integrierten Dämmstoffs erst ab einer gewissen Betonierhöhe einstellen. Maßgebend für den Frischbetondruck wird dann die

- Höhe der Zementleimaufnahme des Dämmstoffs (Kapitel 5) und
- die Intensität der dynamischen Tiefenwirkung des Innenrüttlers (Kapitel 6).

Im Rahmen der Analyse der Zementleimaufnahme werden weitere Einflussparameter ausgeschlossen und die Bestimmung der in den Dämmstoff eingedrungenen Wasser- und Zementmenge alleine in Abhängigkeit des w/z-Werts des Frischbetons und der mittleren Porengröße des EPS-Dämmstoffs dargestellt. Aus dem Entzug von Zementleim aus dem Frischbeton folgt eine Änderung der Konsistenz. Die Zusammenhänge zur Berechnung eines reduzierten Seitendruckbeiwerts $\lambda_{0,red}$ in Abhängigkeit aller Randbedingungen werden in Kapitel 7.2.3 aufgeführt.

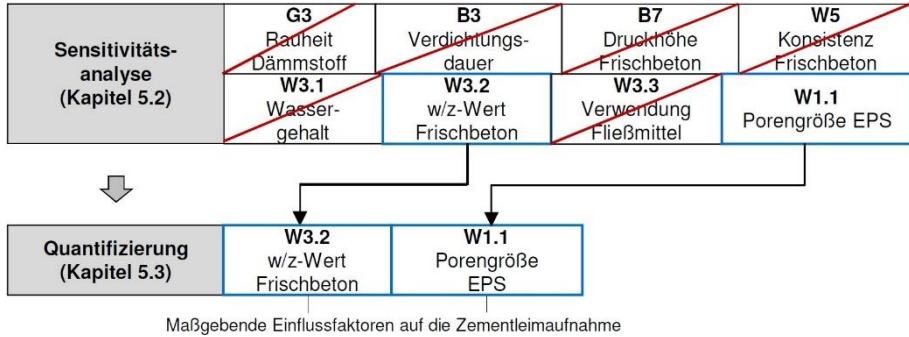


Abb. 7-3: Bestimmung der maßgebenden Einflüsse auf die Zementleimaufnahme von EPS

Die letzten beiden Versuchsreihen dienen zur Untersuchung der dynamischen Tiefenwirkung in Abhängigkeit des Dämmstoffs und der Eigenschaften des Rüttlers. Es werden sowohl Dämpfungskonstanten von vollständig verdichtetem Frischbeton Ω_V als auch Dämpfungskonstanten für die vertikale Schwingungsübertragung Ω_S in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff ermittelt. Die Zusammenhänge zur Berechnung der dynamischen Tiefenwirkung Δh in Abhängigkeit aller Randbedingungen werden in Kapitel 7.2.4 aufgeführt.

Dämpfung in Frischbeton (Kapitel 6.4.2)	W5 Konsistenz Frischbeton	B6 Eigenschaften des Rüttlers	G1 Dicke Ortbeton
Dynamische Tiefenwirkung (Kapitel 6.4.3)	W1 Typ des Dämmstoffs	W5 Konsistenz Frischbeton	B6 Eigenschaften des Rüttlers

Abb. 7-4: Experimentell untersuchte Einflussparameter auf die dynamische Tiefenwirkung

Die systematische Planung der Versuchsreihen in dieser Arbeit ermöglicht schlussendlich die Einteilung der Einflussparameter in drei Gruppen (siehe Tab. 7-1):

- Parameter ohne maßgebenden Einfluss
- Parameter, die bereits in *DIN 18218* berücksichtigt werden
- Parameter, die zusätzlich bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff berücksichtigt werden müssen

Tab. 7-1: Maßgebende Einflussparameter zur Bestimmung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff

Einflussparameter auf den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff		
Geometrisch (G)	Werkstoffspezifisch (W)	Bauausführungstechnisch (B)
G1 Dicke der Ortbetoner-gänzung d_{OB}	W1 Typ des Dämmstoffs	B1 Betoniergeschwindigkeit v
G2 Dicke des Dämmstoffs d_D	W2 Rohdichte des Dämmstoffs ρ_D	B2 Eintauchtiefe des Rüttlers h_V
G3 Oberflächenrauheit des Dämmstoffs R_D	W3 Betonrezeptur des Ortbetons	B3 Verdichtungsdauer t_V
G4 Oberflächenrauheit der FT-Tragschale R_{TS}	W4 Rohwichte des Ortbetons γ_{OB}	B4 Fallhöhe des Frischbetons beim Betonieren h_F
G5 Rasterfläche der Verbindungsmittel A_{VBM}	W5 Konsistenzklasse des Ortbetons K	B5 Betonierhöhe h
G6 Höhe der Elementwand H	W6 Frischbetontemperatur des Ortbetons T_{OB}	B6 Eigenschaften des Rüttlers
G7 Bewehrungsgrad im Bereich der Ortbetoner-gänzung ρ_{OB}	W7 Erstarrungsende des Ortbetons t_E	B7 Druckhöhe des Frischbetons
	W8 Biege- und Dehnsteifigkeit der Verbindungsmittel B_{VBM} / D_{VBM}	
	W9 Biege- und Dehnsteifigkeit der FT-Betonschalen $B_{VS/TS} / D_{VS/TS}$	

Mit der Festlegung der zu berücksichtigenden Einflussparameter kann das Modell zur realitätsnahen Beschreibung des horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff entwickelt werden.

7.2 Entwicklung des Berechnungsmodells

7.2.1 Allgemeines

In Kapitel 2.3 wurden Modellvorstellungen und Berechnungsansätze zur Ermittlung des Frischbetondrucks vorgestellt. Für die Entwicklung eines realitätsnahen Modells für Elementwände mit integriertem Dämmstoff wurde ein geeigneter Ansatz gefunden, der eine Berücksichtigung aller maßgebenden Einflussparameter ermöglicht (siehe Kapitel 7.2.2). Die Untersuchungen in den Kapiteln 3 bis 6 haben gezeigt, dass der reduzierte Frischbetondruck bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff im Vergleich zu glatter Schalung auf zwei Ursachen zurückgeführt werden kann, welche im Modell berücksichtigt werden müssen. Zum einen bewirkt die Umlagerung von Zementleim in den Dämmstoff eine Veränderung der Frischbetonkonsistenz und damit des Seitendruckbeiwerts (Berechnungsansatz siehe Kapitel 7.2.3). Zum anderen resultiert aus dem Schalungssystem „Elementwand mit integriertem Dämmstoff“ eine verminderte Übertragung der Rüttelschwingungen in vertikaler Richtung. Durch die Dämpfung der Schwingung in Kombination mit einem reduzierten Seitendruckbeiwert kommt es zu einer geringeren Wirkungstiefe des Innenrüttlers im Vergleich zu glatter Holzschalung (Berechnungsansatz siehe Kapitel 7.2.4).

7.2.2 Modellvarianten

Für die Erstellung eines Berechnungsmodells werden keine Ansätze in Betracht gezogen, welche auf der Silotheorie basieren (siehe Kapitel 2.3). Die Schalungsflächen in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff bestehen aus einem

Dämmstoff mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit und einer FT-Betonschale mit unterschiedlichen Rauheiten. Somit ist die Bestimmung der Reibungskoeffizienten für jede mögliche Kombination nur unter hohem Aufwand möglich und nicht praxisnah. Reibungsbeiwerte zwischen Frischbeton und glatter Schalung wurden bereits von *Specht 1973* und *Proske 2007* bestimmt, für Dämmstoff-Frischbeton und Festbeton-Frischbeton liegen in der Literatur keine verwertbaren Werte vor. Außerdem hat sich gezeigt, dass sich beim Einsatz hochleistungsfähiger Rüttler bei schalglatter Oberfläche der Siloeffekt fast gänzlich aufhebt (*Specht 1981*).

Im Gegensatz zu der Silotheorie haben sich in der Vergangenheit die bodenmechanischen Ansätze unter Berücksichtigung der Betonerstarrung zur Beschreibung des Frischbetondrucks bewährt. Das Grundmodell A stellt die Basis für die Berechnung des Frischbetondrucks nach *DIN 18218* dar. Dahingegen errechnen sich nach Grundmodell B generell geringere Frischbetondrücke. Dieses setzt zur Anwendung jedoch eine ausreichende Verformungsfähigkeit des Schalungssystems voraus (siehe Kapitel 2.3.1.2). In Analogie zur Bodenmechanik bedeutet dies, dass bei einer starren Schalung Erdruchdruck und bei einer nachgiebigen Schalung aktiver Erddruck auftritt. Das Auftreten von geringeren Drücken bei nachgiebiger Schalung wurde bereits in *Specht 1973* erwähnt. Da sich bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff je nach verwendetem Verbindungsmittel und Dämmstoff eine hohe Nachgiebigkeit ergibt, ist das Grundmodell B für die Erstellung eines realitätsnahen Modells besser geeignet.

Die in Kapitel 2 vorgestellten bodenmechanischen Modelle berücksichtigen bisher keine Rüttelwirkung des Innenrüttlers. Da der Einsatz von Rüttlern eine enorme Wirkung auf den maximalen Druck und den Verlauf des Drucks über die Bauteilhöhe hat, wird deren Einfluss in Anlehnung an *Specht 1981* nachfolgend erläutert.

Abb. 7-5 zeigt die Entwicklungsschritte für ein Berechnungsmodell unter Berücksichtigung einer Verdichtungswirkung mit einem Innenrüttler in Anlehnung an *Specht 1987*. Es wird sowohl das bodenmechanische Grundmodell A als auch Grundmodell B behandelt. In Abhängigkeit des gewählten Grundmodells und den vorhandenen Randbedingungen stellt sich beim Verfüllen einer Schalung über die Bauteilhöhe ein gekrümmter Frischbetondruckverlauf ein (siehe Abb. 7-5 (a)). Sobald der Beton verdichtet wird, wirkt unabhängig von der Frischbetonkonsistenz ein hydrostatischer Druck bis zur Rütteltiefe h_v (siehe Abb. 7-5 (b)). Grund hierfür ist die Verflüssigung des Frischbetons und die damit einhergehende Erhöhung des Seitendruckbeiwerts auf den Wert 1,0. Je steifer die Konsistenz des Betons vor der Verdichtung ist, desto höher fällt der bei der Verdichtung entstehende Drucksprung aus. Da die Verdichtung räumlich gesehen jedoch einen größeren Wirkungsbereich als bis zur Spitze des Rüttlers hat, wird der Drucksprung in der Tiefe h_v über die gesamte Betonierhöhe angenommen (siehe Abb. 7-5 (c)). Diese Annahme wurde im Rahmen der Entwicklung der *DIN 18218* getroffen (siehe *Freund u. a. 2014*). *Specht 1981* hat jedoch schon in seinem Kommentar zur *DIN 18218* empfohlen, die Annahme des vollen Rüttelzuschlags mit einer wissenschaftlichen Bestätigung zu prüfen. Wie die Untersuchungen in dieser Arbeit gezeigt haben, ist die Annahme bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff nicht berechtigt, da die Übertragung der Rüttelschwingungen in vertikaler Richtung stark gedämpft wird. Materialien wie Beton oder Dämmstoffe sind weniger schwingungsanfällig als Holz. Dementsprechend stellt

sich im Verlauf des Frischbetondrucks über die Bauteilhöhe ein Knick ein, welcher die Grenze des Wirkungsbereichs der Rüttelschwingungen definiert. Der Abstand von der Spitze des Rüttlers bis zur genannten Grenztiefe wird als Wirkungsbereich des Innenrüttlers oder dynamische Tiefenwirkung Δh bezeichnet (siehe Abb. 7-5 (d)). In der Position des Knicks entsteht der maximale Frischbetondruck im Bauteil. Ab dieser Stelle wird ein linearer Abfall des Drucks auf Null bis zum Erreichen der Betonierhöhe zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes angenommen.

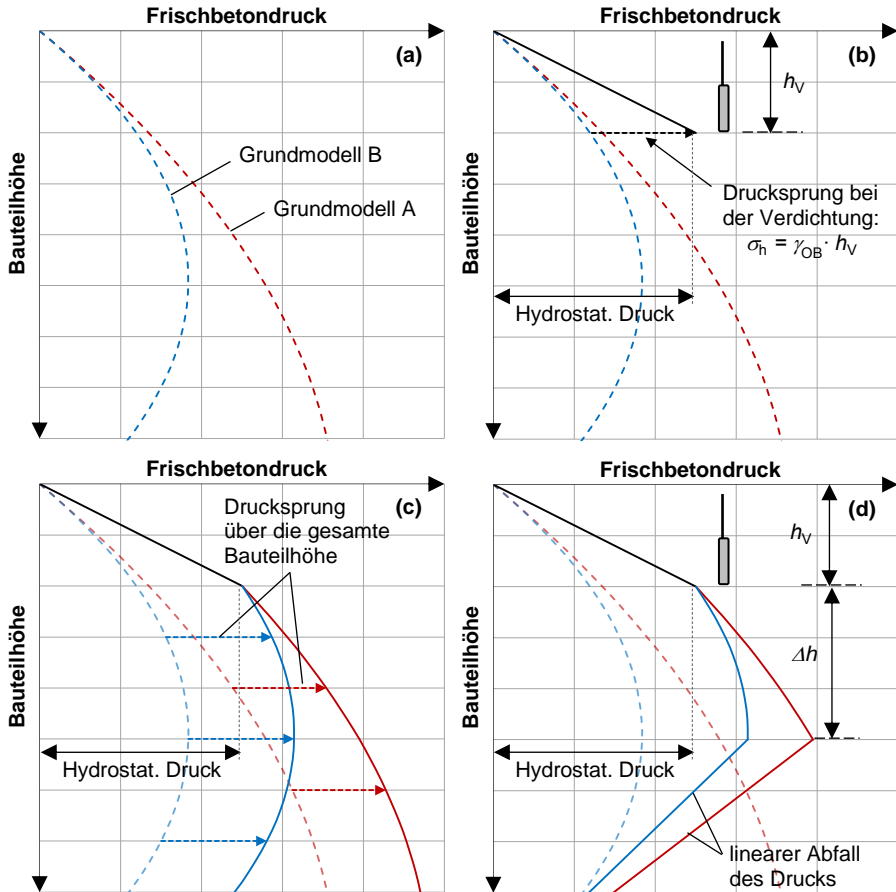


Abb. 7-5: Entwicklungsschritte zum Berechnungsmodell für den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff

Der Einsatz von Grundmodell B bedeutet nicht gleichzeitig, dass die errechneten Drücke auch unbedingt niedriger sind als nach Grundmodell A. Der zur Veranschaulichung verwendete Seitendruckbeiwert in Abb. 7-5 wurde für beide Grundmodelle gleich gewählt. In der Realität müssen jedoch bei Verwendung von Grundmodell B und einer gleichzeitigen Annahme eines nachgiebigeren Schalungssystems auch höhere Seitendruckbeiwerte angenommen werden (siehe Abb. 7-8). Für die Entwicklung des Berechnungsmodells wird im Weiteren das

bodenmechanische Grundmodell B verwendet, da dieses den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff realitätsnaher beschreibt.

7.2.3 Reduzierter Seitendruckbeiwert

In Abb. 7-6 sind die Einflussgrößen und Schritte zur Ermittlung des Seitendruckbeiwerts dargestellt.

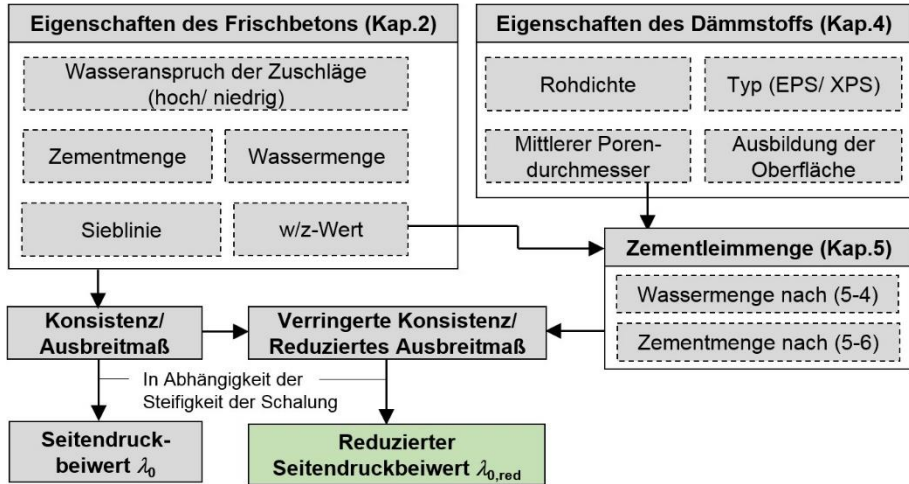


Abb. 7-6: Schritte zur Ermittlung des reduzierten Seitendruckbeiwerts $\lambda_{0,red}$

Die Konsistenzklasse bzw. das Ausbreitmaß eines Frischbetons kann über die Eigenschaften des Frischbetons (siehe Kapitel 2) ermittelt werden (Bonzel u. Dahms 1978, Heidelberg 2014). Neben der Sieblinie und dem Wasseranspruch der Zuschläge ist vor allem die Wassermenge ausschlaggebend für die Frischbetonkonsistenz. Eine hohe Wassermenge begünstigt zwar die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, hat jedoch auch negative Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften. Weitere Einflüsse sind die Zementmenge und die Zugabe von Betonzusatzmittel und -stoffen. Diese werden jedoch nicht explizit aufgeführt.

Bonzel u. Dahms 1978 haben unter Vergleich mit den Ergebnissen nach Walz 1972 umfangreiche Untersuchungen zur benötigten Wassermenge in Abhängigkeit von Sieblinie und Wasseranspruch der Zuschläge sowie der gewünschten Konsistenzklasse durchgeführt (siehe Abb. 7-7). Die Ergebnisse gelten nur für Zementgehalte kleiner als 330 kg/m^3 . Bei höheren Zementgehalten wird generell mehr Wasser benötigt. Die Untersuchungen wurden nur im Bereich der Konsistenzklassen F1 bis F3 gemacht. Unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen dem Ausbreitmaß und der Wassermenge werden die Linien für flüssigere Betone extrapoliert. Die tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse ist in Untersuchungen zum Ausbreitmaß des Frischbetons Tab. I 1 zu finden.

Mithilfe der Diagramme in Abb. 7-7 für die Sieblinien A, B und C mit einem Größtkorn von 8, 16 und 32 mm kann das Ausbreitmaß eines Frischbetons in Abhängigkeit von den Randbedingungen bestimmt werden. Außerdem kann eine Konsistenzänderung bei Entzug von Wasser aus der Frischbetonmischung errechnet werden.

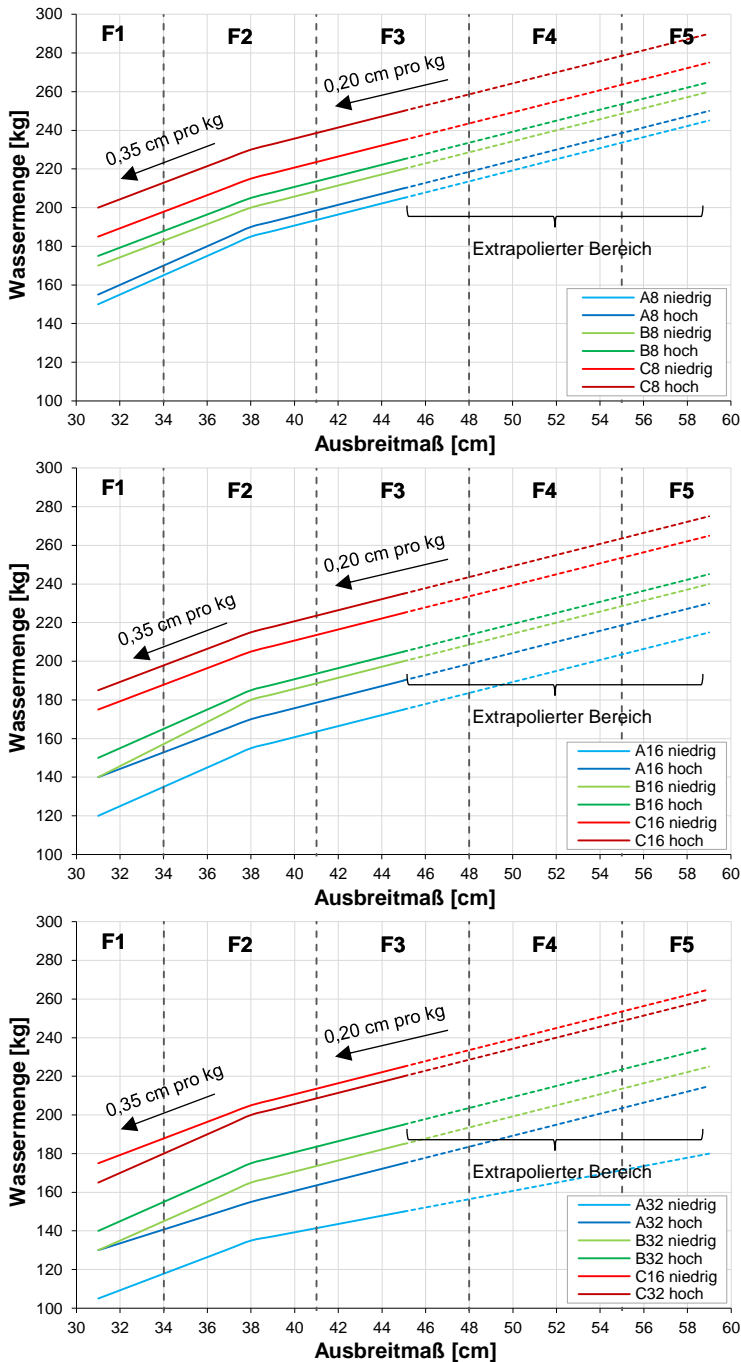


Abb. 7-7: Ausbreitmaß des Frischbetons in Abhängigkeit von der Sieblinie, dem Wasseranspruch der Zuschläge und der Wassermenge pro 1 m³ (Bonzel u. Dahms 1978)

Weitestgehend unabhängig von der Sieblinie und dem Wasseranspruch der Zuschläge kann aus den Versuchsdaten ein Reduktionsfaktor k_a für das Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Frischbetonkonsistenz ermittelt werden. Mit der Kenntnis über das ursprüngliche Ausbreitmaß des Frischbetons, der vom Dämmstoff entzogenen Wassermenge und der Dicke der Ortbetonergänzung kann das reduzierte Ausbreitmaß $a_{0,\text{red}}$ des Frischbetons bestimmt werden:

$$a_{0,\text{red}} = a_0 - k_a \cdot \frac{m_{\text{WA}}}{d_{\text{OB}}} \quad (7-1)$$

mit:

$a_{0,\text{red}}$	Reduziertes Ausbreitmaß
a_0	Ursprüngliches Ausbreitmaß
m_{WA}	Entzogene Wassermenge nach Gleichung (5-4)
k_a	Reduktionsfaktor für das Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Frischbetonkonsistenz nach Abb. 7-7
	0,35 cm/kg für F2
	0,20 cm/kg für F3, F4 und F5

Stellenweise ergeben sich für die Reduktionsfaktoren höhere Werte als 0,35 (für F2) oder 0,20 (für F3 bis F5), weshalb für beide Konsistenzbereiche der untere Grenzwert zur Sicherstellung eines konservativen Ansatzes gewählt wurde.

Im letzten Schritt muss der reduzierte Seitendruckbeiwert $\lambda_{0,\text{red}}$ in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Schalung errechnet werden. Umfangreiche Untersuchungen zum Seitendruckbeiwert in Abhängigkeit von der Betonsorte, Schalungsoberfläche und vertikalen Auflast wurden in *Specht 1973* gemacht. Es konnte festgestellt werden, dass der Seitendruckbeiwert des Frischbetons größtenteils unabhängig von der Rauheit der Schalungsoberfläche und der Höhe der Auflast auf den Frischbeton ist. Vielmehr besteht ein klarer Zusammenhang zum Wassergehalt und damit zum Ausbreitmaß des Frischbetons. Mithilfe von mehr als 150 Einzelmessungen konnte *Specht 1973* für eine starre Schalung einen Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Seitendruckbeiwert ermitteln (siehe Tab. 7-2 und Abb. 7-8). Für praktisch nachgiebige Schalung legte er als erste Näherung einen linearen Verlauf fest. Später im Zuge der Entwicklung der *DIN 18218* wurden dann weitaus konservativere Werte für den Seitendruckbeiwert λ_0 festgelegt (*Specht 1981*):

- $\lambda_0 = 0,08$ für F1
- $\lambda_0 = 0,16$ für F2
- $\lambda_0 = 0,22$ für F3
- $\lambda_0 = 0,27$ für F4

Diese haben im Vergleich zu den von Specht gemessenen Werten eine starke Reduktion des Frischbetondrucks zur Folge. Die günstige Annahme der Seitendruckbeiwerte wird damit begründet, dass in dem Modell der *DIN 18218* zum einen keine druckmindernden Einflüsse aus Reibung zwischen Frischbeton und Schalung (Silotheorie) berücksichtigt werden und zum anderen das bodenmechanische Grundmodell A verwendet wird, nach dem generell höhere Drücke als nach Grundmodell B entstehen (siehe Abb. 2-9).

Tab. 7-2: Experimentell ermittelte Seitendruckbeiwerte für starre Schalung aus *Specht 1973* und Rückrechnung der Werte für nachgiebige Schalung

Beton- sorte	Experimentell					Rechnung	
	Verdichtungsmaß c [-]	Ausbreit- maß a [cm]	λ_0 starr (Erdruehdruck)			Innerer Reibungs- winkel φ [°]	λ_0 nachgiebig (aktiver Druck)
			glatt	rau	Mittel		
B1	1,19	37,5	0,56	0,53	0,52	28,7	0,35
			0,54	0,48			
			0,51	0,48			
B5	1,43	31,0	0,10	0,06	0,08	66,9	0,04
			0,10	0,06			
			0,12	0,07			
B7	-	50,0	0,74	0,80	0,78	12,7	0,64
			0,75	0,81			
			0,77	0,81			

Rechnet man die Seitendruckbeiwerte aus *Specht 1973* für starre Schalung mithilfe der Gleichungen (2-3) und (2-4) in Seitendruckbeiwerte für nachgiebige Schalung (aktiver Erddruck) um, so resultiert daraus ungefähr Spechts lineare Annahme (siehe Abb. 7-8).

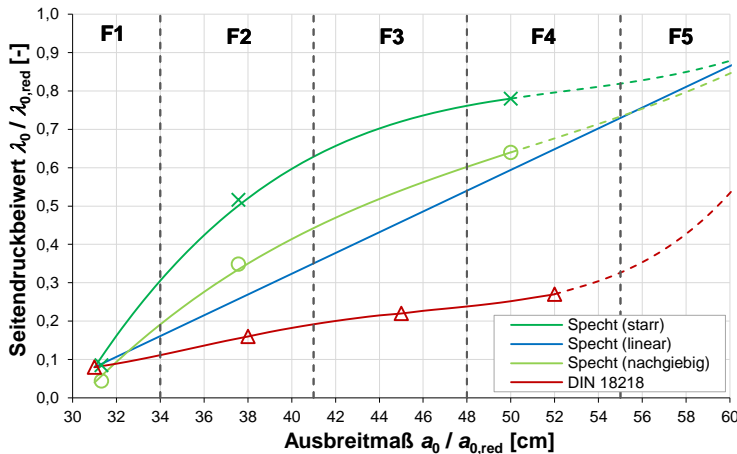


Abb. 7-8: Seitendruckbeiwert in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes des Frischbetons und der Steifigkeit der Schalung (*Specht 1973*, *DIN 18218*)

Mithilfe einer polynomischen Regressionsanalyse (*Fahrmeir u. a. 2009*) können für alle drei Fälle (starr, nachgiebig und *DIN 18218*) Polynomgleichungen ermittelt werden. Je höher dabei der Grad des Polynoms gewählt wird, desto besser beschreibt die Gleichung auch die vorhandenen Datenpunkte:

$$\lambda_{0,red} = z_4 \cdot a_{0,red}^4 + z_3 \cdot a_{0,red}^3 + z_2 \cdot a_{0,red}^2 + z_1 \cdot a_{0,red} + z_0 \tag{7-2}$$

- mit:
- $\lambda_{0,red}$ Reduzierter Seitendruckbeiwert
 - $a_{0,red}$ Reduziertes Ausbreitmaß nach (7-1)
 - $z_0 - z_4$ Faktoren zur Errechnung des Seitendruckbeiwerts.

Die Faktoren z_0 bis z_4 zur Errechnung der reduzierten Seitendruckbeiwerte in Abhängigkeit vom reduzierten Ausbreitmaß und den Annahmen zur Steifigkeit der Schalung sind in Tab. 7-3 gegeben.

Tab. 7-3: Faktoren zur Errechnung des Seitendruckbeiwerts in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes und den Annahmen zur Steifigkeit der Schalung

Annahme	z_4	z_3	z_2	z_1	z_0
DIN 18218	0,000002638	-0,000432997	0,026175385	-0,680956693	6,498557709
Starre Schalung	-	0,00005614	-0,00884823	0,47224599	-7,72885465
Nachgiebige Schalung	-	0,00003096	-0,00474343	0,26064399	-4,40392831

7.2.4 Dynamische Tiefenwirkung

In Abb. 7-9 sind die Einflussgrößen und Schritte zur rechnerischen Ermittlung des Wirkungsbereichs des Innenrüttlers bzw. der dynamischen Tiefenwirkung dargestellt.

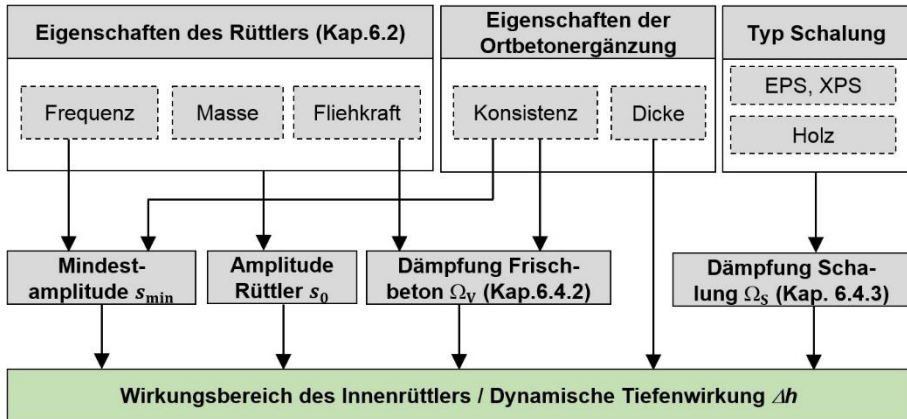


Abb. 7-9: Schritte zur rechnerischen Ermittlung der dynamischen Tiefenwirkung Δh

Bei der Berechnung der dynamischen Tiefenwirkung müssen folgende Einflussparameter berücksichtigt werden:

- Mindestamplitude s_{\min} im Frischbeton zur Sicherstellung einer vollständigen Verflüssigung
- Mittlere Schwingungsamplitude s_0 des Innenrüttlers
- Dämpfungskonstante des Frischbetons Ω_v
- Dämpfungskonstante der Schalung Ω_s
- Dicke der Ortbetonergänzung d_{OB}

Eine schematische Darstellung des Berechnungsablaufs ist in Abb. 7-10 dargestellt.

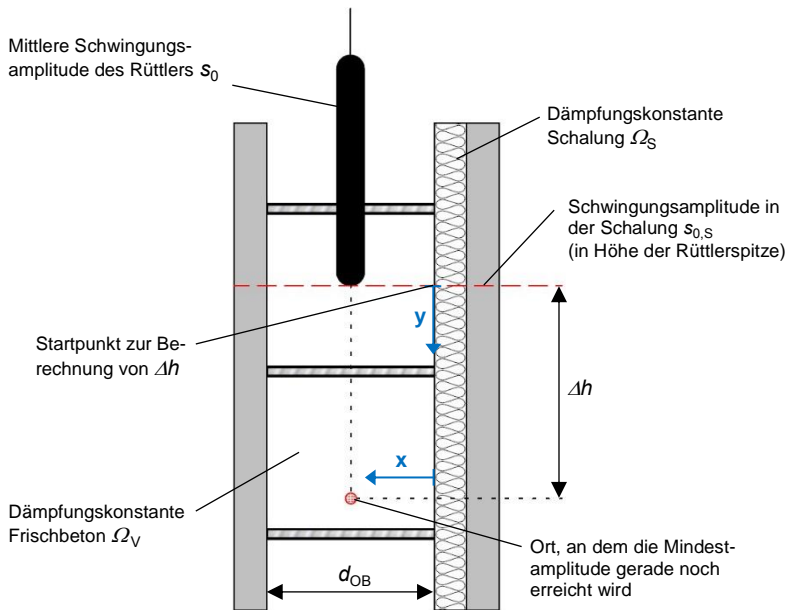


Abb. 7-10: Schematische Darstellung zur Berechnung der dynamischen Tiefenwirkung in einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff

Für den Laufweg einer Welle, verursacht durch Rüttelschwingungen, vom gekennzeichneten Startpunkt bis zum Ort, an dem die geforderte Mindestamplitude gerade noch erreicht wird, ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang:

$$s(x,y) = s_{0,S} \cdot e^{-\Omega_S \cdot y} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega_V \cdot x} \quad (7-3)$$

Mit den Annahmen, dass am Ort

$$x = \frac{1}{2} \cdot d_{OB}$$

und

$$y = \Delta h$$

gerade noch die Mindestamplitude s_{min} erreicht werden muss, gilt:

$$s\left(\frac{1}{2}d_{OB}, \Delta h\right) = s_{min} = s_{0,S} \cdot e^{-\Omega_S \cdot \Delta h} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \Omega_V \cdot \frac{1}{2} \cdot d_{OB}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{s_{min}}{s_{0,S}} \cdot e^{\frac{1}{4} \cdot \Omega_V \cdot d_{OB}} = e^{-\Omega_S \cdot \Delta h}$$

$$\Leftrightarrow \ln\left(\frac{s_{min}}{s_{0,S}}\right) + \frac{1}{4} \cdot \Omega_V \cdot d_{OB} = -\Omega_S \cdot \Delta h$$

$$\Leftrightarrow \Delta h = \frac{\ln\left(\frac{s_{min}}{s_{0,S}}\right) + \frac{1}{4} \cdot d_{OB} \cdot \Omega_V}{-\Omega_S} \quad (7-4)$$

mit: $s_{min} = \frac{a_{min}}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}$

mit: $a_{min} = 4g$ für F1 und F2 (siehe Abb. 6-6)
 $a_{min} = 2g$ für F3, F4 und F5 (siehe Abb. 6-6)

$$s_{0,S} = s_0 = \frac{F}{m_R \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2}$$

Ω_V nach Gleichung (6-32)

Ω_S nach Tab. 6-9 und Abb. 6-28

Eine Übersicht über die Größenordnung der dynamischen Tiefenwirkung liefert Abb. 7-12. Besonders auffällig ist der Sprung von Δh beim Übergang der Konsistenzklasse von F2 zu F3. Dieser ist mit dem simultanen Sprung der Mindestamplitude a_{min} zur vollständigen Verdichtung von Frischbeton zu erklären (siehe Abb. 6-6).

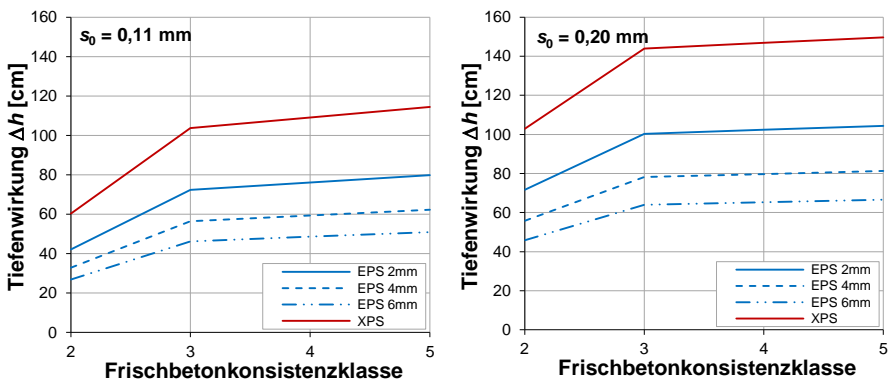


Abb. 7-11: Dynamische Tiefenwirkung in Abhängigkeit von der Schwingungsamplitude des Rüttlers, des Dämmstofftyps und der Konsistenzklasse des Frischbetons

Generell ist die dynamische Tiefenwirkung in einer Elementwand umso größer, je niedriger der mittlere Porendurchmesser des EPS ist. Beim Einsatz von XPS ist Δh am größten. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Erhöhung der Schwingungsamplitude des Rüttlers einen markanten Anstieg der dynamischen Tiefenwirkung mit sich bringt.

7.3 Darstellung des Berechnungsmodells

Das Modell zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff setzt sich aus drei Teilen zusammen:

1. Verwendung des bodenmechanischen Grundmodells B unter Voraussetzung einer nachgiebigen Schalung und unter Berücksichtigung der Verdichtungswirkung mit einem Innenrüttler (siehe Kapitel 7.2.2).
2. Berücksichtigung des reduzierten Seitendruckbeiwerts $\lambda_{0,\text{red}}$ infolge eines Zementleimentzugs durch EPS (kein Zementleimentzug durch XPS) unter Annahme einer nachgiebigen Schalung (siehe Kapitel 7.2.3).
3. Berücksichtigung des Wirkungsbereichs des Innenrüttlers mithilfe der dynamischen Tiefenwirkung Δh (siehe Kapitel 7.2.4).

Für die Anwendung des in Abb. 7-12 dargestellten Berechnungsmodells werden folgende Randbedingungen vorausgesetzt:

- Die Elementwand mit integriertem Dämmstoff ist lotrecht angeordnet.
- Die FT-Betonschalen der Elementwand sind ungerissen.
- Es wird ein Beton der Konsistenzklasse F2, F3, F4 oder F5 verwendet.
- Der Zementgehalt der Betonrezeptur beträgt weniger als 330 kg/m³.
- Das Größtkorn der Betonrezeptur beträgt zwischen 8 und 32 mm.
- Die im Modell angenommene Eintauchtiefe des Rüttlers wird eingehalten.
- Die maximale Fallhöhe des Frischbetons beträgt 2 m (*Beton 2013*).
- Die maximale Schüttlagenhöhe sollte 50 cm betragen (*Freimann 2005, Zilch u. a. 2011, DBV 2014, DIN 4235-2*).
- Der Innenrüttler muss beim Verdichtungsvorgang rasch in den Frischbeton bis in die tiefere, bereits verdichtete Lage mit mindestens 10 bis 20 cm Überschneidung eingetaucht werden (*Zilch u. a. 2011, DIN 4235-2*).
- Es wird ein Innenrüttler der Rüttlergruppe 1 nach *DIN 4235-1* verwendet, da diese zur Verdichtung feingliedriger Bauteile wie Wände geeignet sind (*Zilch u. a. 2011*). Der Einsatz von leistungsstärkeren Rüttlern ist nicht zulässig.
- Beim Einsatz eines Dämmstoffs aus EPS beträgt dessen mittlere Porengröße zwischen 2 und 6 mm.

Die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, dass die Beeinflussung des Frischbetondrucks durch einen Dämmstoff erst bei hohen Bauteilen stattfindet. Die Übergangshöhe h_U zwischen niedrigem und hohem Bauteil ist von den gegebenen Einflussparametern abhängig und liegt im Bereich des maximalen Frischbetondrucks $\sigma_{h,max}$. Ab dieser Betonierhöhe ist ein großer Unterschied zwischen dem wirklich vorhandenen und dem nach *DIN 18218* angenommenen Frischbetondruck festzustellen.

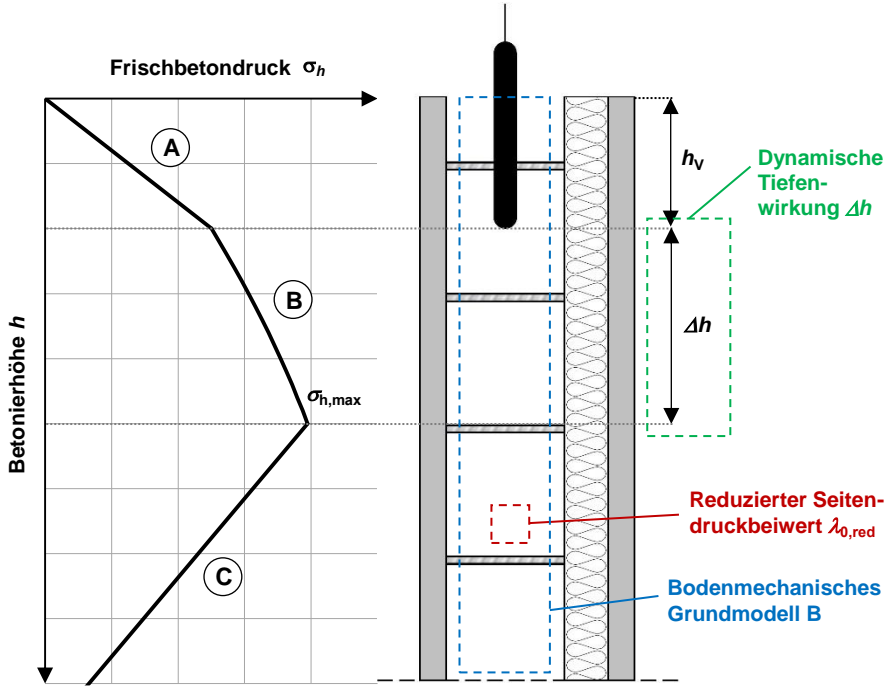


Abb. 7-12: Grafische Darstellung des Modells zur Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff

Die Berechnung des Verlaufs der Frischbetondruckbeanspruchung wird in drei Bereiche unterteilt.

Bereich A ($0 \leq h \leq h_v$)

Der Bereich A verläuft von der Oberkante des Frischbetonspiegels bis zur Eintauchtiefe bzw. Spitze des Rüttlers h_v . Aufgrund der vollständigen Verflüssigung des Frischbetons durch die Rüttleinwirkung entsteht in diesem Bereich hydrostatischer Frischbetondruck:

$$\sigma_{h,1} = \gamma_{OB} \cdot h \tag{7-5}$$

Bereich B ($h_V < h \leq h_V + \Delta h$)

Der Bereich B beschreibt die Umgebung der dynamischen Tiefenwirkung Δh , d. h. von der Spitze des Innenrüttlers bis zur Tiefe $h_V + \Delta h$:

$$\begin{aligned}\sigma_{h,2} &= \gamma_{OB} \cdot \lambda_{0,\text{red}} \cdot \left(h - \frac{h^2}{v \cdot t_E} \right) - \gamma_{OB} \cdot \lambda_{0,\text{red}} \cdot \left(h_V - \frac{h_V^2}{v \cdot t_E} \right) + \gamma_{OB} \cdot h_V \\ &= \gamma_{OB} \cdot \lambda_{0,\text{red}} \cdot \left(h - \frac{h^2}{v \cdot t_E} - h_V + \frac{h_V^2}{v \cdot t_E} \right) + \gamma_{OB} \cdot h_V\end{aligned}\quad (7-6)$$

mit: $\lambda_{0,\text{red}}$ Reduzierter Seitendruckbeiwert nach Gleichung (7-2)

Das Maximum des horizontalen Frischbetondrucks entsteht an der Stelle $h_V + \Delta h$:

$$\begin{aligned}\sigma_{h,\text{max}} &= \gamma_{OB} \cdot \lambda_{0,\text{red}} \cdot \left(h_V + \Delta h - \frac{(h_V + \Delta h)^2}{v \cdot t_E} - h_V + \frac{h_V^2}{v \cdot t_E} \right) + \gamma_{OB} \cdot h_V \\ &= \gamma_{OB} \cdot \lambda_{0,\text{red}} \cdot \left(\Delta h - \frac{h_V^2 + 2 \cdot h_V \cdot \Delta h + \Delta h^2}{v \cdot t_E} + \frac{h_V^2}{v \cdot t_E} \right) + \gamma_{OB} \cdot h_V \\ &= \gamma_{OB} \cdot \lambda_{0,\text{red}} \cdot \left(\Delta h - \frac{2 \cdot h_V \cdot \Delta h + \Delta h^2}{v \cdot t_E} \right) + \gamma_{OB} \cdot h_V\end{aligned}\quad (7-7)$$

mit: Δh Dynamische Tiefenwirkung nach Gleichung (7-4)

Bereich C ($h_V + \Delta h < h \leq h_E$)

Der Bereich C reicht vom Ort des maximalen Drucks an der Stelle $h_V + \Delta h$ bis zur Höhe bei Erreichen des Erstarrungsendes des Frischbetons h_E :

$$\sigma_{h,3} = \sigma_{h,\text{max}} \cdot \frac{h - h_E}{h_V + \Delta h - h_E} \quad (7-8)$$

Beim Erreichen der Höhe h_E wird angenommen, dass sich der Frischbetondruck vollständig abgebaut hat. Für den Druckabbau in Bereich C wird ein linearer Verlauf angenommen. Da eine Elementwand mit integriertem Dämmstoff jedoch nicht starr sondern nachgiebig ist, findet kein vollständiger Lastabfall bei Erreichen des Erstarrungsendes statt (DAfStb 567). Das Verbleiben eines gewissen Frischbetondruckanteils in den Verbindungsmitteln konnte bereits in Pahn 2011 bestätigt werden.

Die Regeln zur Berücksichtigung der Frischbetontemperatur beim Einbau, der Außenlufttemperatur und der Verdichtung können analog zur DIN 18218 übernommen werden (siehe Kapitel 2.3.2.1).

7.4 Verifikation und Validierung des Berechnungsmodells

Die zu lösende Problemstellung dieser Arbeit ist die realitätsnahe Beschreibung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff (siehe Abb. 7-13). Im Rahmen der theoretischen und experimentellen Untersuchungen werden Theorien zur Problemlösung formuliert (Formalisierung) und zugehörige Anforderungen und Randbedingungen abgeleitet. Diese werden anschließend in das in Kapitel 7.3 vorgestellte Berechnungsmodell implementiert. Durch den Abgleich des Modells mit den geforderten Anforderungen und Randbedingungen wird dieses verifiziert. Verifikation bedeutet im Allgemeinen der „Nachweis der Korrektheit des Simulationsmodells“ (VDI 3633, Rabe u. a. 2008).

Im letzten Schritt wird geprüft, ob das hergeleitete Berechnungsmodell die Realität auch ausreichend widerspiegelt und zur Lösung der Problemstellung führt. Die sog. Validierung wird als „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Originalsystem“ bezeichnet (VDI 3633, Rabe u. a. 2008).

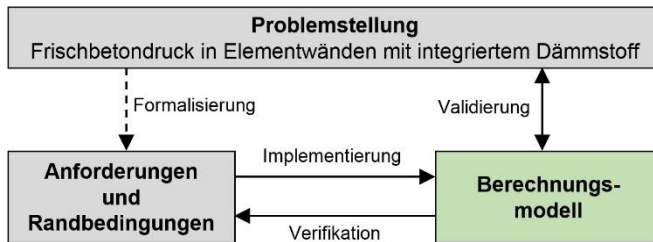


Abb. 7-13: Verifikation und Validierung eines Berechnungsmodells

Zur Validierung des Berechnungsmodells werden weitere, großformatige Betoneversuche an hohen Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus EPS durchgeführt (siehe Kapitel 7.4.1 bis 7.4.3). Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung werden in Anlehnung an die Untersuchungen in Kapitel 3.6 konzipiert, welche ebenfalls im Rahmen der Modellvalidierung nachgerechnet werden (siehe Kapitel 7.4.4). In Kapitel 7.5 werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf die Empfehlungen für die Bemessung in der Praxis gegeben.

7.4.1 Versuchsprogramm, Messtechnik und Versuchsdurchführung (HEII)

Die Versuchsreihe beinhaltet sechs Elementwände mit einer Höhe von 320 cm, einer Breite von 80 cm und Verbindungsmitteln aus GFK in einem Raster von 40 x 40 cm (siehe Tab. 7-4). Die Dicke des Dämmstoffs und des Ortbetons beträgt bei allen Versuchen 100 mm.

Im direkten Vergleich stehen zwei verschiedene EPS-Dämmstoffe mit unterschiedlichem Porendurchmesser und unterschiedlicher Rohdichte (Dämmstoffe M und O, siehe Tab. 4-5). Die zweite Schalungsoberfläche aus Beton ist, wie bei Elementwänden üblich, rau ausgeführt. Die Wände werden im Versuch mit einer Geschwindigkeit von 0,8 bzw. 1,6 m/h ausbetoniert. Außerdem werden zwei verschiedenen Frischbetone mit den Konsistenzklassen F2 (w/z -Wert = 0,42) und F5

(w/z-Wert = 0,63) verwendet. Die im Rahmen der Versuche verwendeten Betonrezepturen sind in Tab. F 7 von Anhang F hinterlegt.

Tab. 7-4: Versuchsprogramm zur Validierung des Berechnungsmodells (HEII)

Nr.	1.Schalung (Dämmstoff aus EPS)			2.Schalung	Frischbeton		Betonier- geschwindigkeit [m/h]
	Bez.	Porendurch- messer [mm]	Rohdichte [kg/m³]		Konsistenz- klasse	w/z- Wert [-]	
HEII01	O	4,26	12,8	Beton rau	F5	0,63	0,8
HEII02					F2	0,42	1,6
HEII03					F5	0,63	0,8
HEII04	M	2,11	28,3		F2	0,42	1,6
HEII05					F5	0,63	0,8
HEII06					F2	0,42	1,6

Die Messung des Frischbetondrucks findet indirekt über DMS an den Verbindungsmitteln statt (siehe Messkonzept nach Kapitel 3.5.1). Insgesamt werden über die Bauteilhöhe 14 DMS pro Elementwand angeordnet, sodass der Frischbetondruckverlauf über die Bauteilhöhe möglichst genau erfasst wird. Die übrigen Verbindungsmittel werden ohne DMS eingebaut (siehe Abb. 7-14).

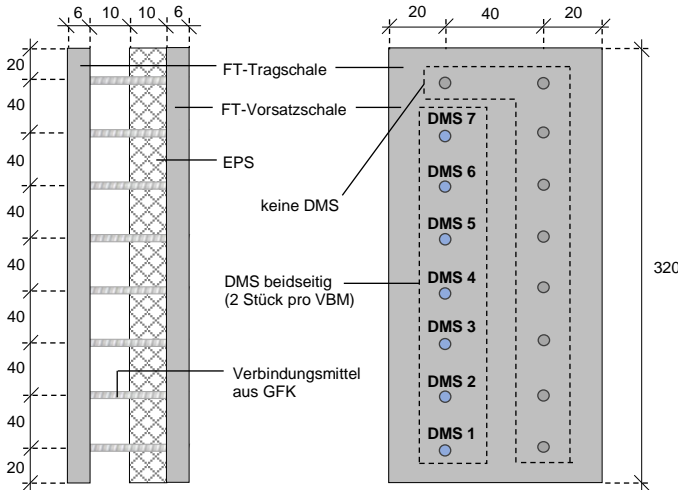


Abb. 7-14: Querschnitt (links) und Ansicht (rechts) der hohen Elementwände HEII01 bis HEII06

Nach Herstellung der Elementwände werden diese auf eine Teflonunterlage aufgestellt und vertikal ausgerichtet. Anschließend werden die Anschlusskabel der DMS aus den Wänden herausgeführt und fixiert. Nach dem Anbringen eines seitlichen Dichtungsbandes wird die Schalung mithilfe von Querhölzern und Gewindestangen angebracht (siehe Abb. 3-19).

Jede Wand wird unter Sicherstellung gleicher Randbedingungen und Berücksichtigung der Vorgaben der DIN 4235-2 nach einem festgelegten Zeitplan ausbetoniert. Das Ausbetonieren der Wände erfolgt in sechs Chargen mit einer Betonierlagenhöhe von je ca. 54 cm. Vor Einfüllen jeder Charge wird das Ausbreitmaß des Frischbetons

ermittelt. Nach dem Einfüllen wird die Höhe des Betonspiegels gemessen und der Beton verdichtet. Die Verdichtung findet immer gleich lang und nach gleichem Muster statt. Die Eintauchtiefe des Innenrüttlers wird dabei so gewählt (zwischen 55 und 85 cm), dass gerade eine Verbindung mit der vorherigen Charge erreicht wird (siehe Anforderungen nach *DIN 4235-2*). Nach dem Verdichtungsvorgang wird die Höhe des Betonspiegels erneut gemessen.

7.4.2 Versuchsergebnisse (HEII)

Die Kurven in Abb. 7-15 zeigen exemplarisch den zeitlichen Verlauf des Frischbetondrucks während der Durchführung von Versuch HEII05 an allen Messstellen der Elementwand. Auch bei dieser Versuchsreihe ist beim Verdichten von jeder der sechs Chargen eine schlagartige Erhöhung des Frischbetondrucks zu verzeichnen. Nach Beendigung eines Verdichtungsvorgangs kann ein Druckabfall beobachtet werden. Die zeitlichen Verläufe des Frischbetondrucks der Versuche HEII01 bis HEII06 sind in Anhang J hinterlegt.

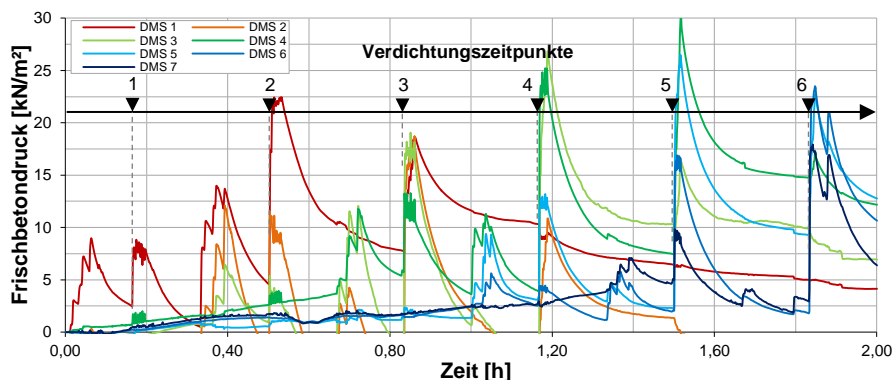


Abb. 7-15: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks bei Versuch HEII05

Aus den zeitlichen Verläufen kann für jede Messstelle und jeden Verdichtungsvorgang der maximale Frischbetondruck ermittelt werden.

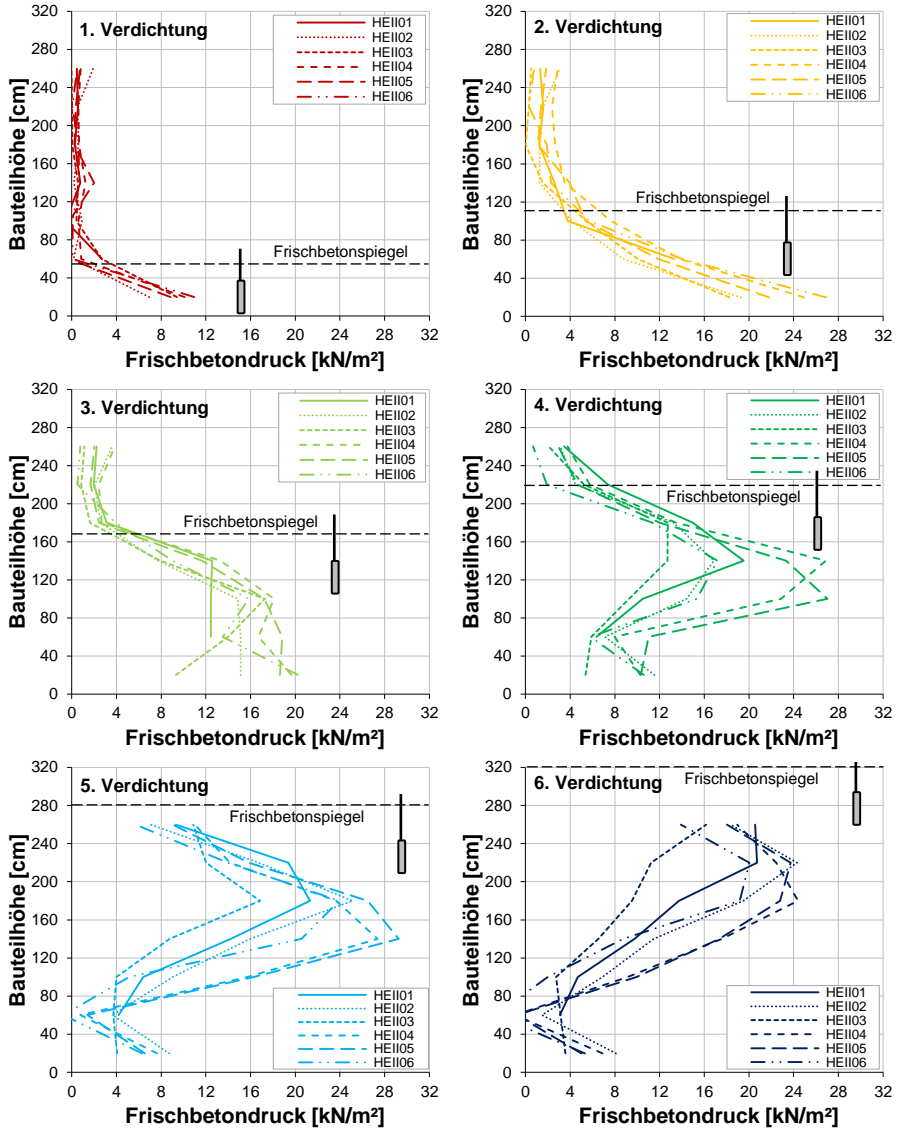


Abb. 7-16: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe für alle sechs Verdichtungs-vorgänge (Betonchargen) bei den Versuchen HEI101 bis HEI106

Aufgrund der im Rahmen der Modellentwicklung erlangten Erkenntnisse können folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Der Drucksprung von unverdichtetem zu verdichtetem Beton fällt bei steiferen Betonen höher aus als bei weicheren Betonen (siehe Abb. J 1 bis Abb. J 6 in Anhang J).
- Der Druckabfall nach Beendigung der Verdichtungsvorgänge ist bei Dämmstoffen mit kleinen Poren (Dämmstoff M) deutlich ausgeprägter als bei Dämmstoffen mit großen Poren (Dämmstoff O) (siehe Abb. J 1 bis Abb. J 6 in Anhang J).
- Während der Verdichtung der ersten beiden Betonchargen bis zu einer Betonierhöhe von ca. 110 cm entsteht ein nahezu linearer Druckverlauf. Dieser entspricht dem hydrostatischen Druckverlauf. Zwischen den einzelnen Versuchen ist kein nennenswerter Unterschied festzustellen.
- Aufgrund des statischen Systems und den Steifigkeitseigenschaften der Elementwände wird bereits bei niedrigen Betonierhöhen in Verbindungsmitteln oberhalb des Frischbetonspiegels eine Dehnung gemessen.
- Ab der dritten Betoncharge wird der Frischbetondruck durch den integrierten Dämmstoff beeinflusst. Der Übergang von einem hydrostatischen zu einem nichtlinearen Druckverlauf wird als Übergangshöhe $h_{Ü}$ zwischen einem niedrigen und hohen Bauteil bezeichnet.
- Das Druckmaximum während eines Verdichtungsvorgangs entsteht beim Einsatz des kleinporigen Dämmstoffs M in größerem Abstand zur Rüttlerspitze als beim großporigen Dämmstoff O (unterschiedliche dynamische Tiefenwirkung Δh).
- Bei dem Dämmstoff mit kleinen Poren (Dämmstoff M) entstehen generell höhere Drücke als bei einem Dämmstoff mit großen Poren (Dämmstoff O).
- Beim Einsatz von steiferen Betonen reduziert sich der maximale Frischbetondruck im Vergleich zum Einsatz von weicheren Betonen.
- Im Fußpunkt der Elementwände ist ein Abknicken des Druckabfalls zu beobachten, der auf die Auflagerungsbedingung am Fußpunkt zurückzuführen ist (Reibung zwischen FT-Betonschale und Boden).

Die Zusammenstellung aller Versuchsdaten inklusive Ausbreitmaße, Eintauchtiefen des Rüttlers, mittlere Frischbetonrohdsichten, Erstarrungszeiten sowie der maximalen Frischbetondrücke beim Verdichten jeder Betoncharge befindet sich in Anhang J.

7.4.3 Nachrechnung der Versuchsreihe HEII

Die im vorherigen Kapitel dargestellten Frischbetondruckverläufe über die Bauteilhöhe werden mit dem in Kapitel 7.3 vorgestellten Berechnungsmodell im Folgenden nachgerechnet. Abb. 7-17 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen dem im Versuch gemessenen Druck, dem mit dem Berechnungsmodell ermittelten Druck und dem Druck nach *DIN 18218* für alle sechs Verdichtungsvorgänge bei Versuch HEII05. Die restlichen Nachrechnungen sind in Anhang J zu finden.

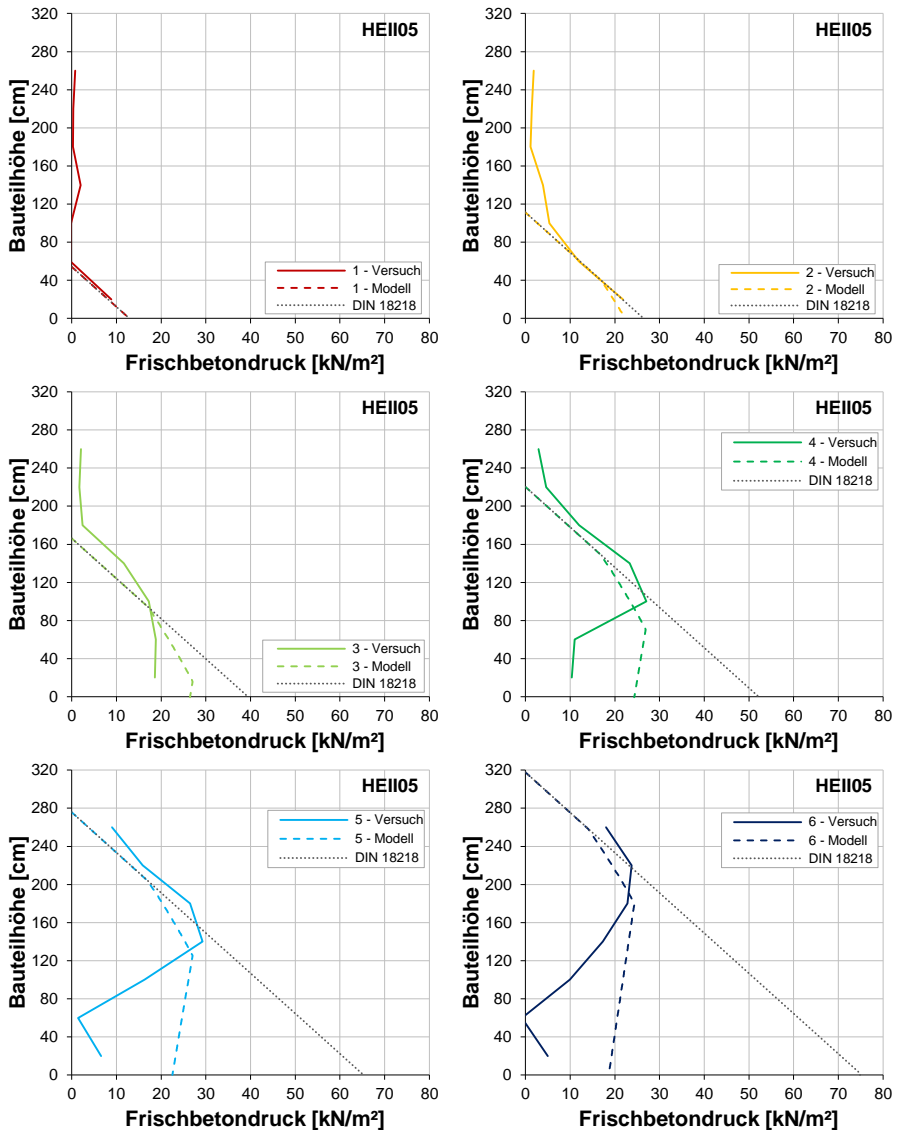


Abb. 7-17: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach *DIN 18218* ermittelten Druck für alle sechs Verdichtungsvorgänge bei HEI105

Die Ergebnisse zeigen, dass der maximale Frischbetondruck für jeden Verdichtungsvorgang mithilfe des Berechnungsmodells sehr gut ermittelt werden kann. Räumlich gesehen liegt der errechnete Frischbetondruck meist knapp unter dem gemessenen Frischbetondruck. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Messung aufgrund des vorgegebenen Verbindungsmittelrasters nur im Abstand von 40 cm stattfinden konnte. Der maximale Frischbetondruck tritt fast immer zwischen zwei Messstellen auf, wodurch sich zum einen die Höhe des maximalen Frischbetondrucks und zum anderen dessen räumliche Lage verändern können. Der Abfall des Drucks unterhalb des Maximums erfolgt im Versuch schneller als nach der Modellvorstellung.

Dies kann mit der hohen Nachgiebigkeit aufgrund des innen liegenden Dämmstoffs begründet werden. Im Versuch ist zusätzlich am Fußpunkt der Elementwand ein Abknicken des Druckabfalls zu verzeichnen, was auf die Reibung zwischen FT-Betonschale und deren Aufstandsfläche zurückzuführen ist. Der errechnete Druckverlauf über die Bauteilhöhe „umrahmt“ den gemessenen Druckverlauf und liegt somit auf der sicheren Seite, da die angenommene Gesamtbelastung des Wandbauteils stets höher ist als die in Realität vorhandene Gesamtbelastung. Diese entspricht dem Integral des Frischbetondrucks über die Bauteilhöhe. Insgesamt kann eine sehr gute Übereinstimmung der Rechenwerte mit den Messergebnissen festgestellt werden.

Die Eingangswerte für die Versuchsnachrechnung sind in Tab. 7-5 abgebildet. Diese dienen zur Verifikation des Modells. Folgende Tatsachen unterstützen die Korrektheit des Berechnungsmodells:

- Ein kleinporiger Dämmstoff entzieht dem Frischbeton mehr Wasser als ein großporiger Dämmstoff.
- Beim Einsatz des gleichen Dämmstoffs wird aus einem Frischbeton mit niedrigem w/z-Wert weniger Wasser entzogen als bei einem hohen w/z-Wert.
- Der Seitendruckbeiwert des Frischbetons verringert sich bei einem größeren Wasserentzug prozentual mehr als bei einem kleineren Wasserentzug.
- Die dynamische Tiefenwirkung ist bei kleinporigen Dämmstoffen höher als bei großporigen Dämmstoffen.
- Die dynamische Tiefenwirkung ist bei steifen Betonen geringer, da eine höhere Beschleunigung notwendig ist, um den Beton zu verflüssigen.

Tab. 7-5: Eingangswerte für die Nachrechnung der Versuchsergebnisse – Teil 1

Nr.	Wasserentzug m_{WA}/d_{OB} [kg/m ³]	Seitendruckbeiwert		w/z-Wert		Dynamische Tiefenwirkung Δh [cm]
		λ_0	$\lambda_{0,red}$	vorher	nachher	
HEII01	8,15	0,74	0,68	0,63	0,60	57,6
HEII02	8,15	0,79	0,73	0,63	0,60	60,5
HEII03	3,88	0,31	0,28	0,42	0,41	31,9
HEII04	11,60	0,89	0,79	0,63	0,59	78,6
HEII05	11,60	0,80	0,72	0,63	0,59	78,6
HEII06	7,33	0,49	0,42	0,42	0,40	71,3

Abb. 7-18 zeigt den Vergleich zwischen dem gemessenen und dem nach *DIN 18218* errechneten Frischbetondruck in Abhängigkeit von der Betonierhöhe. Bei niedrigen Betonierhöhen, d. h. bei Betoncharge 1 und 2, liegen die gemessenen Drücke fast immer geringfügig über den nach *DIN 18218* berechneten Drücken. Die *DIN 18218* befindet sich demnach bei niedrigen Bauteilen sogar eher auf der unsicheren Seite. Im Bereich der sog. Übergangshöhe $h_{Ü}$, welche sich aus der Summe der Eintauchtiefe des Rüttlers h_V und der dynamischen Tiefenwirkung Δh ergibt und sich bei den Versuchen HEII01 bis HEII06 zwischen 105 und 150 cm bewegt, liefert die *DIN 18218* zunehmend auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Je nach Randbedingungen liegt dann der in Realität vorhandene Frischbetondruck bei 34 bis 64 % des Drucks nach *DIN 18218*. Aus wirtschaftlicher Sicht sind solch hohe Differenzen in Frage zu stellen, woraus sich erneut die absolute Notwendigkeit eines realitätsnahen Berechnungsmodells Bauteile ableitet.

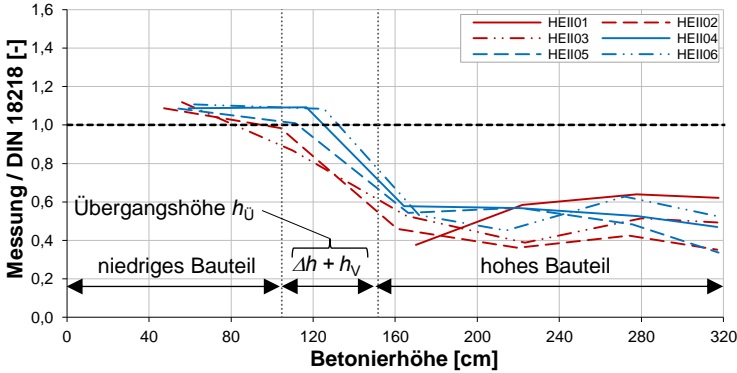


Abb. 7-18: Vergleich des gemessenen Drucks mit dem nach *DIN 18218* errechneten Druck in Abhängigkeit von der Betonierhöhe (HEII01 bis HEII06)

Vergleicht man die im Versuch gemessenen Drücke mit den mit dem Modell aus Kapitel 7.3 errechneten Drücken, so kann eine deutlich bessere Übereinstimmung festgestellt werden. Zu Beginn (bei niedrigen Bauteilen) kann, analog zur *DIN 18218*, eine Überschreitung des errechneten Frischbetondrucks beobachtet werden. Der Grund hierfür ist, dass das hergeleitete Berechnungsmodell bei niedrigen Betonierhöhen ebenfalls auf einem hydrostatischen Ansatz beruht. Nach Erreichen der Übergangshöhe $h_{\text{Ü}}$ liegt das Berechnungsmodell auf der sicheren Seite. Kurz vor Erreichen des maximalen Füllstands liegen die gemessenen Drücke teilweise wieder etwas höher als die errechneten Drücke, was auch auf die Systemsteifigkeit der Elementwand zurückzuführen ist (siehe Kapitel 3.2). Generell kann bei großporigen Dämmstoffen im Vergleich zu kleinporigen Dämmstoffen eine höhere Sicherheit festgestellt werden. Trotzdem weist das neue Berechnungsmodell für hohe Bauteile noch immer eine höhere Zuverlässigkeit auf, als die *DIN 18218* für niedrige Bauteile.

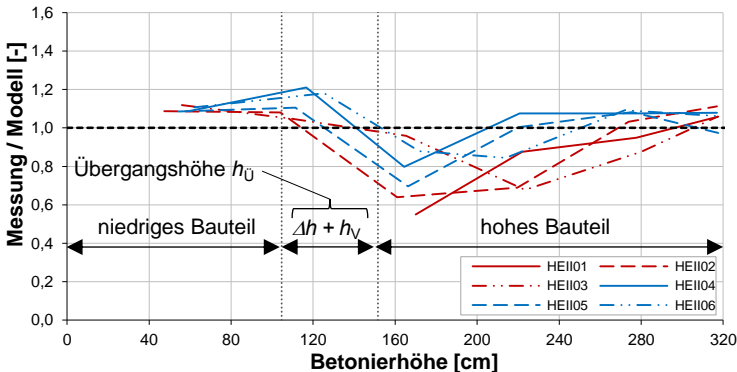


Abb. 7-19: Vergleich des gemessenen Drucks mit dem nach dem Berechnungsmodell ermittelten Druck in Abhängigkeit von der Betonierhöhe (HEII01 bis HEII06)

7 Realitätsnahes Modell zur Berechnung des Frischbetondrucks

Vergleicht man das Berechnungsmodell mit der *DIN 18218*, so ist mit steigender Betonierhöhe auch ein stetiger Zuwachs der Druckunterschiede zu verzeichnen (siehe Abb. 7-20). Bei hohen Bauteilen wird mit dem Berechnungsmodell eine starke Reduktion der angenommenen Frischbetondruckbelastung im Vergleich zur *DIN 18218* beschrieben.

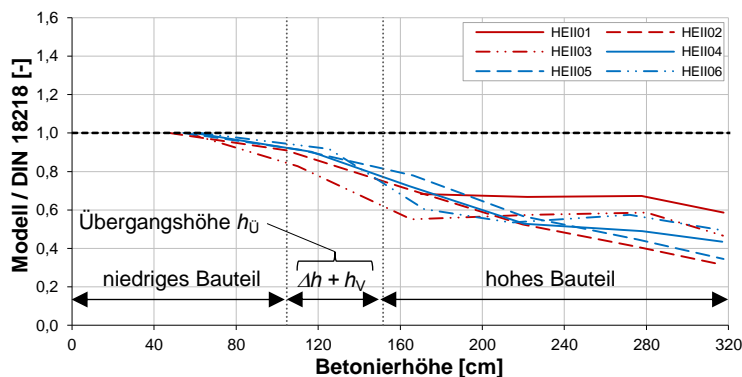


Abb. 7-20: Vergleich des errechneten Drucks mit dem Berechnungsmodell mit dem Druck nach *DIN 18218* (HEII01 bis HEII06)

Die Zusammenstellung aller Mess- und Rechenwerte ist in Tab. 7-6 gegeben.

Tab. 7-6: Zusammenstellung der gemessenen, der nach dem Berechnungsmodell und der nach *DIN 18218* ermittelten Frischbetondrücke in kN/m^2 von HEII01 bis HEII06

Versuchsnummer		Betoncharge					
		1	2	3	4	5	6
HEII01	Messung	2,73	13,30	12,56	19,52	21,33	20,73
	Modell	8,20	18,90	22,81	22,28	22,46	19,57
	<i>DIN 18218</i>	8,20	21,34	33,37	33,37	33,37	33,37
	Messung / Modell	0,33 *)	0,70 *)	0,55	0,88	0,95	1,06
HEII02	Messung	6,93	19,30	15,12	16,86	25,15	24,32
	Modell	6,38	17,85	23,61	24,45	24,34	21,86
	<i>DIN 18218</i>	6,38	19,59	32,89	46,57	59,24	69,27
	Messung / Modell	1,09	1,08	0,64	0,69	1,03	1,11
HEII03	Messung	9,43	18,26	17,31	12,74	16,86	16,17
	Modell	8,42	17,42	18,06	18,80	19,24	15,26
	<i>DIN 18218</i>	8,42	21,06	32,76	32,76	32,76	32,76
	Messung / Modell	1,12	1,05	0,96	0,68	0,88	1,06
HEII04	Messung	10,10	24,95	19,68	26,89	27,37	24,40
	Modell	9,28	20,61	24,69	24,99	25,43	22,63
	<i>DIN 18218</i>	9,28	22,84	34,09	47,39	51,96	51,96
	Messung / Modell	1,09	1,21	0,80	1,08	1,08	1,08
HEII05	Messung	8,83	21,83	18,83	27,03	29,25	23,74
	Modell	8,13	19,74	27,04	26,90	27,02	24,37
	<i>DIN 18218</i>	8,13	21,64	34,67	47,46	60,57	70,53
	Messung / Modell	1,09	1,11	0,70	1,00	1,08	0,97
HEII06	Messung	10,97	26,92	20,26	17,18	23,93	20,05
	Modell	9,90	22,79	23,02	20,35	21,90	18,86
	<i>DIN 18218</i>	9,90	24,84	38,11	38,11	38,11	38,11
	Messung / Modell	1,11	1,18	0,88	0,84	1,09	1,06

*) Nicht verwendbar durch Ausfall von DMS 1

7.4.4 Nachrechnung der hohen Elementwände (HE) aus Kapitel 3.6

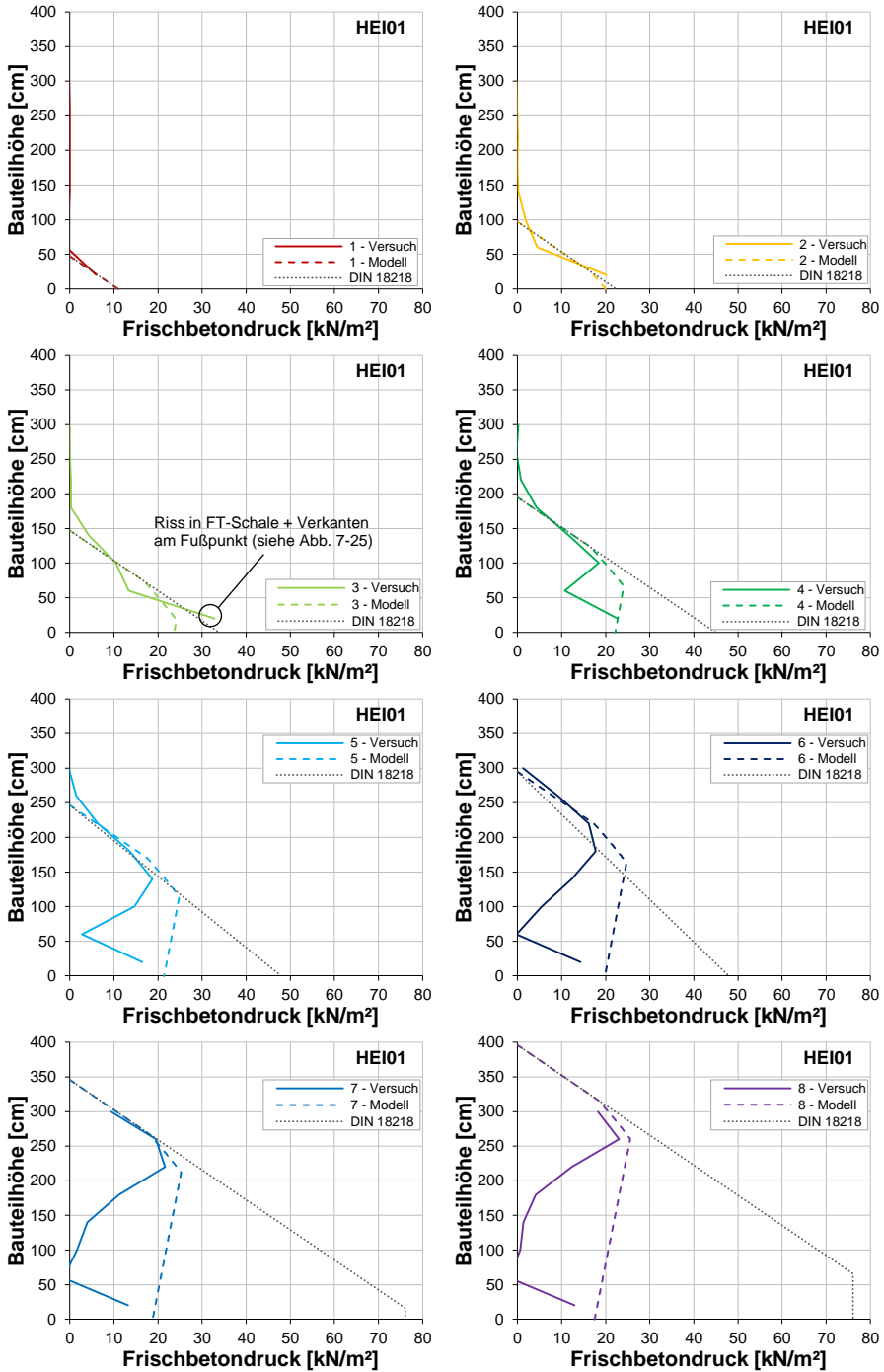


Abb. 7-21: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach DIN 18218 ermittelten Druck für alle acht Verdichtungs Vorgänge bei HEI01

Zur Validierung des Berechnungsmodells eignen sich neben den Versuchen HEI101 bis HEI106 auch die bereits in Kapitel 3.6 durchgeführten Untersuchungen an hohen Elementwänden. Abb. 7-21 zeigt die Nachrechnung des Versuchs HE01 (EPS) für alle acht Verdichtungsvorgänge. Zusätzlich ist der errechnete Frischbetondruckverlauf nach *DIN 18218* eingezeichnet. Die grafische Darstellung der Nachrechnung der Versuche HE02 (XPS) und HE03 (Holz) ist in Anhang J zu finden. Die Eingangswerte für die Versuchsnachrechnung sind in Tab. 7-7 gegeben.

Tab. 7-7: Eingangswerte für die Nachrechnung der Versuchsergebnisse – Teil 2

Nr.	Wasserentzug m_{WA}/d_{OB} [kg/m ³]	Seitendruckbeiwert		w/z-Wert		Dynamische Tiefenwirkung Δh [cm]
		λ_0	$\lambda_{0,red}$	vorher	Nachher	
HE01	7,07	0,78	0,73	0,64	0,61	56,0
HE02	-	0,75	-	0,64	-	114,5
HE03	-	0,78	-	0,64	-	151,0

Auch für diese Elementwand mit integriertem Dämmstoff aus EPS (HE01) beschreibt das Modell sowohl den maximalen Frischbetondruck als auch den Verlauf der Frischbetondruckbeanspruchung über die Bauteilhöhe sehr gut. Bei ansteigender Betonierhöhe nimmt auch hier der Unterschied zwischen den Annahmen der *DIN 18218* und den gemessenen Drücken immer mehr zu (siehe Abb. 7-22). Der relativ hohe Druck bei der 3. Verdichtung ist auf einen Riss in der FT-Vorsatzschale zurückzuführen und wird am Ende dieses Kapitels erklärt. Bei Erreichen der Übergangshöhe wird die Berechnung nach *DIN 18218* zunehmend konservativ.

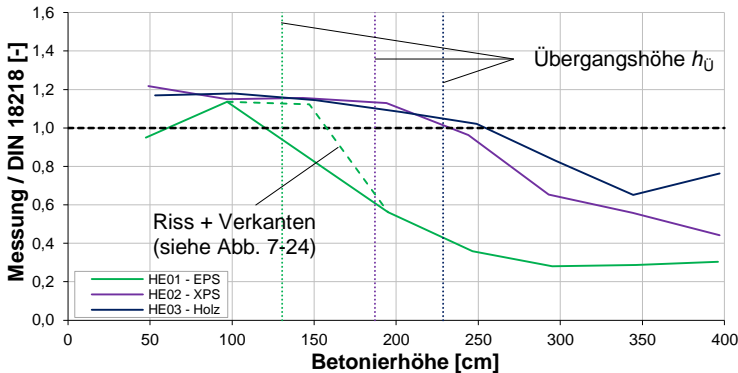


Abb. 7-22: Vergleich des gemessenen Drucks mit dem nach *DIN 18218* errechneten Druck in Abhängigkeit von der Betonierhöhe (HE01 bis HE03)

Aufgrund der größeren dynamischen Tiefenwirkung bei einem integrierten Dämmstoff aus XPS oder Holzschalung wird dort die Übergangshöhe erst bei höheren Betonierständen erreicht. Zudem liegen die gemessenen Frischbetondrücke bei HE02 und HE03 im Vergleich zu HE01 viel näher an den berechneten Werten nach *DIN 18218*. Das Berechnungsmodell lässt sich in der Theorie auch für einen integrierten Dämmstoff aus XPS oder Holzschalung anwenden. Beim Vergleich der Messwerte mit den nach dem Modell errechneten Werten (siehe Abb. 7-23) zeigt sich jedoch, dass das Berechnungsmodell selbst bei großen Betonierhöhen stets auf der unsicheren Seite liegt. Beim Einsatz von XPS (HE02) stimmen erst bei sehr großen

Betonierhöhen Messung und Modell überein. Folgende Gründe können hierfür verantwortlich sein:

- Der in HE02 verwendete XPS entspricht nicht dem XPS aus den Untersuchungen in Kapitel 6. Die in der Berechnung verwendete Dämpfungskonstante des XPS-Dämmstoffs ist vermutlich zu niedrig.
- Die dynamische Tiefenwirkung von Holzschalung hängt maßgeblich von der Steifigkeit der Schalung ab, da Holz eine sehr hohe Schwingungsanfälligkeit besitzt. Veränderungen in der Tragkonstruktion der Schalung führen ebenfalls zu veränderten Dämpfungskonstanten. Diese ist vermutlich bei HE03 ebenfalls zu niedrig angesetzt worden.

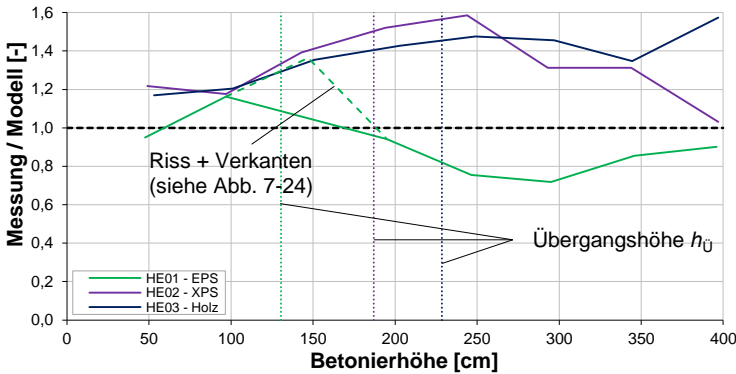


Abb. 7-23: Vergleich des gemessenen Drucks mit dem nach dem Berechnungsmodell ermittelten Druck in Abhängigkeit von der Betonierhöhe (HE01 bis HE03)

Die Zusammenstellung aller Mess- und Rechenwerte ist in Tab. 7-8 gegeben.

Tab. 7-8: Zusammenstellung der gemessenen, der nach dem Berechnungsmodell und der nach DIN 18218 ermittelten Frischbetondrücke in kN/m² von HE01 bis HE03

Versuchsnummer		Betoncharge							
		1	2	3	4	5	6	7	8
HE01	Messung	6,02	20,15	32,85	22,67	18,75	17,77	21,58	23,06
	Modell	6,34	17,32	24,09	24,10	24,84	24,74	25,26	25,58
	DIN 18218	6,34	17,74	29,26	40,32	52,19	63,36	75,11	76,12
	Messung / Modell	0,95	1,16	1,36	0,94	0,75	0,72	0,85	0,90
HE02	Messung	8,13	20,39	32,74	45,24	49,68	41,12	41,73	33,69
	Modell	6,68	17,34	23,51	29,74	31,34	31,34	31,81	32,66
	DIN 18218	6,68	17,73	28,33	40,07	51,59	62,87	74,62	76,09
	Messung / Modell	1,22	1,18	1,39	1,52	1,59	1,31	1,31	1,03
HE03	Messung	8,87	21,98	34,46	45,59	53,82	52,88	48,69	57,99
	Modell	7,59	18,27	25,45	31,94	36,49	36,32	36,14	36,84
	DIN 18218	7,59	18,63	30,13	42,09	52,67	63,71	74,64	75,99
	Messung / Modell	1,17	1,20	1,35	1,43	1,47	1,46	1,35	1,57

Es ist anzumerken, dass in Versuchskörper HE01 ein Riss in der FT-Vorsatzschale bereits vor Beginn der Verfüllung der Ortbetoneergänzung vorzufinden war. Dieser befand sich in einem Abstand von ca. 30 cm vom Fußpunkt und stellt für das statische System einen Steifigkeitssprung dar. Durch die schlagartige Belastung der FT-Schale

bei der ersten und zweiten Verdichtung wird so eine horizontale Verschiebung der FT-Vorsatzschale an dieser Stelle begünstigt. Die Eigenlast der Elementwand führt zu einem Verkanten der FT-Betonschale am Fußpunkt, sodass die Verschiebung bestehen bleibt (siehe Abb. 7-24).

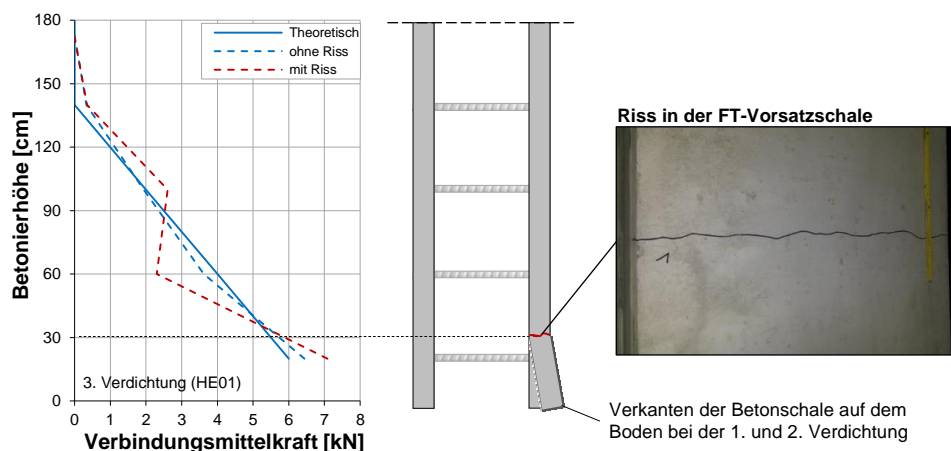


Abb. 7-24: Riss in der FT-Vorsatzschale und resultierende Konsequenzen auf die Verteilung der Verbindungsmittelkräfte beim Verdichtungsvorgang des Frischbetons

Aus statischer Sicht führt dies zu einer Umlagerung der Verbindungsmittelkräfte. Bei Versuchskörper HE01 resultieren daraus bei der 3. Verdichtung ein Abknicken des Druckverlaufs und eine nennenswerte Krafterhöhung im untersten Verbindungsmittel. Der mit einem Stabwerksprogramm beispielhaft errechnete Verlauf der Verbindungsmittelkräfte über die Betonierhöhe verdeutlicht diesen Effekt (siehe Abb. 7-24). Im Folgenden wird der betroffene Verdichtungsvorgang nicht weiter berücksichtigt.

7.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Berechnungsmodell für die Ermittlung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus EPS geeignet ist. Bei niedrigen Betonierhöhen werden die mit dem realitätsnahen Modell errechneten Drücke, analog zu den Drücken nach *DIN 18218*, von den gemessenen Drücken im Schnitt um ca. 10 % überschritten. Dies ist auf das statische System einer Elementwand mit stabförmigen Verbindungsmitteln zurückzuführen und wurde bereits in Kapitel 3.2 im Rahmen theoretischer Betrachtungen mit einem Stabwerkprogramm verdeutlicht. Im Bereich der Übergangshöhe h_U findet eine Beeinflussung des Frischbetondrucks durch einen Dämmstoff statt. Man kann ab diesem Bereich von einem hohen Bauteil sprechen.

Eine Gegenüberstellung aller im Versuch gemessener, maximaler Frischbetondrücke mit dem jeweiligen rechnerischen Frischbetondruck nach dem Berechnungsmodell ist in Abb. 7-25 dargestellt. Links werden die Datenpunkte nach der Versuchsnummer und rechts nach der Verdichtung einer bestimmten Betoncharge sortiert. Für alle Punkte, die oberhalb der Grenzlinie liegen, wird der Frischbetondruck mit dem

Berechnungsmodell unterschätzt. Dies ist auf die Systemsteifigkeit der Elementwände zurückzuführen und wirkt sich vor allem auf die 1. und 2. Betoncharge aus.

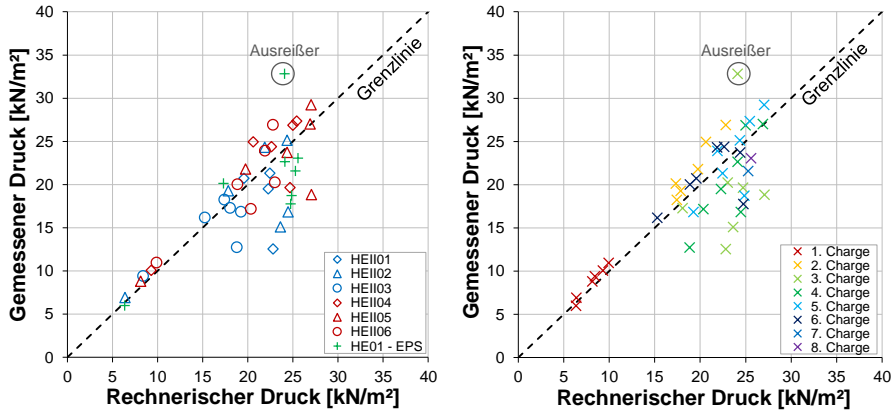


Abb. 7-25: Vergleich vom gemessenem und rechnerisch ermitteltem Frischbetondruck mit dem entwickelten Berechnungsmodell

Generell wird der Quotient von gemessenem und rechnerischem Druck als Modellunsicherheit bezeichnet und muss bei der Bestimmung eines Teilsicherheitsbeiwerts für die Einwirkung Frischbetondruck in Kapitel 8 berücksichtigt werden. Einer der Datenpunkte (HE01, 3. Betoncharge) konnte auf eine Fehlmessung zurückgeführt werden (siehe Abb. 7-24). Unter Nichtberücksichtigung liegt die mittlere Modellunsicherheit des Berechnungsmodells bei 0,96.

Die Untersuchungen in Kapitel 3.2 haben gezeigt, dass die Verbindungsmittelkräfte in einer Elementwand u. a. von dem Verhältnis zwischen Achsabstand a und Verhältnis zwischen Achsabstand a und Randabstand b der Verbindungsmittel abhängig ist. In der Praxis sollte die Bedingung

$$a \geq 2 \cdot b$$

eingehalten werden. Der Einfluss der Systemsteifigkeit führt dann zu einer maximalen Erhöhung der Verbindungsmittelkraft von 8 %. Um jede Kombination der Steifigkeit der Verbindungsmittel und Betonschalen sowie der Anordnung der Verbindungsmittel (stabförmig oder linienförmig) abzudecken, wird auf das Berechnungsmodell ein pauschaler Zuschlag von 10 % angesetzt. Durch den Druckzuschlag kann der Großteil der unterschätzten Frischbetondrucke unter die Grenzlinie geschoben werden, sodass sich eine Reduzierung der mittleren Modellunsicherheit auf 0,89 ergibt (siehe Abb. 7-26).

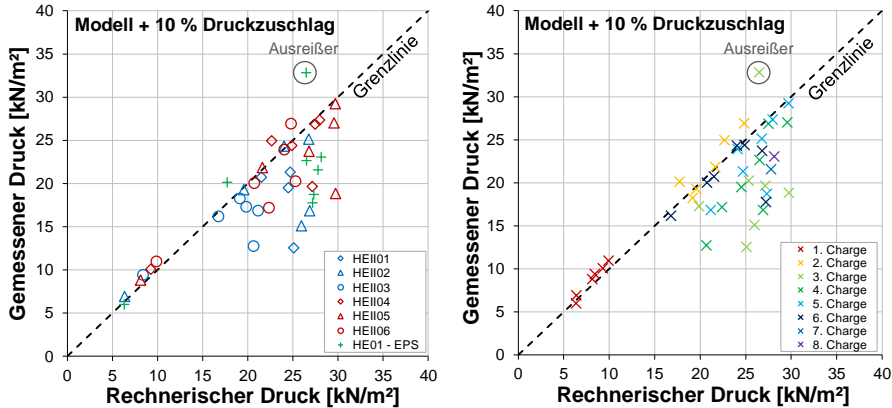


Abb. 7-26: Vergleich vom gemessenem und rechnerisch ermitteltem Frischbetondruck mit dem entwickelten Berechnungsmodell und einem Druckzuschlag von 10 %

Die Ergebnisse dieses Kapitel verdeutlichen, wie wichtig die Validierung eines Berechnungsmodells anhand von Messergebnissen ist. Nur so können mögliche Schwachstellen im Modell identifiziert und durch Anpassungen behoben werden. Es hat sich gezeigt, dass das Berechnungsmodell aus Kapitel 7.3 mit einem Druckzuschlag von 10 % ergänzt werden muss, um eine sicherere Prognose des horizontalen Frischbetondrucks bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus EPS zu gewährleisten. Zudem konnte festgestellt werden, dass das Berechnungsmodell beim Einsatz eines XPS-Dämmstoffs ungeeignet ist. Für diesen Fall wird weiterhin die Verwendung der *DIN 18218* vorgeschlagen. Aus dem entwickelten Berechnungsmodell kann im nachfolgenden Kapitel ein Berechnungsvorschlag für die Praxis abgeleitet werden.

8 Empfehlungen für die Bemessung und Berechnungstool

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass die Verfüllung des Ortbetons in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff drei Einflussbereiche hat:

- Frischbetondruckbeanspruchung
- Druckfestigkeit des Ortbetons
- Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs

Um eine einfache Verwendung der theoretisch und experimentell gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse zu ermöglichen, müssen diese in eine praxistaugliche Form gebracht werden. Im Folgenden wird ein Berechnungsvorschlag zur praxisgerechten Ermittlung des Frischbetondrucks erarbeitet (Kapitel 8.1). Zudem werden Vorschläge zur Berücksichtigung einer veränderten Druckfestigkeit des Ortbetons (Kapitel 8.2) und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs (Kapitel 8.3) gemacht. Am Ende des Kapitels wird kurz ein Berechnungstool vorgestellt, das die Bestimmung des Frischbetondrucks ermöglicht (Kapitel 8.4).

8.1 Berechnungsvorschlag Frischbetondruck

Um das in Kapitel 7 entwickelte Modell zur Berechnung des Frischbetondrucks für die Praxis tauglich zu machen, bedarf es einer kritischen Begutachtung und einiger Anpassungen. Die mathematischen Zusammenhänge zur Berechnung müssen vereinfacht und handhabbar gehalten werden. Zudem wird eine Erstellung von Berechnungsgleichungen in Anlehnung an die *DIN 18218* angestrebt. Neben einiger Vereinfachungen wird außerdem ein pauschaler Druckzuschlag von 10 % in das Modell eingearbeitet, um die Systemsteifigkeit einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff zu berücksichtigen (siehe Kapitel 7.5). Im Weiteren wird der Verlauf der Frischbetondruckbeanspruchung über die Bauteilhöhe angepasst, da die Erstarrung des Frischbetons und damit der zeitliche Abfall des Frischbetondrucks nur schwer zu erfassen ist. Anschließend wird die Zuverlässigkeit des Berechnungsmodells behandelt und ein Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung Frischbetondruck hergeleitet. Um den Nutzen des Modells in der Praxis aufzuzeigen, werden am Ende des Kapitels zwei Berechnungsbeispiele vorgestellt.

8.1.1 Maximaler Druck und Druckverteilung über die Schalungshöhe

Ein Berechnungsvorschlag für die Praxis muss einfach und leicht anwendbar sein. Folglich können nicht alle Einflussparameter des Berechnungsmodells aus Kapitel 7.3 berücksichtigt werden, da zum einen die Berechnungsgleichungen zu kompliziert sind und zum anderen einige Eigenschaften, wie bspw. die Kennwerte des verwendeten Innenrüttlers, fast nie bekannt sind. Das Berechnungsmodell wird auf die wichtigsten Einflussparameter kondensiert, indem folgende Annahmen bzw. Vereinfachungen getroffen werden:

- Es wird ein Dämmstoff aus EPS verwendet.
- Die Eintauchtiefe des Rüttlers h_V beträgt in Anlehnung an *DIN 18218* 90 cm.

- Die Dicke der Ortbetonergänzung d_{OB} hat sowohl negative als auch positive Einflüsse auf den Frischbetondruck, welche sich nahezu ausgleichen. Für eine Vereinfachung des Modells wird eine Dicke von 20 cm festgelegt.
- Für den Frischbeton wird ein w/z-Wert von 0,4 definiert, um auf der sicheren Seite zu liegen. Ein niedriger w/z-Wert führt zu einer geringen Zementleimaufnahme und damit zu einem hohen Seitendruckbeiwert.
- Der mittlere Porendurchmesser d_{pm} von EPS-Dämmstoffen ist üblicherweise in der Praxis nicht bekannt. Er beeinflusst zum einen leicht den Seitendruckbeiwert (Verringerung des Frischbetondrucks) und zum anderen stark die dynamische Tiefenwirkung (Erhöhung des Frischbetondrucks). Für einen konservativen Ansatz wird deshalb ein sehr geringer Porendurchmesser von 2 mm gewählt.
- Bei feingliedrigen Bauteilen wie Elementwänden sollten Innenrüttler der Rüttlergruppe 1 nach *DIN 4235-1* verwendet werden (*Zilch u. a. 2011*), woraus sich eine maximale Fliehkraft F von 2500 N und eine Schwingfrequenz f von 200 Hz ergibt. Die in Tab. H 1 zusammengestellten Daten für Innenrüttler aus *Garbotz u. Ersoy 1964* ergeben für Rüttler der Rüttlergruppe 1 eine maximale Schwingungsamplitude s_0 von 0,3 mm. Folglich lässt sich nach Gleichung (6-2) eine Masse des Rüttlers m_R von 5,27 kg ermitteln.

Zudem werden für die Verwendung des Modells in der Praxis Grenzen definiert:

- Die Dicke der Ortbetonergänzung d_{OB} wird oft in AbZs begrenzt. Die Validierung des Berechnungsmodells erfolgte an d_{OB} gleich 10 cm (unterer Grenzwert). Um drucksteigernde Einflüsse infolge reduzierter Silowirkung zu vermeiden, wird zusätzlich eine Obergrenze festgelegt:

$$10 \text{ cm} \leq d_{OB} \leq 20 \text{ cm}$$

- Die Betoniergeschwindigkeit v darf im Großteil verfügbarer AbZs von Verbindungsmitteln maximal 0,8 m/h betragen. Im Rahmen der Validierung des Berechnungsmodells betrug die Betoniergeschwindigkeit maximal 1,6 m/h. Um bisher unberücksichtigte Effekte einer sehr hohen Betoniergeschwindigkeit auszuschließen, wird eine Obergrenze definiert:

$$v_{\max} = 2,0 \text{ m/h}$$

- Fließfähige Betone der Konsistenzklasse F5 können oft nur unter Verwendung von Fließmitteln hergestellt werden. Hieraus resultieren grundlegende Änderungen der rheologischen Eigenschaften, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail untersucht wurden. Das Modell für die Praxis wird deshalb auf folgende Frischbetonkonsistenzklassen beschränkt:

$$F2, F3 \text{ und } F4$$

- Das Erstarrungsende t_E von Rüttelbetonen der Konsistenzklassen F2 bis F4 (ohne Fließmittelzugabe) beträgt in der Regel selten mehr als 10 h. Längere Erstarrungszeiten wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Deshalb wird folgender oberer Grenzwert festgelegt:

$$t_{E,\max} = 10 \text{ h}$$

Aus den getroffenen Annahmen und Grenzen ergibt sich für die dynamische Tiefenwirkung Δh mithilfe der Gleichungen (6-32) und (6-35):

$$\Delta h = \frac{\ln\left(\frac{s_{\min}}{s_{0,S}}\right) + \frac{1}{4} \cdot d_{OB} \cdot \Omega_V}{-\Omega_S}$$

$$\Leftrightarrow \Delta h = \frac{\ln\left(\frac{a_{\min}}{s_{0,S} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2}\right) + \frac{1}{4} \cdot d_{OB} \cdot K \cdot F^{-0,56}}{-(0,0037 \cdot d_{Pm} + 0,0187)}$$

$$\Leftrightarrow \Delta h = \frac{\ln\left(\frac{a_{\min}}{0,3\text{mm} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot 200\text{Hz}^2}\right) + \frac{1}{4} \cdot 200\text{mm} \cdot K \cdot 2500\text{N}^{-0,56}}{-(0,0037 \cdot 2\text{mm} + 0,0187)}$$

$$\Leftrightarrow \Delta h = \frac{\ln(0,002111 \cdot a_{\min}) + 0,62535 \cdot K}{-0,0261} \quad [\text{cm}] \quad (8-1)$$

- mit: K Anpassungskoeffizient für die Frischbetonkonsistenzklasse nach Abb. 6-18
- | | |
|------|--------|
| 0,60 | für F2 |
| 0,45 | für F3 |
| 0,30 | für F4 |
- a_{\min} Mindestbeschleunigung für eine vollständige Verdichtung des Frischbetons nach Abb. 6-6
- | | |
|----|---------------|
| 4g | für F2 |
| 2g | für F3 und F4 |

Für das reduzierte Ausbreitmaß des Frischbetons $a_{0,\text{red}}$ ergibt sich unter Verwendung von Gleichung (5-4):

$$a_{0,\text{red}} = a_0 - k_a \cdot \frac{m_{WA}}{d_{OB}}$$

$$\Leftrightarrow a_{0,\text{red}} = a_0 - k_a \cdot \frac{248,6 + 1985,6 \cdot \frac{W}{Z} - 160,5 \cdot d_{Pm}}{d_{OB}}$$

$$\Leftrightarrow a_{0,\text{red}} = a_0 - k_a \cdot \frac{248,6 + 1985,6 \cdot 0,4 - 160,5 \cdot 2\text{mm}}{200\text{mm}}$$

$$\Leftrightarrow a_{0,\text{red}} = a_0 - 3,61 \cdot k_a \quad [\text{cm}] \quad (8-2)$$

mit:	a_0	Ursprüngliches Ausbreitmaß des Frischbetons
		38 cm für F2
		45 cm für F3
		52 cm für F4
	k_a	Reduktionsfaktor für das Ausbreitmaß in Abhängigkeit der Frischbetonkonsistenz nach Abb. 7-7
		0,35 cm/kg für F2
		0,20 cm/kg für F3 und F4

Zur Errechnung des reduzierten Seitendruckbeiwertes wird Gleichung (8-2) in Gleichung (7-2) eingesetzt. Die oben getroffenen Vereinfachungen ermöglichen, dass der reduzierte Seitendruckbeiwert und die dynamische Tiefenwirkung allein in Abhängigkeit von der Frischbetonkonsistenz ermittelt werden können (siehe Tab. 8-1). Besonders auffällig ist der große Unterschied des Seitendruckbeiwertes und der dynamischen Tiefenwirkung zwischen der Konsistenzklasse F2 und F3. Dieser ist hauptsächlich auf den gleichzeitigen Sprung der Mindestbeschleunigung a_{\min} von 2 g auf 4 g zurückzuführen (siehe Abb. 6-6).

Tab. 8-1: Reduzierter Seitendruckbeiwert und dynamische Tiefenwirkung für die Konsistenzklassen F2 bis F4 für den Berechnungsvorschlag für die Praxis

Eingangswerte für das Modell für die Praxis	Frischbetonkonsistenzklasse		
	F2	F3	F4
$\lambda_{0,\text{red}}$ [-]	0,305	0,525	0,663
Δh [cm]	81,1	111,2	114,8

Durch Einsetzen der Eingangswerte in Gleichung (7-7) verbleiben die gleichen Einflussparameter wie nach DIN 18218. Für die Konsistenzklassen F2 bis F4 entstehen so, unter Berücksichtigung des zehnpromtigen Druckzuschlags aufgrund der Systemsteifigkeit, einfache mathematische Zusammenhänge:

$$\sigma_{h,\text{EPS,max}} = 1,1 \cdot \left[\gamma_{\text{OB}} \cdot \lambda_{0,\text{red}} \cdot \left(\Delta h - \frac{2 \cdot h_V \cdot \Delta h}{v \cdot t_E} - \frac{\Delta h^2}{v \cdot t_E} \right) + \gamma_{\text{OB}} \cdot h_V \right]$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{h,\text{EPS,max,F2}} = 1,1 \cdot \left[25 \cdot 0,305 \cdot \left(0,81 - \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 0,81}{v \cdot t_E} - \frac{0,81^2}{v \cdot t_E} \right) + 25 \cdot 0,9 \right]$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{h,\text{EPS,max,F2}} = 31,55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} - 17,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{1}{v \cdot t_E} \quad (8-3)$$

Für die Konsistenzklassen F3 und F4 ergibt sich:

$$\sigma_{h,\text{EPS,max,F3}} = 40,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} - 46,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{1}{v \cdot t_E} \quad (8-4)$$

$$\sigma_{h,\text{EPS,max,F4}} = 45,68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} - 61,71 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{1}{v \cdot t_E} \quad (8-5)$$

Mit dem Berechnungsvorschlag für die Praxis kann analog zur *DIN 18218* der Frischbetondruck für Elementwände mit integriertem Dämmstoff aus EPS in Abhängigkeit der Frischbetonkonsistenzklasse, der Betoniergeschwindigkeit und des Erstarrungsendes des Frischbetons errechnet werden. Beim Einsatz von XPS wird weiterhin die Verwendung der *DIN 18218* empfohlen. Die einzelnen Entwicklungsschritte für das Berechnungsmodell für die Praxis sind in Abb. 8-1 grafisch dargestellt.

Im ersten Schritt steht die Entwicklung des Berechnungsmodells aus Kapitel 7.3 geprägt. Dieses stützt sich auf die Ergebnisse und Erkenntnisse der theoretischen und experimentellen Untersuchungen der Kapitel 3 bis 6 und stellt die Grundlage für die Ableitung eines realitätsnahen Modells dar. Die Verifikation und Validierung des Modells anhand experimenteller Großversuche in Kapitel 7 haben gezeigt, dass der errechnete Frischbetondruck mit einem pauschalen Zuschlag von 10 % beaufschlagt werden muss (zweiter Schritt), um die Systemsteifigkeit einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff zu berücksichtigen. Im dritten Schritt werden Modellvereinfachungen vorgenommen, um eine Tauglichkeit für die Praxis zu erreichen. Der maximale Druck entsteht hierbei in der Tiefe $h_V + \Delta h$. Aus den Modellanpassungen im zweiten und dritten Schritt resultieren höhere Rechenwerte, die gleichzeitig zu einer Verringerung der Modellunsicherheit führen. Für die Praxis wird vorgeschlagen, analog zur *DIN 18218*, den maximalen Druck über die gesamte Wandhöhe bis zum Erreichen des Erstarrungsendes des Ortbetons anzusetzen. Der Schnittpunkt zwischen der Vertikalen des maximalen Drucks $\sigma_{h,EPS,max}$ und dem hydrostatischen Druckverlauf wird als hydrostatische Druckhöhe bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus EPS $h_{S,EPS}$ bezeichnet. Diese berechnet sich zu:

$$h_{S,EPS} = \frac{\sigma_{h,EPS,max}}{\gamma_{OB}} \quad (8-6)$$

Es ist zu beachten, dass der Berechnungsvorschlag für die Praxis nur angewendet werden kann, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$h_V + \Delta h \leq \frac{1}{2} \cdot h_E \quad (8-7)$$

Da bei Grundmodell B des bodenmechanischen Ansatzes der maximale Druck bereits bei Erreichen von $0,5 \cdot h_E$ entsteht (siehe Abb. 7-5), wäre bei Nichteinhaltung der Bedingung (8-7) der mit dem Modell errechnete Druck in der Tiefe $h_V + \Delta h$ nach den Gleichungen (8-3) bis (8-5) nicht gleichzeitig der maximale Druck.

Dieser Fall tritt jedoch nur ein, wenn sehr langsam betoniert wird und gleichzeitig das Erstarrungsende des Frischbetons sehr früh abgeschlossen ist. Zur Errechnung des maximalen Drucks muss dann in Gleichung (7-6) für die Betonierhöhe $0,5 \cdot h_E$ eingesetzt werden. Mit den Eingangswerten aus Tab. 8-1 entstehen ebenfalls einfache mathematische Zusammenhänge (siehe Tab. 8-2).

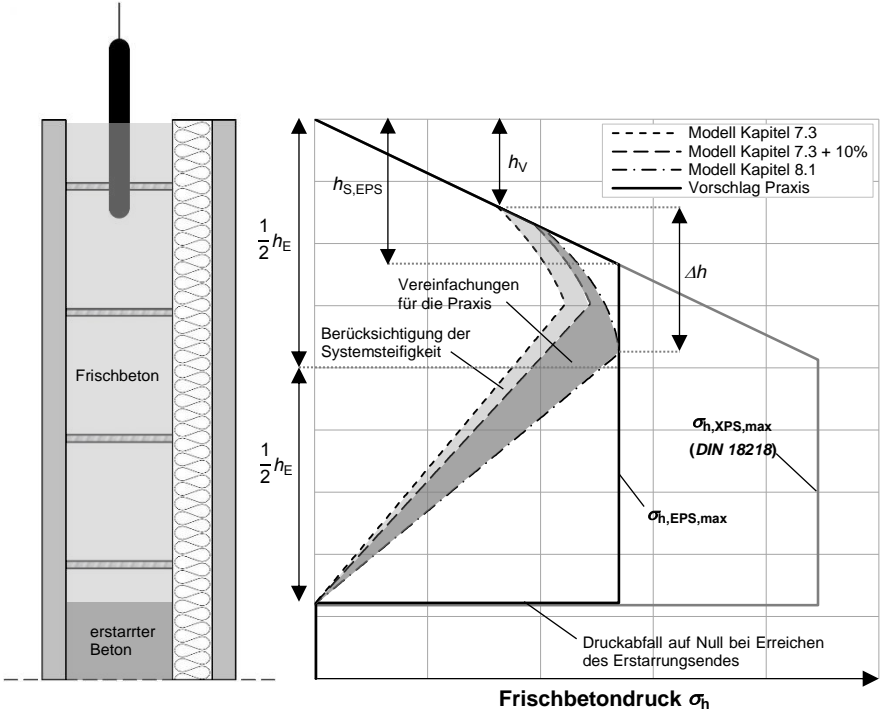


Abb. 8-1: Entwicklungsschritte für das Berechnungsmodell für die Praxis und angenommene Druckbeanspruchung über die Höhe der Elementwand mit integriertem Dämmstoff

Nach erneutem Vergleich von gemessenem Druck und rechnerischem Druck nach dem Modell für die Praxis wird ersichtlich, dass das Berechnungsmodell eine hohe Zuverlässigkeit aufweist. Außer bei der 1. und 2. Charge, bei denen hydrostatischer Druck entsteht, liegen alle Rechenwerte weit über den Messwerten. Es ergibt sich eine mittlere Modellunsicherheit von 0,74.

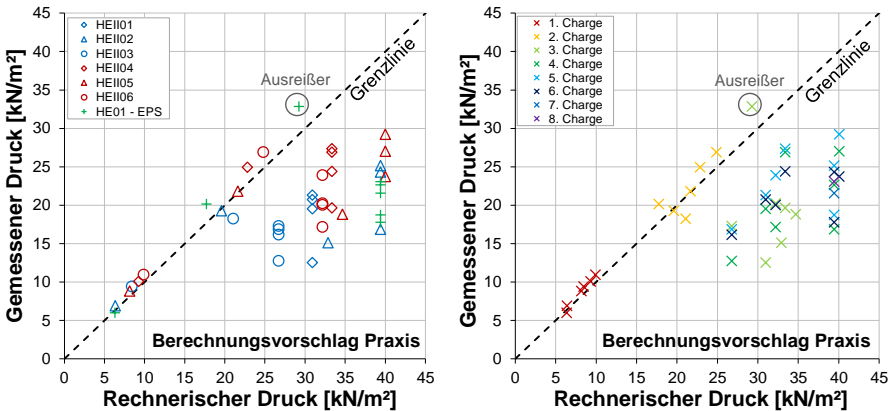


Abb. 8-2: Vergleich von gemessenem und rechnerisch ermitteltem Frischbetondruck nach dem Berechnungsmodell für die Praxis

In DIN 18218 wird für jede Konsistenzklasse ein minimaler Frischbetondruck festgelegt (siehe Tab. 2-3). Für die Klassen F1 bis F4 beträgt dieser 25 kN/m² und für die Klassen F5 und F6 sowie für SVB 30 kN/m². Für das Berechnungsmodell für Elementwände mit integriertem EPS wird einheitlich ein minimaler Frischbetondruck von 25 kN/m² festgelegt (siehe Tab. 8-2).

Tab. 8-2: Charakteristische Werte des maximalen Frischbetondrucks für Elementwände mit integriertem EPS-Dämmstoff in Abhängigkeit der Konsistenzklassen

Konsistenzklasse	Charakteristischer Frischbetondruck $\sigma_{hk, EPS, max}$ [kN/m ²]		
	$h_V + \Delta h \leq \frac{1}{2} \cdot h_E$	$h_V + \Delta h > \frac{1}{2} \cdot h_E$	Minimum
F1	-	-	-
F2	$31,6 - 17,8 \cdot \frac{1}{v \cdot t_E}$	$2,1 \cdot v \cdot t_E + 17,2 + 6,8 \cdot \frac{1}{v \cdot t_E}$	25
F3	$40,8 - 46,8 \cdot \frac{1}{v \cdot t_E}$	$3,6 \cdot v \cdot t_E + 11,8 + 11,7 \cdot \frac{1}{v \cdot t_E}$	25
F4	$45,7 - 61,7 \cdot \frac{1}{v \cdot t_E}$	$4,6 \cdot v \cdot t_E + 8,2 + 14,8 \cdot \frac{1}{v \cdot t_E}$	25
F5	-	-	-
F6	-	-	-
SVB	-	-	-

In Analogie zur DIN 18218 lassen sich Bemessungsdiagramme für ein definiertes Erstarrungsende t_E des Frischbetons erstellen, in denen der maximale Frischbetondruck in Abhängigkeit der Konsistenzklasse und der Betoniergeschwindigkeit abgelesen werden kann. In Abb. 8-3 und Abb. 8-4 sind exemplarisch die Diagramme für ein Erstarrungsende des Frischbetons von 5 h und 10 h dargestellt.

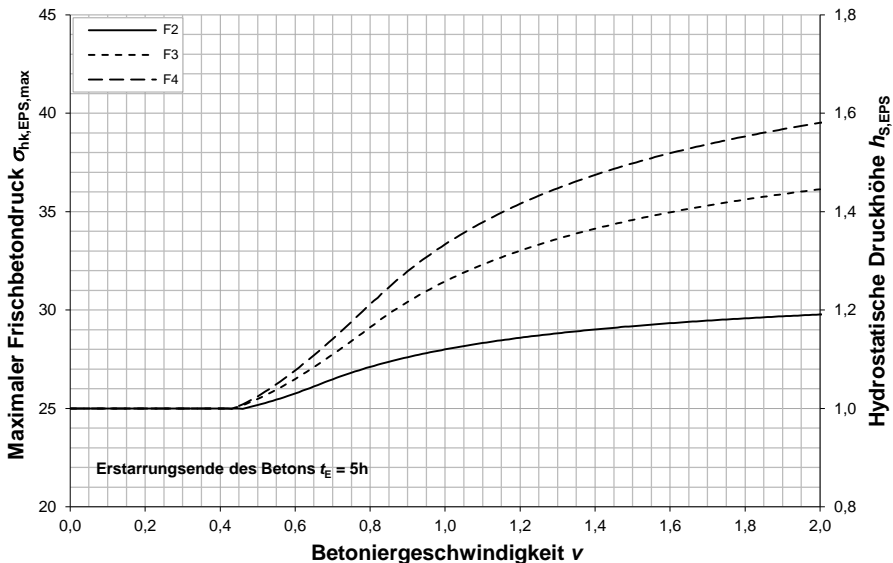


Abb. 8-3: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem EPS-Dämmstoff bei einem Erstarrungsende t_E von 5 h

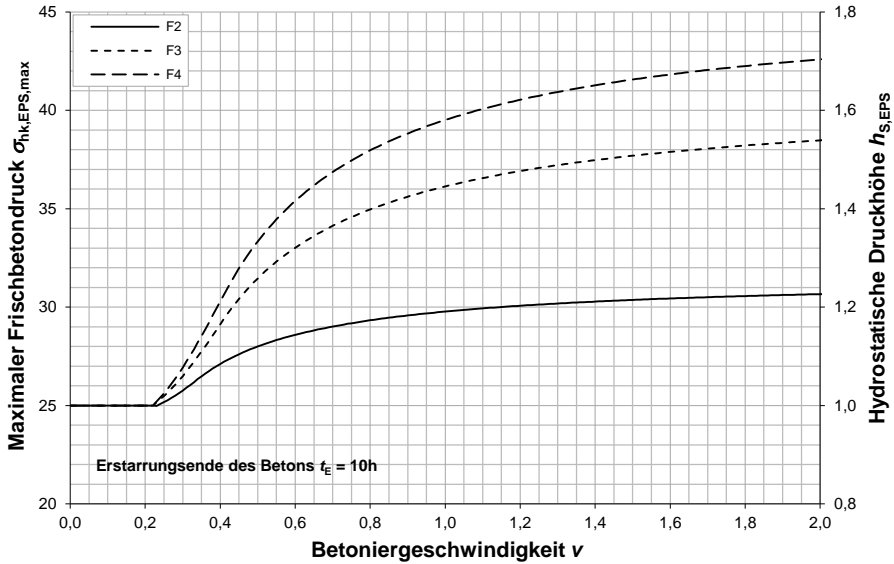


Abb. 8-4: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem EPS-Dämmstoff bei einem Erstarrungsende t_E von 10 h

Ein weiteres Diagramm für ein Erstarrungsende des Betons von 7 h ist in Anhang K abgebildet.

Bei Betrachtung der hergeleiteten Gleichungen aus Tab. 8-2 fällt auf, dass zwischen der Betoniergeschwindigkeit und dem maximalen Frischbetondruck ein hyperbolischer Zusammenhang besteht. Die Gleichungen nach *DIN 18218* für glatte Schalung weisen im Vergleich einen linearen Verlauf auf. Damit einher geht die Erkenntnis, dass der Frischbetondruck nach *DIN 18218* theoretisch mit zunehmender Betoniergeschwindigkeit immer weiter steigt, nach dem Berechnungsmodell für Elementwände mit integriertem EPS jedoch ein Grenzwert angestrebt wird. Die Begründung hierfür liefert Abb. 8-5.

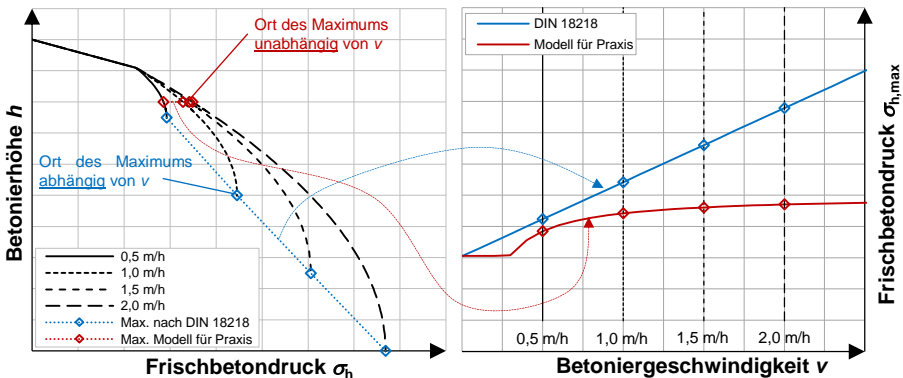


Abb. 8-5: Berechnung des maximalen Drucks nach *DIN 18218* und nach dem Berechnungsmodell für die Praxis (links) sowie resultierender Zusammenhang zwischen Betoniergeschwindigkeit und maximalem Frischbetondruck (rechts)

Betrachtet man den Frischbetondruck in Abhängigkeit der Betonierhöhe, so kann beobachtet werden, dass sich der Ort des theoretischen Druckmaximums nach Annahmen der *DIN 18218* verändert (*Specht 1981*). Bei dem Berechnungsmodell für Elementwände mit integriertem EPS hingegen befindet sich der maximale Frischbetondruck unabhängig von der Betoniergeschwindigkeit in der Tiefe $h_V + \Delta h$. Überträgt man dies auf den Frischbetondruck in Abhängigkeit der Betoniergeschwindigkeit so resultiert der bereits angesprochene hyperbolische Verlauf.

8.1.2 Behandlung der Zuverlässigkeit des Berechnungsmodells

Die Behandlung der Zuverlässigkeitstheorie ist nicht zentraler Bestandteil dieser Arbeit und wird im Folgenden auf die wichtigsten Aspekte begrenzt. Umfassendere Darstellungen können in *Zilch u. Zehetmaier 2010* oder *Stauder 2015* nachgelesen werden.

8.1.2.1 Allgemeines

Die Überschreitung des Grenzzustands der Tragfähigkeit bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff im Bauzustand ist durch eine einmalige Überbeanspruchung durch Frischbetondruck gekennzeichnet. Rechnerischen Tragfähigkeitsnachweisen im Bauwesen liegt das semi-probabilistische Zuverlässigkeitskonzept zugrunde. Hierbei wird der Bemessungswert der Beanspruchung E_d mit dem Bemessungswert des Bauteilwiderstands R_d verglichen:

$$E_d \leq R_d \quad (8-8)$$

In Bezug auf den Frischbetondruck in Elementwänden stellt der Bauteilwiderstand die Beanspruchbarkeit des eingesetzten Verbindungsmittels und der FT-Betonschalen dar. Die Beanspruchung der Verbindungsmittel und der FT-Betonschalen wird durch die Einwirkung des Frischbetondrucks hervorgerufen. Nach *DIN EN 1990* wird eine Einwirkung als eine Gruppe von Kräften, die auf ein Tragwerk einwirken, bezeichnet. Wie zuverlässig eine Beanspruchung beschrieben werden kann, hängt von der Streuung der Eingangsgrößen, dem festgelegten Zuverlässigkeitsniveau und den Fehlern infolge von menschlichem Fehlverhalten ab (*Zilch u. Zehetmaier 2010*). Der für den Tragfähigkeitsnachweis erforderliche Bemessungswert der Beanspruchung entsteht deshalb immer aus einem charakteristischen Wert der Beanspruchung und einem zugehörigen Teilsicherheitsbeiwert (siehe Abb. 8-6).

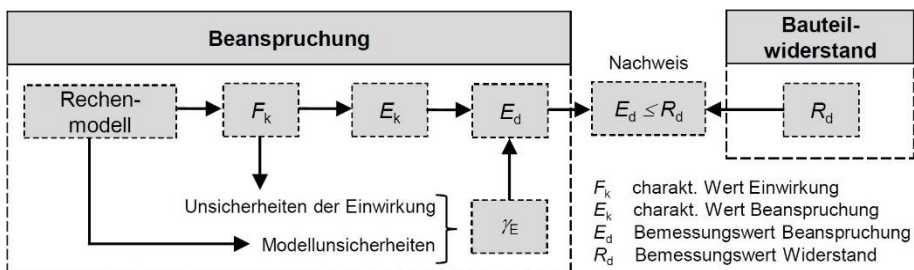


Abb. 8-6: Nachweiskonzept für den Grenzzustand der Tragfähigkeit in Anlehnung an *Zilch u. Zehetmaier 2010*

8.1.2.2 Charakteristischer Wert des Frischbetondrucks

Im Sinne eines semi-probabilistischen Zuverlässigkeitskonzepts wird der charakteristische Wert einer Einwirkung mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit p nicht unterschritten. Es handelt sich um einen sog. Quantilwert x_p in Abhängigkeit eines bestimmten Konfidenzniveaus. Um zuverlässigkeitsorientiert zu bemessen, werden dementsprechend für Einwirkungen obere Quantilwerte mit hoher Unterschreitungswahrscheinlichkeit, bei klimatischen Einwirkungen meist sogar das 98 %-Quantil, verwendet. D. h. in 98 % der Fälle wird der charakteristische Wert der Einwirkung nicht überschritten (z. B. bei Windlasten).

Gemäß nationalem Anhang *DIN EN 1990/NA* entspricht ein Flüssigkeitsdruck, welcher mit dem Frischbetondruck gleichgesetzt werden kann, einer veränderlichen Einwirkung. Der charakteristische Wert muss dann als Quantilwert oder als Nennwert, wenn eine statistische Verteilung unbekannt ist, dargestellt werden. Ein Nennwert basiert auf Erfahrungen oder physikalischen Bedingungen. Für den Fall, dass der Flüssigkeitsdruck jedoch durch geometrische Randbedingungen begrenzt wird, wie bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff, darf dieser wie eine ständige Last behandelt werden. Dann ist es zulässig, den Frischbetondruck als Mittelwert festzulegen. Die Berechnung des charakteristischen Frischbetondrucks nach *DIN 18218* basiert bspw. auf Mittelwerte. Die Gleichungen aus Tab. 8-2 zur Ermittlung des Frischbetondrucks können also unmittelbar mit charakteristischen Einwirkungswerten gleichgesetzt werden. Der charakteristische Wert der Beanspruchung eines Verbindungsmittels ergibt sich direkt durch Multiplikation mit dessen Einzugsfläche.

8.1.2.3 Teilsicherheitsbeiwert für den Frischbetondruck

Um das vorgestellte Berechnungsmodell für die Bemessung in der Praxis einsetzen zu können, muss ein Teilsicherheitsbeiwert abgeleitet werden. Teilsicherheitsbeiwerte erhöhen den Abstand zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit und steuern damit die Zuverlässigkeit. Zur Differenzierung der Zuverlässigkeit werden in *DIN EN 1990* sog. Schadensfolgeklassen (CC) definiert, welche die Auswirkungen des Versagens eines Tragwerks festlegen (siehe Tab. 8-3). Übliche Tragwerke des Hochbaus nach *DIN EN 1992-1-1* werden in die Klasse CC 2 eingestuft. Da mit dem Versagen von Elementwänden im Bauzustand jedoch nur niedrige Folgen einhergehen, können diese in die Klasse CC 1 eingeteilt werden.

Tab. 8-3: Klassen für Schadensfolgen (in Anlehnung an *DIN EN 1990*)

Schadensfolgeklasse	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben <u>oder</u> sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beeinträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben <u>und</u> kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Zur Quantifizierung des Zuverlässigkeitsniveaus dient die Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der Zuverlässigkeitsindex β , welche über die Standardnormalverteilung miteinander verknüpft sind. Je höher der Zuverlässigkeitsindex ist, desto geringer ist die Versagenswahrscheinlichkeit und je höher das Zuverlässigkeitsniveau. Die Zuverlässigkeitsklassen in Tab. 8-4 können mit den Schadensfolgekassen in Tab. 8-3 gleichgesetzt werden. Eine gegebene Versagenswahrscheinlichkeit gilt immer nur für einen festgelegten Bezugszeitraum.

Tab. 8-4: Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β bzw. der Versagenswahrscheinlichkeiten p_f (in Anlehnung an DIN EN 1990)

Zuverlässigkeitsklasse	Mindestwert für β (Versagenswahrscheinlichkeit p_f)	
	Bezugszeitraum 1 Jahr	Bezugszeitraum 50 Jahre
RC 3	5,2 ($1,0 \cdot 10^{-7}$)	4,3 ($5,4 \cdot 10^{-6}$)
RC 2	4,7 ($1,3 \cdot 10^{-6}$)	3,8 ($7,2 \cdot 10^{-5}$)
RC 1	4,2 ($1,3 \cdot 10^{-5}$)	3,3 ($6,9 \cdot 10^{-4}$)

Nach DIN EN 1990 errechnet sich der Bemessungswert einer Einwirkung E_d zu:

$$E_d = \gamma_E \cdot E_k = m_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot s_E \quad (8-9)$$

- mit:
- m_E Mittelwert der Einwirkung
 - γ_E Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung
 - α_E Wichtungsfaktor für die Streuung der Einwirkung
 - β Zuverlässigkeitsindex
 - s_E Standardabweichung der Einwirkung

Da für eine Frischbetondruckbeanspruchung der charakteristische Wert der Einwirkung E_k mit dem Mittelwert m_E gleichzusetzen ist (siehe Kapitel 8.1.2.2) gilt unter zusätzlicher Berücksichtigung der Modellunsicherheit θ des Berechnungsmodells nach Kapitel 8.1.1:

$$\gamma_E = \frac{m_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot s_E}{E_k} = \frac{m_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot s_E}{m_E \cdot \theta^{-1}} = (1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_E) \cdot \theta \quad (8-10)$$

Zur Sicherstellung einer zuverlässigkeitsorientierten Bemessung muss der Wichtungsfaktor für eine Einwirkung immer negativ sein. Für den Fall, dass die Bedingung

$$0,16 < \frac{s_E}{s_R} < 7,6 \quad (8-11)$$

- mit: s_R Standardabweichung des Widerstands

nach DIN EN 1990 eingehalten wird, darf α_E zu -0,7 gewählt werden. Da die Berechnung des Frischbetondrucks jedoch von mehreren Basisvariablen abhängig ist

und dieser damit eine hohe Standardabweichung aufweist (siehe Tab. 8-5), muss ein Wichtungsfaktor α_E von -1,0 verwendet werden (siehe *DIN EN 1990* und *Proske 2007*).

Die Wahl des Zuverlässigkeitsindex identifiziert sich für die Bemessung von Elementwänden mit integriertem Dämmstoff im Bauzustand als schwierig. Zum einen hat das Versagen solcher Wände beim Verfüllen der Ortbetonergänzung vergleichsweise geringe Auswirkungen auf Leben und Wirtschaftlichkeit, weshalb diese in die Zuverlässigkeitsklasse RC 1 eingeordnet werden sollten. Zum anderen ist ein Bezugszeitraum praktisch nicht definierbar, da die Verfüllung der Ortbetonergänzung nur ein einziges Mal stattfindet. *Proske 2007* und *Proske u. a. 2014* schätzen für Schalungen im Bauzustand eine Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} über einen Bezugszeitraum von 1 Jahr als akzeptabel ein. Dies entspricht dem Versagen von einer Schalung in 10.000 Fällen. Da die Verbindungsmittel einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff im Bauzustand ebenfalls die Funktion von Schalungsankern übernehmen, wird der Ansatz von *Proske 2007* für die Bestimmung eines Teilsicherheitsbeiwerts übernommen. Es resultiert ein Zuverlässigkeitsindex von 3,72 (siehe Abb. 8-7).

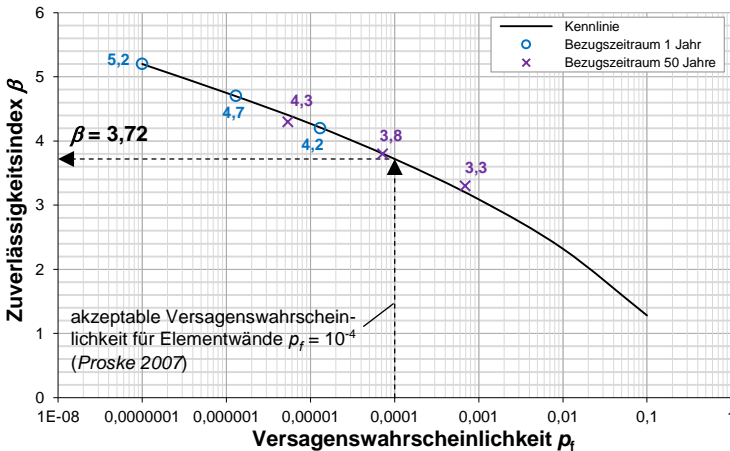


Abb. 8-7: Zusammenhang Versagenswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeitsindex inklusive der nach *DIN EN 1990* festgelegten Werte für Bezugsräume von 1 und 50 Jahren

Zur Berechnung eines Teilsicherheitsbeiwerts müssen die Variationskoeffizienten V_i jeder einzelnen Basisvariablen bestimmt und berücksichtigt werden. Der Variationskoeffizient der Einwirkung Frischbetondruck V_E ergibt sich näherungsweise zu:

$$V_E \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2} \tag{8-12}$$

Der Variationskoeffizient einer Basisvariablen V_i ergibt sich aus dem Quotienten von Standardabweichung und Mittelwert:

$$V_i = \frac{s_{E,i}}{m_{E,i}} \quad (8-13)$$

Für die Betoniergeschwindigkeit wird in Anlehnung an *Proske 2007* ein Variationskoeffizient von 0,25 gewählt. Für übliche Schalungen resultiert dieser hohe Wert aus den Schwankungen der Bauteilgeometrie und der Kapazität von Mischfahrzeugen sowie aufgrund der problematischen Überwachung der Betoniergeschwindigkeit auf der Baustelle. Bei Elementwänden liegt immer eine feste Bauteilgeometrie vor, woraus das Erreichen einer bestimmten Betoniergeschwindigkeit viel besser planbar ist. Für die Rohwichte des Ortbetons wird auf der sicheren Seite liegend ein Variationskoeffizient von 0,024 nach *Graubner u. Glowienka 2005* verwendet. Die restlichen Variationskoeffizienten von Erstarrungsende, Konsistenzklasse, Betonierhöhe und Eintauchtiefe des Rüttlers wurden anhand der eigenen experimentellen Untersuchungen in den Kapiteln 3.4, 3.5, 3.6 und 7.4 bestimmt. Der Variationskoeffizient beträgt in jedem Fall immer weniger als 10 %. Am meisten schwankt hierbei das Erstarrungsende des Ortbetons ($V_i = 0,084$), gefolgt von der Konsistenzklasse ($V_i = 0,061$). Die Betonierhöhe und die Eintauchtiefe des Rüttlers weisen nur sehr kleine Variationskoeffizienten von 0,036 und 0,045 auf. Im Gesamten errechnet sich V_E nach Gleichung (8-18) zu 0,278. Die Zusammenstellung aller Basisvariablen des Berechnungsmodells für die Praxis mit den zugehörigen Variationskoeffizienten ist in Tab. 8-5 gegeben.

Tab. 8-5: Basisvariablen zur Errechnung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff und zugehörige Variationskoeffizienten

Basisvariable	Formelzeichen	Einheit	Mittelwert $m_{E,i}$	Standardabweichung $s_{E,i}$	Mittlerer Variationskoeffizient V_i
Betoniergeschwindigkeit	v	m/h	-	-	0,250
Rohwichte des Ortbetons	γ_{OB}	kN/m ³	25	0,6	0,024
Erstarrungsende Ortbeton (nach DIN 18218)	t_E	h	siehe Tab. B 1 und Tab. J 1		0,084
Konsistenzklasse	K	-	siehe Tab. A 1, Tab. B 1, Tab. C 1 und Tab. J 1		0,061
Betonierhöhe	h	m	siehe Tab. B 1, Tab. C 1 und Tab. J 1		0,036
Eintauchtiefe des Rüttlers	h_V	m	siehe Tab. C 1 und Tab. J 1		0,045

$$V_E = 0,278$$

Die Modellunsicherheit θ wurde bereits im vorherigen Kapitel mithilfe des Quotienten aus vorhandenem Druck während der Versuchsdurchführung und errechnetem Druck mit dem Modell für die Praxis ermittelt. Hierbei ergab sich ein Wert von 0,74, welcher auf insgesamt 41 Wertepaare basiert.

Der Teilsicherheitsbeiwert für das Frischbetondruckmodell nach Kapitel 8.1.1 errechnet sich nach Gleichung (8-10) zu:

$$\gamma_E = \gamma_F = (1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_E) \cdot \theta = (1 + 1,0 \cdot 3,72 \cdot 0,278) \cdot 0,74 = 1,50 \quad (8-14)$$

Aktuell gilt für den Frischbetondruck nach *DIN 18218* ebenfalls ein Teilsicherheitsbeiwert γ_F von 1,50 (siehe Gleichung (2-24)). Die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass dieser Wert für die Praxis gerechtfertigt ist, da besonders bei niedrigen Betonierhöhen der hydrostatische Druck sogar teilweise überschritten wird.

Greift man zur Festlegung des Teilsicherheitsbeiwerts auf normative Grundlagen zurück, so sind diese im nationalen Anhang des Eurocode 0 (*DIN EN 1990/NA*) zu finden. Je nach Definition, ob der Frischbetondruck als ständige oder veränderliche Einwirkung angenommen wird (siehe Kapitel 8.1.2.2), gilt für eine vorübergehende Bemessungssituation ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 für ständige bzw. von 1,50 für veränderliche Einwirkungen.

Der hergeleitete Teilsicherheitsbeiwert nach Gleichung (8-17) korreliert mit den aktuellen normativen Regelungen. Ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,50 ist außerdem für die Anwendung des Modells in der Praxis erstrebenswert, da sich keine Neuerungen im Vergleich zur *DIN 18218* ergeben.

Seit 2013 darf nach dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) bei Elementwänden ohne integrierten Dämmstoff bei der Ermittlung des Bemessungswerts des Frischbetondrucks abweichend zur *DIN 18218* ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_F = 1,15$ verwendet werden (siehe bspw. *Z-15.2-40* oder *Z-15.2-100*). Der reduzierte Teilsicherheitsbeiwert wird wie folgt gerechtfertigt:

- Es entstehen geringere Frischbetondrücke infolge der rauen und saugenden Oberflächen der Betonfertigteile.
- Es liegt ein gutes Umlagerungsverhalten innerhalb von Elementwänden vor.
- *DIN 18218* ist zur Bemessung von Schalungen vorgesehen.

Da das hergeleitete Berechnungsmodell für Elementwände mit integriertem EPS sehr realitätsnahen Annahmen zugrunde liegt, ist hier ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,15 nicht zulässig.

8.1.2.4 Bemessungswert des Frischbetondrucks

Zur Bestimmung des Bemessungswerts des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus EPS wird ein Teilsicherheitsbeiwert γ_F von 1,50 empfohlen:

$$\sigma_{hd,EPS,max} = 1,50 \cdot \sigma_{hk,EPS,max} \quad (8-15)$$

Der charakteristische Wert des Frischbetondrucks ergibt sich nach Tab. 8-2. Bei Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus XPS wird die Verwendung der *DIN 18218* vorgeschlagen.

8.1.3 Berechnungsbeispiele zur Darstellung der Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden wird der wirtschaftliche Mehrwert des realitätsnahen Berechnungsmodells anhand von zwei Berechnungsbeispielen verdeutlicht. Ausgangspunkt für die Berechnungen sind eine Industriehalle ($L \times B \times H = 50 \times 25 \times 9 \text{ m}$) und ein Einfamilienhaus ($L \times B \times H = 10 \times 10 \times 9 \text{ m}$). Beide Gebäudetypen sind aus Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus EPS aufgebaut (siehe Abb. 8-8) und besitzen eine Länge von 5 m und eine Höhe von 3 m.

Beispiel 1

In Beispiel 1 soll für die Elementwand mit integriertem EPS eine Dimensionierung der Verbindungsmittel vorgenommen werden. Hierfür stehen Verbindungsmittel aus GFK nach Z-21.8-1894 (stabförmig) zur Verfügung. Durch den Vergleich von DIN 18218 mit dem realitätsnahen Berechnungsvorschlag soll gezeigt werden, wie viele Verbindungsmittel eingespart werden können und welcher wirtschaftliche Mehrwert hieraus pro m^2 Wandfläche und für beide Gebäudetypen resultiert.

Beispiel 2

In Beispiel 2 werden in den Wänden beider Gebäudetypen GFK-Verbindungsmittel ($8,5 \text{ Stück/m}^2$) eingesetzt. Es soll gezeigt werden, dass durch die Verwendung des neuen Berechnungsvorschlags eine Verdopplung der Betoniergeschwindigkeit von 0,6 auf 1,2 m/h möglich ist. Zudem sollen die einhergehenden Lohnkosteneinsparungen durch ein schnelleres Betonieren dargelegt werden.

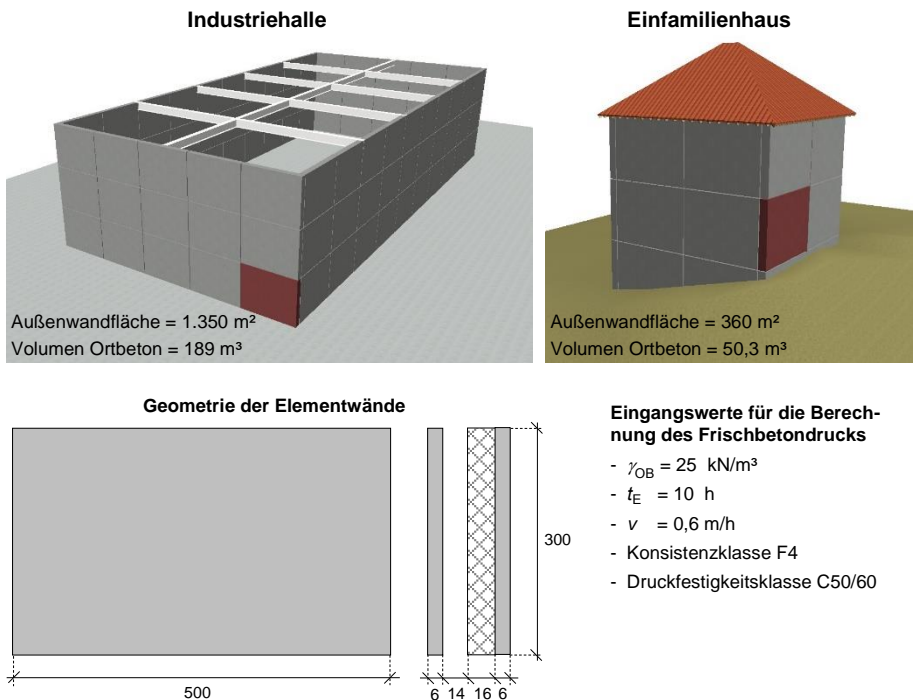


Abb. 8-8: Industriehalle und Einfamilienhaus als Grundlage für die Berechnungsbeispiele

zu Beispiel 1

Der Bemessungswert des maximalen Frischbetondrucks ergibt sich gemäß *DIN 18218* (siehe Tab. 2-3 und Tab. 2-4) zu:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{hd,DIN18218,max}} &= \gamma_F \cdot (17 \cdot v + 17) \cdot (1 + 0,14 \cdot (t_E - 5)) \\ &= 1,5 \cdot (17 \cdot 0,6 + 17) \cdot (1 + 0,14 \cdot (10 - 5)) \\ &= 69,36 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Nach dem neuen Berechnungsmodell (siehe Tab. 8-2) errechnet sich:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{hd,EPS,max}} &= \gamma_F \cdot \left(45,7 - 61,7 \cdot \frac{1}{v \cdot t_E} \right) \\ &= 1,5 \cdot \left(45,7 - 61,7 \cdot \frac{1}{0,6 \cdot 10} \right) \\ &= 53,13 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Auf Grundlage der allgemein bauaufsichtlichen Zulassung *Z-21.8-1894* ergibt sich für einen Beton der Druckfestigkeitsklasse C50/60 und eine Verankerungstiefe im Beton von 6 cm (siehe Dicke der FT-Vorsatzschale und FT-Tragschale) ein Bemessungswert des Auszugwiderstands für ein GFK-Verbindungsmittel von 8,2 kN. Die Materialkosten für ein GFK-Verbindungsmittel für eine Wandstärke von 42 cm betragen 3,21 € (siehe *Schöck 2016*). Die Rechenschritte zur Ermittlung der Material- und Einbaukosteneinsparung sind in Tab. 8-6 dargestellt.

Tab. 8-6: Einsparung von Material- und Einbaukosten von Verbindungsmitteln

Verbindungsmittel		GFK-Verbindungsmittel nach Z-21.8-1894	
Bemessungswert des Frischbetondrucks	$\sigma_{\text{hd,DIN18218,max}}$	69,36	kN/m ²
	$\sigma_{\text{hd,EPS,max}}$	53,13	kN/m ²
Bemessungswert des Auszugwiderstands		8,2	kN
Anzahl der Verbindungsmittel	<i>DIN 18218</i>	8,5	Stück/m ²
	Modell für die Praxis	6,5	Stück/m ²
Eingesparte Verbindungsmittel		2,0	Stück/m ²
Materialkosten		3,21	€/Stück
Einbaukosten ¹⁾		2,00	€/ Stück
Einsparung Material- und Einbaukosten		2,0 · (3,21 + 2,0) = 10,42	€/m ²
Außenwandfläche	Industriehalle	1.350	m ²
	Einfamilienhaus	360	m ²
Gesamte Einsparung	Industriehalle	14.067	€
	Einfamilienhaus	3.751	€

1) Die Einbaukosten wurden nach Rücksprache mit Fertigteilwerken auf der sicheren Seite liegend zu 2,0 €/Stück festgelegt

Durch die Einführung des realitätsnahen Berechnungsmodells in die Praxis ergeben sich je nach Randbedingungen hohe Kosteneinsparungen. Beim Einsatz von stabförmigen Verbindungsmitteln aus GFK können die Baukosten für eine Industriehalle nach Abb. 8-8 allein durch die Reduktion von Material- und Einbaukosten um mehr als 14.000 € und für ein Einfamilienhaus um mehr als 3.700 € gesenkt werden. Diese Zahlen basieren auf eine Einsparung von 10,42 € pro m²

Wandfläche. Je nach Querschnittsaufbau der Elementwand mit integriertem Dämmstoff entspricht dies zwischen 5 und 7 % des Grundpreises.

zu Beispiel 2

Nach dem Berechnungsmodell für die Praxis ergibt sich durch die Erhöhung der Betoniergeschwindigkeit auf 1,2 m/h ein Bemessungswert des Frischbetondrucks von:

$$\sigma_{hd, EPS, max} = 1,5 \cdot \left(45,7 - 61,7 \cdot \frac{1}{1,2 \cdot 10} \right)$$

$$= 60,84 \text{ kN/m}^2$$

Dieser Druck ist immer noch kleiner als der errechnete Druck nach *DIN 18218* für eine Betoniergeschwindigkeit von 0,6 m/h (siehe Tab. 8-6) und kann im Bauzustand von den vorhandenen 8,5 GFK-Verbindungsmiteln pro m² aufgenommen werden.

Die Volumen der Ortbetoneergänzungen bei der Industriehalle $V_{OB,I}$ und dem Einfamilienhaus $V_{OB,E}$ betragen:

$$V_{OB,I} = 2 \cdot 25 \cdot 9 \cdot 0,14 + 2 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 0,14 = 189,0 \text{ m}^3$$

$$V_{OB,E} = 4 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 0,14 = 50,4 \text{ m}^3$$

(8-16)

Nach *Kattenbusch u. a. 2012* müssen für das Betonieren von Wandbauteilen mit einer Dicke zwischen 10 und 15 cm, unter Verwendung von Transportbeton und einer Betonpumpe, 1,6 Lohnstunden pro m³ Beton verrechnet werden. Bei einem Bauarbeiterlohn von 42 Euro pro Stunde betragen die Lohnkosten für die Betonage 67,2 €/m³ Beton. Bei einer Verdopplung der Betoniergeschwindigkeit halbieren sich somit die Lohnkosten auf 33,6 €/m³ (siehe Tab. 8-7).

Tab. 8-7: Einsparung von Lohnkosten durch einen schnelleren Betoniervorgang

Gebäudetyp	Industriehalle		Einfamilienhaus	
Lohnkosten nach <i>Kattenbusch u. a. 2012</i> ¹⁾	1,6·42 = 67,2	€/m ³	1,6·42 = 67,2	€/m ³
Lohnkostenreduktion durch Halbierung der Betonagezeit	0,5·67,2 = 33,6	€/m ³	0,5·67,2 = 33,6	€/m ³
Betonagevolumen	189,0	m ³	50,3	m ³
Gesamte Einsparung	6.350	€	1.690	€

¹⁾ Gilt für Wandbauteilen mit einer Dicke zwischen 10 und 15 cm unter Verwendung von Transportbeton und einer Pumpe

Die Lohnkosteneinsparung beträgt bei der Industriehalle 6.350 € und bei dem Einfamilienhaus knapp 1.700 €. Bei einem Betonpreis von 100 €/m³ nach *Kattenbusch u. a. 2012*, entspricht das etwa einem Drittel der Materialkosten des Betons. Zu den Lohnkosten kommen in Realität noch die Betriebskosten der Betonpumpe hinzu. Diese sind in der obigen Rechnung nicht enthalten und würden die Einsparungen zusätzlich erhöhen.

Das Bauvolumen an gedämmten Außenwänden wird in Zukunft aufgrund der steigenden Anforderungen der *EnEV 2016* immer weiter zunehmen. Die beiden Berechnungsbeispiele zeigen das wirtschaftliche Potenzial durch den zukünftigen Einsatz eines realitätsnahen Berechnungsansatzes für den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem EPS-Dämmstoff. Je nach Randbedingungen entstehen nennenswerte Einsparungen an Material-, Lohn- und Betriebskosten.

8.2 Druckfestigkeit des Ortbetons

In Kapitel 5.3 fand eine umfangreiche Untersuchung der Druckfestigkeitsänderung des Ortbetons infolge der Zementleimaufnahme eines EPS-Dämmstoffs statt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass in jedem Fall eine Erhöhung der Druckfestigkeit stattfindet.

Für die Errechnung der charakteristischen Druckfestigkeit des Ortbetons wird deshalb in Anlehnung an Abb. 5-19 Folgendes für die Bemessung empfohlen:

$$f_{ck,Z} = k_{ZD} \cdot f_{ck} \quad (8-17)$$

mit:	$f_{ck,Z}$	Erhöhte charakteristische Betondruckfestigkeit durch den Einfluss der Zementleimaufnahme eines EPS-Dämmstoffs
	k_{ZD}	Korrekturfaktor für den Einfluss der Zementleimaufnahme auf die Druckfestigkeit
	1,1	für <i>Betonfestigkeitsklasse</i> ≤ C40/50
	1,0	für <i>Betonfestigkeitsklasse</i> > C40/50
	f_{ck}	Charakteristische Betondruckfestigkeit

Da bei hohen w/z-Werten und gleichzeitig niedrigen Druckfestigkeiten des Ortbetons mehr Zementleim aus dem Frischbeton entzogen wird, findet ein größerer Zuwachs der Druckfestigkeit statt als bei niedrigen w/z-Werten bzw. hohen Druckfestigkeiten. Bereits kleinste Wassermengen, die von einer frischen Betonoberfläche verdunsten und nicht chemisch gebunden werden, hinterlassen einen Hohlraum und führen zu einer Erhöhung der Porosität und Undichtigkeit der Betonrandzone. Der mit Zementleim gefüllte Dämmstoff wirkt wie eine Nachbehandlung, bei der die Betonoberfläche mit einem wasserspeichernden Material abgedeckt und feucht gehalten wird. Einen ähnlichen Effekt haben poröse Zuschläge, da deren Kernfeuchte wie eine innere Nachbehandlung wirkt, wenn diese dem noch nicht hydratisierten Zement nach Erstarrung zur Verfügung steht (*Beton 2007*). Der Einfluss eines feuchten EPS-Dämmstoffs auf den Ortbeton kann demnach durchweg als positiv eingestuft werden.

8.3 Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs

In Kapitel 5.3 fanden umfangreiche Untersuchungen zur Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs infolge der Zementleimaufnahme des Dämmstoffs statt. Abb. 8-9 zeigt eine grafische Darstellung der Ergebnisse.

Je nach verbleibender Wasser- und Zementmenge sowie Dämmstoffdicke variieren die Korrekturfaktoren zwischen 1,00 und 1,03. Es findet demnach eine maximale Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von ca. 3,0 % statt. Dieser Wert reduziert sich im Laufe der Jahre, da das im Dämmstoff verbleibende Wasser aus der Elementwand heraus diffundiert. Wasserdampfdiffusionstechnische Berechnungen haben gezeigt, dass Elementwände mit integriertem Dämmstoff hierfür einen günstigen Querschnittsaufbau haben. Selbst in ungünstiger Kombination der Schichtdicken diffundieren pro Jahr mindestens 60 g/m² Wasser aus dem Wandelement heraus (siehe Anhang G). Bei einer im Dämmstoff maximal verbleibenden Wassermenge von 250 g (siehe Abb. 5-13), wäre diese nach knapp vier Jahren wieder herausdiffundiert.

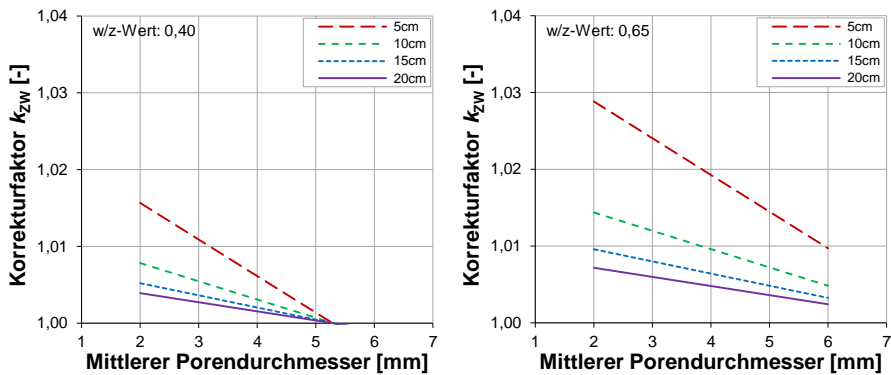


Abb. 8-9: Korrekturfaktoren k_{zw} für die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des w/z-Werts und des mittleren Porendurchmessers d_{pm} für verschiedene Dämmstoffdicken d_D

Für die Berechnung eines erhöhten Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit werden für die Bemessung auf der sicheren Seite liegende folgende Annahmen getroffen:

$$\lambda_z = k_{zw} \cdot \lambda \quad (8-18)$$

- mit:
- λ_z Erhöhter Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit durch den Einfluss der Zementleimaufnahme eines EPS-Dämmstoffs
 - k_{zw} Korrekturfaktor für den Einfluss der Zementleimaufnahme auf die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs
 - 1,03 für Dämmstoffdicken ≥ 5 cm und < 15 cm
 - 1,00 für Dämmstoffdicken ≥ 15 cm
 - λ Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit (Ausgangswert)

8 Empfehlungen für die Bemessung und Berechnungstool

Hieraus ergibt sich für alle Dämmstoffe mit einer Dicke von mehr als 5 cm und weniger als 15 cm pauschal eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um ca. 0,001 W/(m·K). Bei Dämmstoffen mit einer Dicke von mehr als 15 cm kann die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit vernachlässigt werden.

$$\lambda_z = \lambda + 0,001 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \quad \text{für } 5 \text{ cm} \geq d_D < 15 \text{ cm} \quad (8-19)$$

$$\lambda_z = \lambda \quad \text{für } d_D \leq 15 \text{ cm} \quad (8-20)$$

In Deutschland muss seit Januar 2016 für Außenwände von Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden ein Wärmedurchgangskoeffizient U von maximal 0,21 W/(m²·K) eingehalten werden (siehe *EnEV 2016*). Bei einem im Bauwesen üblichen Wärmeleitfähigkeitsbereich zwischen 0,035 und 0,040 W/(m·K) beträgt die Dämmstoffdicke zur Erfüllung der Anforderungen zwischen 16 und 18 cm. Gemäß Gleichung (8-20) muss in diesem Fall der Einfluss der Zementleimaufnahme nicht berücksichtigt werden.

8.4 Berechnungstool zur Ermittlung des Frischbetondrucks

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Berechnungstool erstellt, welches die automatische Berechnung des charakteristischen Frischbetondrucks, sowohl nach dem realitätsnahen Berechnungsmodell (siehe Kapitel 7.3) als auch nach dem empfohlenen Berechnungsvorschlag für die Bemessung (siehe Kapitel 8.1), ermöglicht. Die Eingabeoberfläche des Berechnungstools ist in Abb. 8-10 dargestellt.

Realitätsnahes Berechnungsmodell (nach Kapitel 7)				Empfehlung für die Bemessung (nach Kapitel 8)			
Bauausführung							
Betonierhöhe	h	400	cm				
Betoniergeschwindigkeit	v	1,2	m/h	(< 7 m/h)			
Ortbeton							
Rohwichte	γ_{OB}	25,0	kN/m ³	(20 bis 25 kN/m ³)			
Erstarrungsende	t_E	8,0	h	(3 bis 20 h)			
Konsistenzklasse	K	F4	-	(F2 bis F5)			
Ausbreitmaß	a	52	cm				
Zementmenge	-	280	kg	(< 330 kg)			
Wassermenge	-	190	kg				
w/z - Wert	-	0,68	-	(0,4 bis 0,7)			
Dicke der Ortbetonergänzung	d_{OB}	0,25	m	(0,08 bis 0,30 m)			
EPS-Dämmstoff							
Mittlerer Porendurchmesser	d_{Pm}	3,5	mm	(2 bis 6 mm)			
Rüttler							
Masse	m_R	5,0	kg	(< 6,5 kg)			
Fliehkraft	F	2000	N	(< 2500 N)			
Eintauchtiefe	h_v	90,0	cm				

© Andreas Schmitt 2017

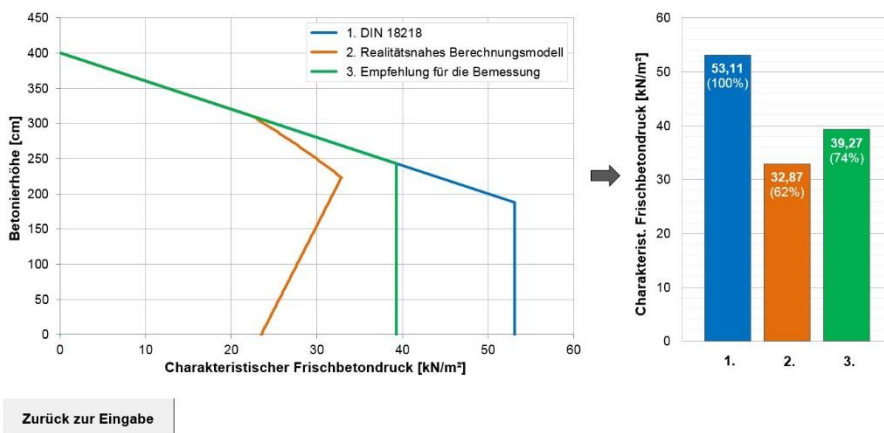
Berechnen

Abb. 8-10: Eingabeoberfläche für die Einflussparameter im Berechnungstool

Realitätsnahes Berechnungsmodell (Kap. 7.3)				Empfehlung für die Bemessung (Kap. 8.1)			
Bauausführung							
Betonierhöhe	h	400	cm				
Betoniergeschwindigkeit	v	1,2	m/h				
Ortbeton							
Rohwichte	γ_{OB}	25,0	kN/m ³				
Erstarrungsende	t_E	8,0	h				
Konsistenzklasse	K	F4	-				
Ausbreitmaß	a	52	cm				
Zementmenge	-	280	kg				
Wassermenge	-	190	kg				
w/z - Wert	-	0,68	-				
Dicke der Ortbetonergänzung	d_{OB}	0,25	m				
EPS-Dämmstoff							
Mittlerer Porendurchmesser	d_{Pm}	3,5	mm				
Rüttler							
Masse	m_R	5,0	kg				
Fliehkraft	F	2000	N				
Eintauchtiefe	h_v	90,0	cm				

Abb. 8-11: Einflussparameter für die beiden Modellvarianten „Realitätsnahes Berechnungsmodell“ (nach Kapitel 7.3) und „Empfehlung für die Bemessung“ (nach Kapitel 8.1)

Im oberen Bereich können beide Modelle mithilfe von zwei Schaltflächen ausgewählt werden. Nach Wahl eines Modells werden die zugehörigen Einflussparameter farblich gekennzeichnet (siehe Abb. 8-11). Die Parameter werden in die Kategorien „Bauausführung“, „Ortbeton“, „EPS-Dämmstoff“ und „Rüttler“ unterteilt und im rechten Bereich der Eingabeoberfläche in einer Skizze visuell veranschaulicht. Bei der Eingabe der Einflussparameter müssen die angegebenen Grenzwerte eingehalten werden (siehe Abb. 8-10). Durch Betätigen der Schaltfläche „Berechnen“ wird der charakteristische Frischbetondruck ermittelt. Die Ergebnisausgabe erfolgt mit der Darstellung des Frischbetondrucks über die Betonierhöhe (siehe Abb. 8-12).



© Andreas Schmitt 2017

Abb. 8-12: Darstellung der Berechnungsergebnisse

Neben dem Frischbetondruck nach den Berechnungsmodellen aus den Kapiteln 7.3 und 8.1 wird auch der charakteristische Frischbetondruck nach *DIN 18218* dargestellt. In einem Säulendiagramm kann der Wert des maximalen Frischbetondrucks für jedes der drei Modelle abgelesen werden. Außerdem ist für jedes Modell der prozentuale Anteil im Vergleich zum Frischbetondruck gemäß *DIN 18218* angegeben.

Durch Betätigen der Schaltfläche „Zurück zur Eingabe“ springt der Benutzer des Berechnungstools zurück zur Eingabeoberfläche aus Abb. 8-10.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein realitätsnahes Berechnungsmodell zur Ermittlung des horizontalen Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff entwickelt und vorgestellt. Das Modell trägt zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit solcher Wandelemente bei. Im Vergleich zur *DIN 18218*, welche derzeit für die Berechnung des horizontalen Frischbetondrucks eingesetzt wird, berücksichtigt das realitätsnahe Berechnungsmodell die geometrischen und werkstoffspezifischen Eigenschaften sowie die bauausführungstechnischen Randbedingungen einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff. Darüber hinaus werden neben der Beschreibung des Frischbetondrucks auch die resultierenden Auswirkungen einer Ortbetonverfüllung auf das Wandbauteil adressiert und untersucht. Dies betrifft zum einen die Beeinflussung der Druckfestigkeit des Ortbetons und zum anderen der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs im Endzustand. Beides bleibt bei der Dimensionierung von Elementwänden mit integriertem Dämmstoff aus EPS bisher unberücksichtigt.

Zur Entwicklung eines Grundverständnisses für die Entstehung des Frischbetondrucks werden in Kapitel 3 sowohl theoretische als auch experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt. Im Fokus der insgesamt drei Versuchsreihen steht die Bestimmung der maßgebenden Einflussparameter. Es hat sich gezeigt, dass die Eigenschaften einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff erst ab einer gewissen Betonierhöhe und in Kombination mit den bauausführungstechnischen Randbedingungen einen Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck haben. Die Höhe des Frischbetondrucks hängt dann maßgeblich von der Zementleimaufnahmefähigkeit des Dämmstoffs und der dynamischen Tiefenwirkung des Innenrüttlers ab.

Dämmstoffe aus XPS oder PU besitzen eine geschlossenzellige Porenstruktur und nehmen bei kurzzeitiger Flüssigkeitsdruckbeanspruchung kein Wasser auf. Dahingegen ermöglicht die offene Porenstruktur von EPS einen Wassereintrag. Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen zur Wasseraufnahme wird dies in Kapitel 4 bestätigt und ein eindeutiger Zusammenhang zu dem Porendurchmesser des EPS-Dämmstoffs beobachtet. Gleiches gilt für die Zementleimaufnahme des Dämmstoffs in Bezug auf eine Frischbetondruckbeanspruchung.

In Kapitel 5 wird in einer Sensitivitätsanalyse unter Einsatz von unterschiedlichsten EPS-Dämmstoffen festgestellt, dass die Höhe des Zementleimeintrags ausschließlich von dem Porendurchmesser des EPS-Dämmstoffs und dem w/z-Wert des Frischbetons abhängig ist. Weitere Parameter, wie die Oberflächenausbildung des Dämmstoffs oder die Verdichtungsdauer, der Wassergehalt oder die Konsistenzklasse des Frischbetons, haben einen vernachlässigbar kleinen Einfluss. Anschließend wird die in den Dämmstoff eingedrungene Zementleimmenge für drei verschiedene Porendurchmesser und vier w/z-Werte experimentell quantifiziert und zugehörige Berechnungsgleichungen werden hergeleitet. Mit der Verlagerung von Zementleim aus dem Ortbeton in den Dämmstoff geht zum einen eine Verschlechterung der Dämmstoffeigenschaften einher, da Wasser und Zement die Wärmeleitfähigkeit des Materials erhöhen. Zum anderen erhöht sich die Druckfestigkeit des Ortbetons, weil

der w/z -Wert reduziert wird und das in den Dämmstoff eingedrungene Wasser während der Hydratation des Betons nachbehandelnd wirkt.

Zur weiteren Untersuchung des Frischbetondrucks werden in Kapitel 6 Versuche zur Schwingungsübertragung im System „Elementwand mit integriertem Dämmstoff“ durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind sowohl Dämpfungskonstanten von Frischbeton Ω_V als auch Dämpfungskonstanten für die vertikale Schwingungsübertragung über die Schalungsflächen Ω_S .

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wird in Kapitel 7 ein Berechnungsmodell für den Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff entwickelt. Dieses berücksichtigt zusätzlich zu den Einflussparametern der *DIN 18218* (Rohwichte, Konsistenzklasse, Temperatur und Erstarrungsende des Ortbetons sowie Betoniergeschwindigkeit) die Dicke der Ortbetonergänzung, den Typ des Dämmstoffs, die Betonrezeptur des Ortbetons, die Betonierhöhe und die Eigenschaften des verwendeten Innenrüttlers. Durch eine weitere experimentelle Großversuchsreihe wird das Berechnungsmodell validiert und kalibriert. Die Untersuchungen zeigen, wie wichtig die Validierung eines Berechnungsmodells anhand von Messergebnissen ist, um Schwachstellen im Modell zu identifizieren und anzupassen.

Um eine einfache Verwendbarkeit des Berechnungsmodells zu gewährleisten, wird dieses in eine praxistaugliche Form gebracht. Hierzu werden in Kapitel 8 einige Vereinfachungen getroffen, sodass die Berechnung des Drucks analog zur *DIN 18218* anhand einfacher Formeln, Tabellen und Diagrammen ermöglicht wird. Zudem werden Unter- und Obergrenzen für zulässige Konsistenzklassen, Betoniergeschwindigkeiten, Erstarrungszeiten des Ortbetons und die Dicke der Ortbetonergänzung definiert. Für die Ermittlung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem EPS-Dämmstoff wird deshalb die Verwendung des vereinfachten Berechnungsmodells aus Kapitel 8 vorgeschlagen. Zur Anwendung in der Praxis wird ein Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung Frischbetondruck hergeleitet. Unter Berücksichtigung der *DIN EN 1990* und Einbezug eigener Versuchsergebnisse liegt der Teilsicherheitsbeiwert γ_F bei 1,5 und entspricht damit dem aktuell gültigen Teilsicherheitsbeiwert für eine Frischbetondruckbeanspruchung nach *DIN 18218*. Beim Einsatz von XPS-Dämmstoffen wird aufgrund unzureichender Übereinstimmung zwischen Modell und Rechnung weiterhin die Verwendung der *DIN 18218* empfohlen.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Zementleimaufnahme von EPS-Dämmstoffen einen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit des Ortbetons hat. Bei Festigkeitsklassen zwischen C12/15 und C40/50 kann von einer zehnpromzentigen Erhöhung der charakteristischen Druckfestigkeit ausgegangen werden. Bei höheren Festigkeitsklassen kann der Einfluss vernachlässigt werden. Ein negativer Nebeneffekt durch ein erhöhtes Schwind- und Kriechmaß kann ausgeschlossen werden. Die Zementleimaufnahme beeinflusst außerdem die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs. Bei Dämmstoffdicken zwischen 5 und 15 cm muss die Wärmeleitfähigkeit um rund 3 % erhöht werden. Ab einer Dicke von 15 cm kann der Einfluss vernachlässigt werden.

Die Wirtschaftlichkeit des Berechnungsmodells wird am Ende anhand von zwei Berechnungsbeispielen verdeutlicht. Insbesondere bei hohen Wänden und beim Einsatz von fließfähigen Rüttelbetonen können durch den zukünftigen Einsatz des Berechnungsvorschlags für die Bemessung nennenswerte Einsparungen an Material-, Lohn- und Betriebskosten gemacht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird außerdem ein Berechnungstool vorgestellt, welches die Ermittlung des charakteristischen Frischbetondrucks, sowohl nach dem realitätsnahen Berechnungsmodell nach Kapitel 7 als auch nach dem empfohlenen Berechnungsvorschlag für die Bemessung nach Kapitel 8, ermöglicht.

9.2 Ausblick

Das entwickelte Berechnungsmodell basiert auf theoretischen Betrachtungen und experimentellen Untersuchungen im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern. Da es einen nennenswerten Unterschied zwischen Laborbedingungen und Baustellenbedingungen geben kann, sollte das Berechnungsmodell auch innerhalb einiger Pilotbauvorhaben auf seine Anwendbarkeit überprüft werden.

Der Einbezug der Porengröße eines EPS-Dämmstoffs in das Berechnungsmodell für die Bemessung stellt sich als schwierig heraus, da diese nur in Ausnahmefällen bekannt ist. Die Bestimmung des mittleren Porendurchmessers muss aktuell in mühsamer Handarbeit erfolgen. Zur Lösung dieses Problems wird in Kapitel 4.5 ein Ansatz zur automatisierten Porenerkennung mittels eines Algorithmus aus der Bildverarbeitung erarbeitet. Zum aktuellen Stand treten jedoch noch erhebliche Abweichungen auf und darüber hinaus sind manuelle Justierungen notwendig. Die Entwicklung eines geeigneten Erkennungsalgorithmus für die Porengröße von EPS-Dämmstoffen sollte in Zukunft weiterverfolgt werden, da der Frischbetondruck hierdurch genauer beschrieben werden kann und sich eine wirtschaftlichere Bemessung ergibt.

Der Einsatzbereich des Modells für die Praxis wurde auf den experimentell validierten Bereich eingeschränkt, indem für die Konsistenzklasse, die Betoniergeschwindigkeit, das Erstarrungsende des Ortbetons und die Dicke der Ortbetonergänzung feste Unter- und Obergrenzen definiert wurden. Für eine Erweiterung des Einsatzbereichs sollten hierzu weitere Validierungsversuche durchgeführt werden, um die Gültigkeit des Modells nachzuweisen.

Im Weiteren sollten umfangreichere Untersuchungen zur Schwingungsübertragung in Elementwänden mit geschlossenporigen Dämmstoffen wie bspw. XPS oder PU durchgeführt werden. Als Ergebnis der Untersuchungen könnte ebenfalls ein wirtschaftlicheres Frischbetondruckmodell im Vergleich zur *DIN 18218* entstehen.

Bei der Bestimmung eines Teilsicherheitsbeiwerts für die Einwirkung Frischbetondruck ergibt sich derzeit ein großer Spielraum. Eine Frischbetondruckbeanspruchung entspricht einer vorübergehenden Einwirkung, vielmehr sogar einer einmalig auftretenden Einwirkung, im Bauzustand. Zwar kann für Elementwände mit integriertem Dämmstoff eine niedrigere Zuverlässigkeitsklasse definiert werden,

jedoch gibt es gemäß *DIN EN 1990* bzw. *DIN EN 1990/NA* keine Regelungen zur Bestimmung eines passenden Zuverlässigkeitsindex β .

Die realitätsnahe Beschreibung des Frischbetondrucks eröffnet ein Potential für schlankere Bauweisen. Infolge der hohen Frischbetondruckannahmen nach *DIN 18218* müssen aktuell die Fertigteilshalen relativ dick ausgebildet werden, damit eine ausreichende Verankerungstiefe der Verbindungsmittel vorhanden ist und die Schalen frei von Rissen bleiben. Durch die Annahme einer niedrigeren Frischbetondruckbelastung können die Schalendicken und gleichzeitig die Wanddicken reduziert werden. Dies begünstigt zusätzlich den Einsatz von dauerhaften Bewehrungsmaterialien aus faserverstärkten Kunststoffen, die nur noch sehr geringe Betondeckungen fordern und aufgrund der Korrosionsproblematik von Betonstahl in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen werden.

Literaturquellen

Bauer 1994

Bauer, H.: *Baubetrieb 1*, Berlin, Springer, 1994.

Beutel 2009

Beutel, R.: *Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen im jungen und erhärteten Zustand mit der Impact-Echo-Technik*. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, 2009.

Beutel u. Große 2005

Beutel, R.; Große, C. U.: *Untersuchung der Dicke und des Erstarrungsverhaltens von Frischbeton mit dem Impact-Echo-Verfahren*, 2005.

Bonzel u. Dahms 1978

Bonzel, J.; Dahms, J.: *Über den Wasseranspruch des Frischbetons*, Düsseldorf, Beton-Verlag, 1978.

Boy 2005

Boy, E.: *EPS und XPS im Bauwesen*, Ludwigshafen, 2005.

Dehn u. a. 2010

Dehn, F.; Reinisch, A.; Angerer, J.: *Frischbetondruck - Einflussfaktoren, Verantwortlichkeiten, Baupraxis*, in: Bauingenieur 85, 2010, H. April.

Düsterhaupt 2006

Düsterhaupt, S.: *Betonverdichtung. Der Einsatz von Innenvibratoren*, 2006, H. Mai.

Ertinghausen 1965

Ertinghausen, H.: *Über den Schalungsdruck von Frischbeton*, in: Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig, 1965.

Fahrmeir u. a. 2009

Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: *Regression*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009.

Felzenszwalb u. Huttenlocher 2004

Felzenszwalb, P. F.; Huttenlocher, D. P.: *Efficient Graph-Based Image Segmentation*, in: International Journal of Computer Vision, S. 167-181, 2004.

Fischer u. a. 2008

Fischer, H.-M.; Freymuth, H.; Häupl, P.; Homann, M.; Jenisch, R.; Richter, E.; Stohrer, M.: *Lehrbuch der Bauphysik*, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2008.

Forsblad 1965

Forsblad, L.: *Investigations of Internal Vibration of Concrete*. Civil Engineering and Building Construction, Acta Polytechnica Scandinavica, 1965.

Freimann 2005

Freimann, T.: *Regelungen und Empfehlungen für wasserundurchlässige (WU-)Bauwerke aus Beton*, in: Beton-Informationen, 2005, H. 3, S. 55–72.

Freund u. a. 2014

Freund, B.; Proske, T.; Grampeix, G.: *Experimentelle Untersuchungen und numerische Verifizierung zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen*, in: Beton- und Stahlbetonbau 109, 2014, H. 11, S. 803–811.

Garbotz u. Ersoy 1964

Garbotz, G.; Ersoy, S.: *Untersuchungen über die Verdichtungswirkung von Tauchrüttlern*, Westdeutscher Verlag, 1964.

Gardner 1985

Gardner, N. J.: *Pressure of Concrete on Formwork - A Review*, in: ACI Journal, 1985, H. 5, S. 744–753.

Gardner 2014

Gardner, N. J.: *Pressure of Internally Vibrated Concrete*, in: Concrete International, June, 2014, S. 33–37.

Gellert u. Karrer 2011

Gellert, R.; Karrer, C.: *Wasseraufnahme von Perimeterdämmung aus EPS-Vergleich der Prüfverfahren nach Zulassung bis 2003 und EN 13163*, Fraunhofer IRB Verlag, 2011.

Grampeix 2014

Grampeix, G.: *Vibration des Betons*. Dissertation, Université Paris-Est, 2014.

Graubner u. Glowienka 2005

Graubner, C.-A.; Glowienka, S.: *Zuverlässigkeitsanalysen von Stahlbetondruckgliedern unter besonderer Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts auf der Einwirkungsseite*, Berlin, 2005.

Grube 2013

Grube, A.: *Experimentelle Untersuchung von Einflussparametern auf den Frischbetondruck in Sandwichelementen mit nachträglicher Ortbetonergänzung*, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2013.

Hales 2009

Hales, T. C.: *Cannonballs and honeycombs*, in: Notices of the AMS Volume 47, 2009, H. 4, S. 440–449.

Hohmann 2011a

Hohmann, R.: *Elementwände im drückenden Grundwasser - Chance oder Risiko?, Teil 1: Anforderungen an das Bauen mit Elementwänden* in: Der Bausachverständige, 2011, H. 1.

Hohmann 2011b

Hohmann, R.: *Elementwände im drückenden Grundwasser - Chance oder Risiko?, Teil 2: Typische Fehler beim Bauen mit Elementwänden* in: Der Bausachverständige, 2011, H. 2.

Janssen 1895

Janssen, H. A.: *Versuche über Getreidedruck in Silozellen*, in: VDI Zeitschrift, 1895, H. 39, S. 1045–1049.

Jurecka 1968

Jurecka, W.: *Bewegungsverhalten und Verdichtungswirkung eines Tauchrüttlers*, 1968.

Kattenbusch u. a. 2012

Kattenbusch, M.; Kuhne, V.; Noosten, D.; Ernesti, W.; Kuhlenkamp, D.; Stiglocher, H.: *Plümecke*, Rudolf Müller GmbH, Köln, 2012.

Kolka 2015

Kolka, C.: *Dynamische Schwingungsübertragung beim Verdichten von Frischbeton*, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2015.

Künzel 1985

Künzel, H.: *Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?*, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 1985.

L'Hermite u. Tournon 1948

L'Hermite, R.; Tournon, G.: *Vibration of Fresh Concrete (La vibration du beton frais)*. Anlès, Institut Technique du Batiment et des Travaux Publices, 1948.

Meschede 2015

Meschede, D.: *Gerthsen Physik*, Berlin [u. a.], Springer Spektrum, 2015.

Meurer 2016

Meurer, N. G.: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum horizontalen Frischbetondruck in Elementwänden mit integriertem Dämmstoff*, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2016.

Neroth u. Vollenschaar 2011

Neroth, G.; Vollenschaar, D.: *Wendehorst Baustoffkunde*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.

Pahn 2011

Pahn, M.: *Beitrag zur Ermittlung von Schnitt- und Verformungsgrößen bei mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff*. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2011.

Proske 2007

Proske, T.: *Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton. Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung*. Dissertation, TU Darmstadt, 2007.

Proske u. a. 2014

Proske, T.; Khayat, K. H.; Omran, A.; Leitzbach, O.: *Form pressure generated by fresh concrete: a review about practice in formwork design*, in: *Materials and Structures* 47, 2014, S. 1099–1113.

Puente u. a. 2010

Puente, I.; Santilli, A.; Lopez, A.: *Lateral pressure over formwork on large dimension concrete blocks*, in: *Engineering Structures*, 2010, H. 32, S. 195–206.

Rabe u. a. 2008

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2008.

Ritchie 1962

Ritchie, A. G. B.: *The Triaxial Testing of Fresh Concrete*, in: Magazine of Concrete Research, 1962, H. Vol. 14, S. 37–41.

Rodin 1952

Rodin, S.: *Pressure of Concrete on Formwork*, in: Proceedings, Institution of Civil Engineers, Vol. 1, 1952, S. 709–746.

Schwabe 2002

Schwabe, J.-H.: *Schwingungstechnische Auslegung von Betonrohrfertigern*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2002.

Sefrin 2015

Sefrin, R.: *Theoretische und experimentelle Untersuchung der Einflüsse einer in Elementwänden integrierten Wärmedämmung auf den horizontalen Frischbetondruck*, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2015.

Soutsos u. a. 1999

Soutsos, M. N.; Bungey, J. H.; Brizell, M. J.: *Vibration of fresh concrete: Experimental set-up and preliminary results*, 1999.

Specht 1973

Specht, M.: *Die Belastung von Schalung und Rüstung durch Frischbeton*, Düsseldorf, Werner Verlag GmbH, 1973.

Specht 1981

Specht, M.: *Der Frischbetondruck nach DIN 18218 - die Grundlagen und wichtigsten Festlegungen*, in: Bautechnik 58, 1981, H. 8, S. 253–261.

Specht 1987

Specht, M.: *Theorie des Frischbetondrucks - gegenwärtiger Stand und ungeklärte Probleme*, in: Bautechnik 64, 1987, H. 3.

Stauder 2015

Stauder, F.: *Zuverlässigkeitskonzept für bestehende Tragwerke im Wasserbau*. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2015.

Toussaint 1973

Toussaint, E.: *Beitrag zur Theorie des Schalungsdruckes*, in: Mayreder, 1973, H. 5, S. 4–12.

Vieweg u. Daumiller 1969

Vieweg, R.; Daumiller, G.: *Kunststoffhandbuch Band V - Polystyrol*, München, Carl Hanser Verlag, 1969.

Vismann 2012

Vismann, U.: *Wendehorst*, Vieweg + Teubner, 2012.

Walz 1972

Walz, K.: *Herstellung von Beton nach DIN 1045*, Düsseldorf, Beton-Verlag, 1972.

Winterling u. Sonntag 2011

Winterling, H.; Sonntag, N.: *Polystyrol-Hartschaumstoff (EPS, XPS)*, in: *Kunststoffe* 10, 2011, S. 32–37.

Zilch u. a. 2011

Zilch, K.; Diederichs, C. J.; Katzenbach, R.; Beckmann, K. J.: *Handbuch für Bauingenieure*, Springer Berlin, 2011.

Zilch u. Zehetmaier 2010

Zilch, K.; Zehetmaier, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2010.

Normen, Regelwerke, Zulassungen und Produktdatenblätter

ACI 309.1R

American Concrete Institute, H. ACI 309.1R-08: *Report on Behavior of Fresh Concrete During Vibration*, Farmington Hills, Michigan, USA, 08.2008.

ACI 347-14

American Concrete Institute, H. ACI 347-14: *Guide to Formwork for Concrete*, 2014.

BASF 2013

BASF: *Neopor® F5300*, Januar 2013.

BASF 2014a

BASF: *Styropor® F15 E Reihe*, Januar 2014.

BASF 2014b

BASF: *Styropor® F95 E Reihe Technisches Merkblatt*, Januar 2014.

BASF 2014c

BASF: *Neopor® F2000*, Mai 2014.

BASF 2014d

BASF: *Styropor®, Neopor® und Peipor® von BASF*, Juni 2014.

BASF 2014e

BASF: *Peripor® E Reihe*, August 2014.

Beton 2007

Dickamp, M. J.; Richter, T.: *Zement-Merkblatt Betontechnik B4. Eigenschaften und Prüfungen*, 2007.

Beton 2013

Kampen, R.: *Zement-Merkblatt Betontechnik B7. Bereiten und Verarbeiten von Beton*, 2011.

Beton 2014

Kampen, R.; Richter, T.: *Zement-Merkblatt Betontechnik B3. Zusatzmittel und Zusatzstoffe*, 2014.

CAN/CSA S269.3

Canadian Standard Association, H. CSA S269.3-M92 (R2013): *Concrete Formwork*, Mississauga, Ontario, Canada, 2013.

CIB-CEB-FIP 1977

Groupe Inter-Associations CIB-CEB-FIP: *Manual de Technologie*, Coffrage, 1977.

CIRIA 1985

Construction Industry Research and Innovation Association, H. 108: *Concrete Pressure on Formwork*, 1985.

DAfStb 567

Graubner, C.-A.: *Sachstandbericht Frischbetondruck fließfähiger Betone*, Beuth Verlag GmbH, Berlin [u. a.], 2006.

DBV 2014

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.: *Betonierbarkeit von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton*, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V., Berlin, 2014.

DIN 4235-1

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 4235-1: *Verdichten von Beton durch Rütteln – Rüttelgeräte und Rüttelmechanik*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.1978.

DIN 4235-2

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 4235-2: *Verdichten von Beton durch Rütteln – Verdichten mit Innenrüttlern*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.1978.

DIN EN 12087

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12087: *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen*; Deutsche Fassung EN 12087:2013, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2013.

DIN EN 12350-3

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12350-3: *Prüfung von Frischbeton - Teil 3: Vebe-Prüfung*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2009.

DIN EN 12350-4

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12350-4: *Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2009.

DIN EN 12350-5

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12350-5: *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2009.

DIN EN 12350-6

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12350-6: *Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 03.2011.

DIN EN 12350-7

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12350-7: *Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2009.

DIN EN 12350-8

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12350-8: *Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 10.2012.

DIN EN 12390-3

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12390-3: *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2009.

DIN EN 12667

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12667: *Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät (Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand)*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05.2001.

DIN EN 12812

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12812: *Traggerüste - Anforderungen, Bemessung und Entwurf*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2008.

DIN EN 13163

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 13163: *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) - Spezifikation*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2016.

DIN EN 13164

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 13164: *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrol (XPS) - Spezifikation*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 04.2015.

DIN EN 13165

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 13165: *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PU) - Spezifikation*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 09.2016.

DIN EN 14992

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 14992: *Betonfertigteile – Wandelemente*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 09.2012.

DIN 18218

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 18218: *Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2010.

DIN EN 1990

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1990: *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*; Deutsche Fassung EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2010.

DIN EN 1990/NA

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1990/NA: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2010.

DIN EN 1992-1-1

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1992-1-1: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2011.

DIN EN 1992-1-1/NA

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1992-1-1/NA: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2011.

DIN 1045-2

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 1045-2:2008-08: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton -Teil 2: Beton - Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2011.

DIN 4085

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 4085: *Baugrund - Berechnung des Erddrucks*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05.2011.

DIN 4108-4

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 4108-4: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 02.2013.

DIN EN 4108-10

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 4108-10: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2015.

DIN EN 1602

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1602: *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Rohdichte*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05.2013.

DIN EN 1609

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1609: *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen*; Deutsche Fassung EN 1609:2013, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05.2013.

DIN EN 206

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 206: *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*; Deutsche Fassung EN 206:2013, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2014.

DIN EN 480-2

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 480-2: *Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren; Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 02.2005.

DIN EN 826

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 826: *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung*; Deutsche Fassung EN 826:2013, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05. 2013.

ELEMENTA 2013

ELEMENTA Betonfertigteile GmbH: *Montageanleitung zu Elementa Wand- und Deckenelemente*, 2013.

EnEV 2016

Gesetz der Bundesregierung: *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)*, 2016.

EPD 2012b

Industrieverband Hartschaum e.V., H. EPD-IVH-2009311-D: *EPS-Hartschaum (Styropor®) für Wände und Dächer*, 11.12.20012.

EPD 2012c

Industrieverband Hartschaum e.V., H. EPD-IVH-2009111-D: *EPS-Hartschaum (Styropor®) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung*, 11.12.2012.

EPD 2012a

Industrieverband Hartschaum e.V., H. EPD-IVH-2009211-D: *EPS-Hartschaum (grau) mit Wärmestrahlungsabsorber*, 11.12.2012.

EPD 2015

Industrieverband Hartschaum e.V., H. EPD-IVH-20140139-IBB1-DE und EPD-IVH-20140141-IBB1-DE: *EPS-Hartschaum (Styropor®) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung*, 08.04.2015.

FBG 2006

Fachvereinigung Betonbauteile mit Gitterträgern e.V. (BmG): *Systembauteile in High-Tech: Bausysteme mit Gitterträgern*, <http://www.fachvereinigung-bmg.de/downloads>, 2006.

Heidelberg 2014

HeidelbergCement AG: *Betontechnische Daten*, 2014.

Schöck 2016

Schöck Bauteile GmbH: *Produktpreisliste*, 01.2016.

Spürgin 2016

Betonfertigteile Spürgin GmbH & Co. KG: *Montageanleitung*, 2016.

Syspro 2009

Syspro-Gruppe Betonbauteile e.V.: *Montageanleitung für Doppel- und Thermowände*, 2009.

VDI 3633

Verein Deutscher Ingenieure e. V., H. VDI 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*, Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure e. V., 12.2013.

Z-21.8-1927

Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-21.8-1927*, Syspro-Perfect-Verbindungsstäbe, 2011.

Z-15.2-100

Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-15.2-100*, Kaiser-Omnia-Plattenwand mit Kaiser-Gitterträgern KT 800, KT 900 oder KTE, 2014.

Z-21.8-1894

Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-21.8-1894*, Schöck Thermoanker, 2014.

Z-21.8-1979

Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-21.8-1979*, HALFEN Sandwichanker MVA und FA, 2014.

Z-15.2-40

Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-15.2-40*, Filigran-Gitterträger, 2015.

Z-21.8-1911

Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-21.8-1911*, TMDW-Anker für dreischichtige Stahlbeton-Wandtafeln, 2015.

Z-21.8-1926

Deutsches Institut für Bautechnik: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-21.8-1926*, HALFEN Sandwichplattenanker SPA, 2016.

Anhang A

Theoretische Betrachtungen (Kapitel 3.2)

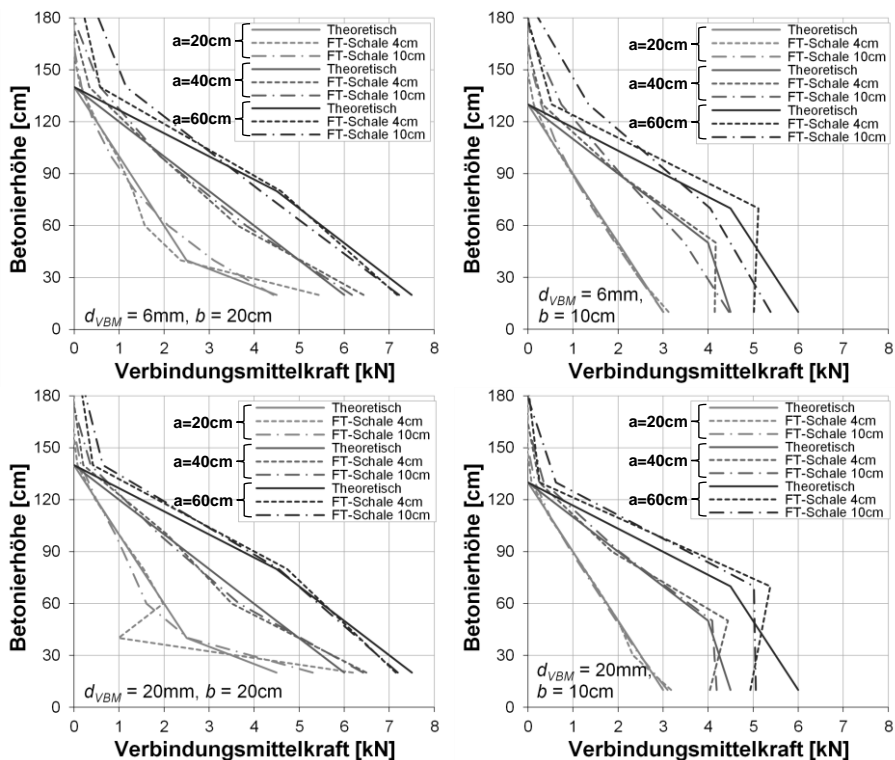


Abb. A 1: Verbindungsmittelkräfte bei Variation der FT-Betonschalendicke und des Achsabstands der stabförmigen Verbindungsmittel

Versuche am Kleinversuchsstand (Kapitel 3.4)

Tab. A 1: Zusammenstellung aller Daten der Kleinversuchsreihe

Versuch	Ausbreitmaß [cm]	Konsistenzklasse	Rohdichte [kg/m³]		Betonierhöhe [cm]		1. Verdichtung		2. Verdichtung		
			unverdichtet	verdichtet	1. Verd.	2. Verd.	Sek. [s]	Druck [kN/m²]	Sek. [s]	Druck [kN/m²]	
KV01	DMS 1	50	F4	2274	2366	61	64	294,5-328,0	3,59	453,5-492,5	4,32
	DMS 2								7,52		9,66
	DMS 3								11,51		12,59
KV02	DMS 1	41	F2	2171	2339	59	63	340,0-375,5	3,37	576,5-614,5	4,53
	DMS 2								7,21		7,28
	DMS 3								12,32		13,98
KV03	DMS 1	55	F4	2329	2372	61	64	232,5-260,5	3,37	385,5-411,5	3,60
	DMS 2								7,60		8,36
	DMS 3								11,11		13,29
KV04	DMS 1	70	SVB	2297	-	65	65	*	*	*	4,20
	DMS 2										6,23
	DMS 3										10,03
KV05	DMS 1	40	F2	2210	-	58	64	261,0-279,0	3,44	425,5-459,5	4,34
	DMS 2								8,41		8,69
	DMS 3								12,31		13,03
KV06	DMS 1	53	F4	2275	2375	61	64	188,5-223,0	4,49	305,0-340,5	5,08
	DMS 2								9,45		10,85
	DMS 3								19,06		19,86
KV07	DMS 1	69	SVB	2319	-	65	65	*	*	*	4,41
	DMS 2										6,53
	DMS 3										10,62
KV08	DMS 1	38	F2	2066	2329	57	63	183,0-200,0	2,86	391,0-413,0	4,23
	DMS 2								7,47		9,81
	DMS 3								11,30		12,94
KV09	DMS 1	50	F4	2298	2348	61	64	217,5-239,5	4,22	396,5-421,0	5,03
	DMS 2								6,27		6,96
	DMS 3								12,39		13,27
KV10	DMS 1	51	F4	2325	-	-	-	*	*	*	2,93
	DMS 2										1,65
	DMS 3										4,08
KV11	DMS 1	39	F2	2222	2360	59	64	193,0-209,5	3,68	312,5-340,5	4,76
	DMS 2								5,37		6,72
	DMS 3								12,41		13,46
KV12	DMS 1	52	F4	2272	2335	62	64	248,0-273,5	4,06	498,5-523,0	4,88
	DMS 2								5,06		5,75
	DMS 3								12,60		13,72
KV13	DMS 1	39	F2	2064	2197	60	63	267,0-300,5	4,57	452,0-487,0	5,17
	DMS 2								7,93		8,23
	DMS 3								13,65		14,24
KV14	DMS 1	51	F4	2116	2322	62	64	181,0-219,0	5,67	315,5-347,0	5,73
	DMS 2								8,38		8,49
	DMS 3								13,88		14,13
KV15	DMS 1	40	F2	2262	2335	61	64	247,0-290,0	2,72	468,5-523,5	3,57
	DMS 2								5,73		6,64
	DMS 3								10,05		11,21
KV16	DMS 1	50	F4	2285	2357	62	64	380,0-422,5	4,17	555,0-590,5	4,42
	DMS 2								6,19		5,91
	DMS 3								11,3		11,84
KV17	DMS 1	74	SVB	2354	-	65	65	*	*	*	4,55
	DMS 2										5,62
	DMS 3										9,59

- Messfehler und damit keine weitere Berücksichtigung in der Auswertung
- kein Messwert vorhanden
- * keine Verdichtung wegen Verwendung von SVB

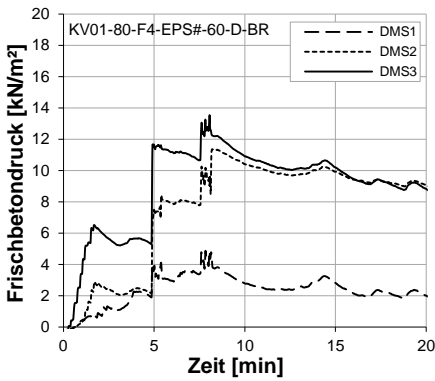


Abb. A 2: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV01

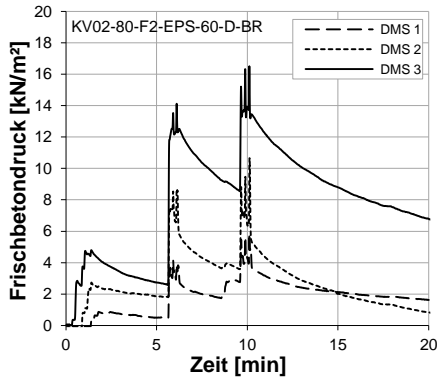


Abb. A 3: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV02

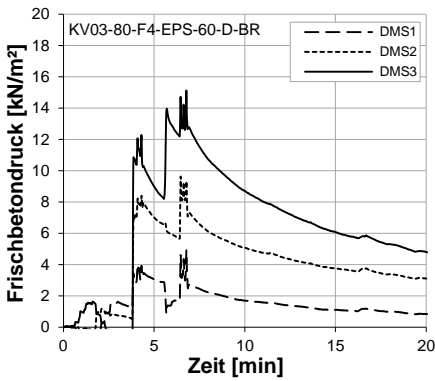


Abb. A 4: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV03

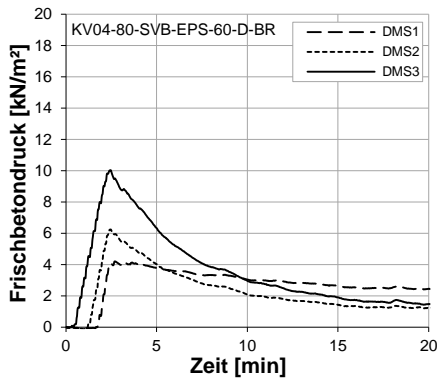


Abb. A 5: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV04

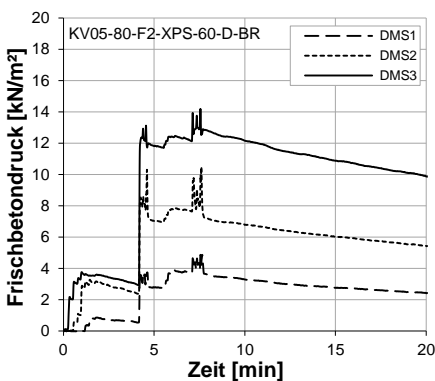


Abb. A 6: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV05

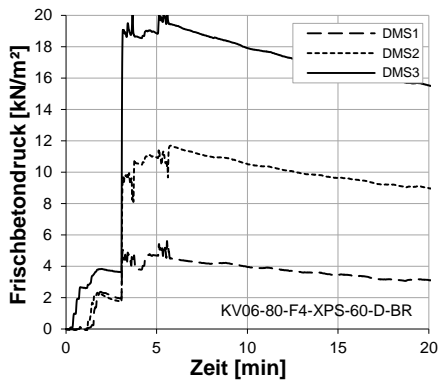


Abb. A 7: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV06

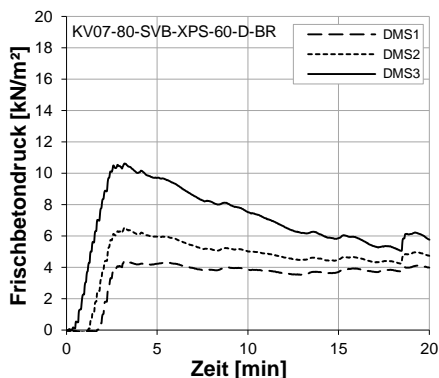


Abb. A 8: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV07

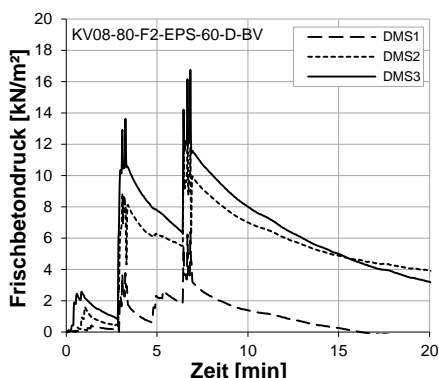


Abb. A 9: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV08

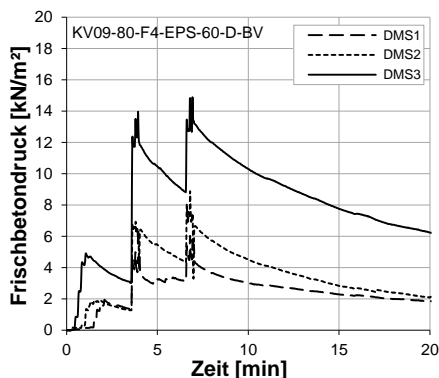


Abb. A 10: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV09

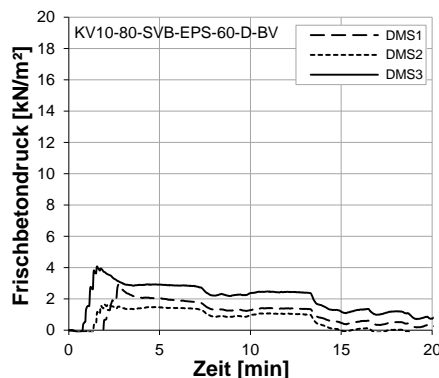


Abb. A 11: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV10

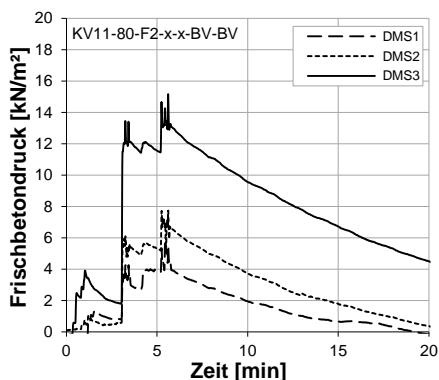


Abb. A 12: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV11

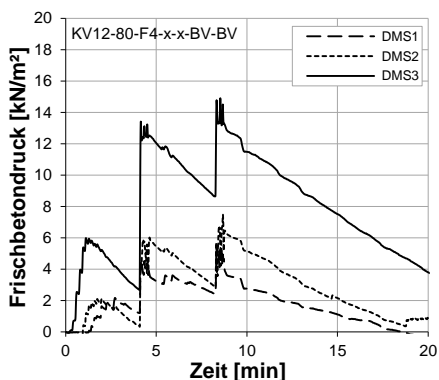


Abb. A 13: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV12

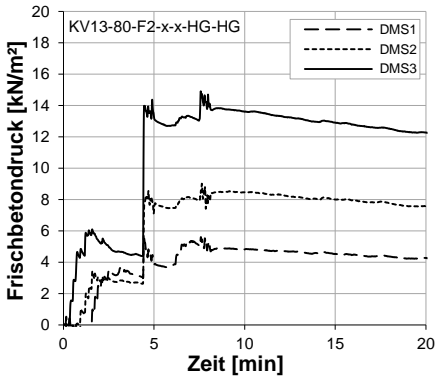


Abb. A 14: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV13

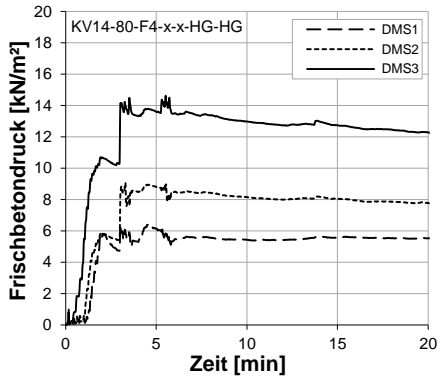


Abb. A 15: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV14

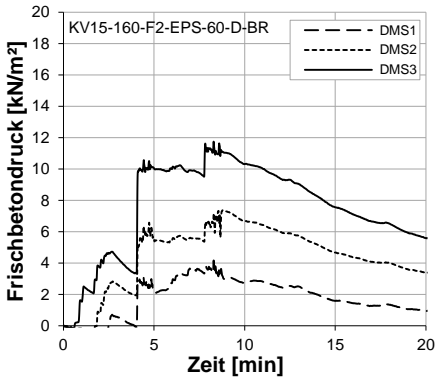


Abb. A 16: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV15

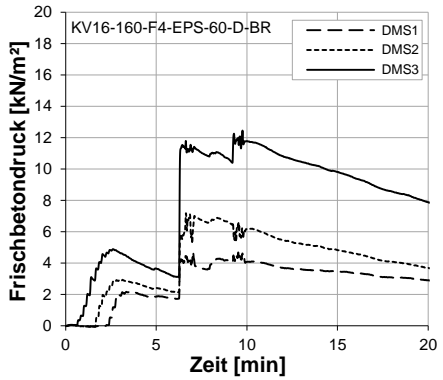


Abb. A 17: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV16

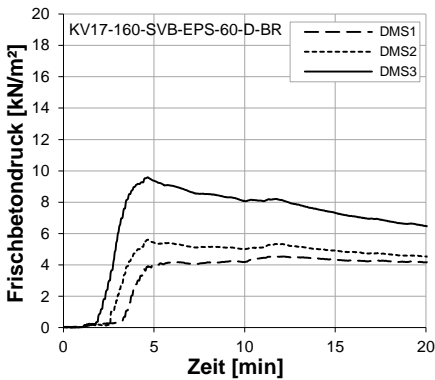


Abb. A 18: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von KV17

Anhang B

Versuche am Großversuchsstand (Kapitel 3.5)

Tab. B 1: Zusammenstellung aller Daten der Großversuchsreihe

Versuch		Ausbreitmaß [cm]	Konsistenzklasse	Rohdichte [kg/m³]	Erstarrungs-ende [h]	Betonierhöhe [cm]	Frischbetondruck [kN/m²]			
							DMS 1	DMS 3	DMS 3	DMS 4
GV01	1. Charge	42,0	F2	2300,6	5,00	48,2	3,48	-0,95	0,68	0,48
	2. Charge	38,5				99,7	17,52	-0,95	-1,16	2,25
	3. Charge	34,5				150,0	31,57	5,05	5,32	3,82
GV02	1. Charge	35,0	F1	2322,0	5,30	50,8	1,91	-1,70	0,34	-0,27
	2. Charge	33,0				93,2	14,32	-2,45	-1,36	1,16
	3. Charge	29,5				147,5	29,25	14,18	8,39	4,36
GV03	1. Charge	37,0	F2	2313,3	6,25	47,7	1,70	-2,52	0,41	0,34
	2. Charge	35,0				96,2	14,45	1,50	1,30	2,05
	3. Charge	33,0				151,3	33,82	13,57	13,70	7,77
GV04	1. Charge	35,0	F1	2353,0	6,00	39,7	-2,73	0,48	1,36	-0,89
	2. Charge	33,0				82,2	6,07	-2,32	1,98	-1,91
	3. Charge	33,5				146,0	15,14	7,64	4,84	-5,52
GV05	1. Charge	46,0	F2	2326,3	5,65	50,3	3,61	1,43	2,45	0,75
	2. Charge	41,5				98,0	16,64	0,27	0,27	6,27
	3. Charge	39,5				152,2	33,14	12,41	9,68	11,25
GV06	1. Charge	41,0	F2	2352,6	6,00	48,2	2,93	-0,20	1,70	0,82
	2. Charge	38,0				98,5	14,73	-1,57	-0,14	2,80
	3. Charge	37,0				158,0	34,98	15,55	11,93	1,36

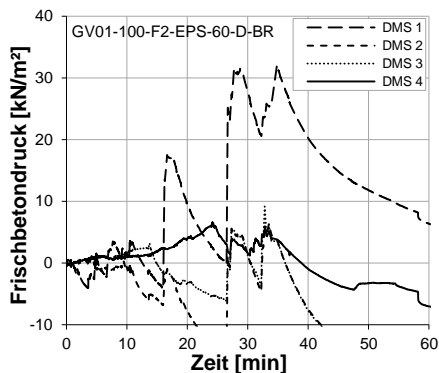


Abb. B 1: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von GV01

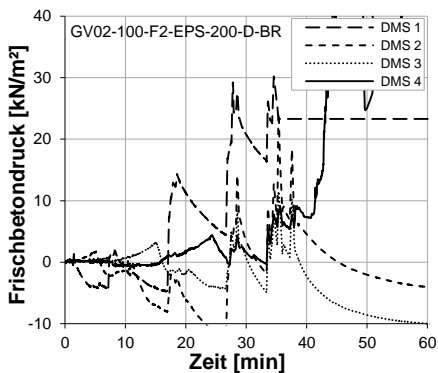


Abb. B 2: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von GV02

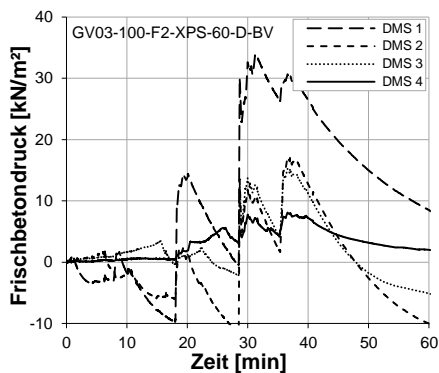


Abb. B 3: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von GV03

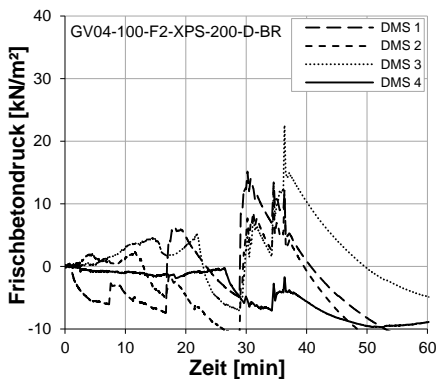


Abb. B 4: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von GV04

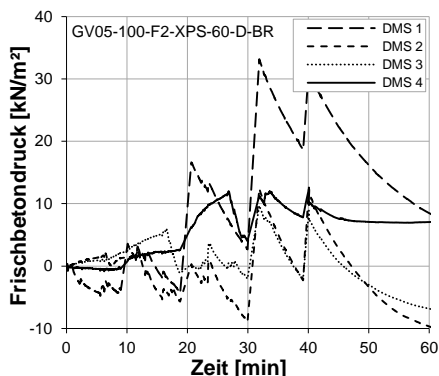


Abb. B 5: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von GV05

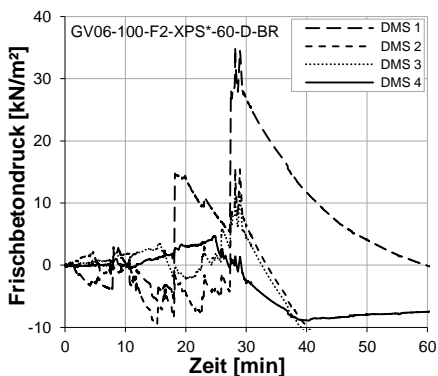


Abb. B 6: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von GV06

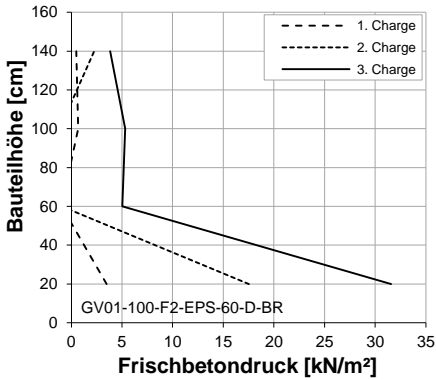


Abb. B 7: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe bei GV01

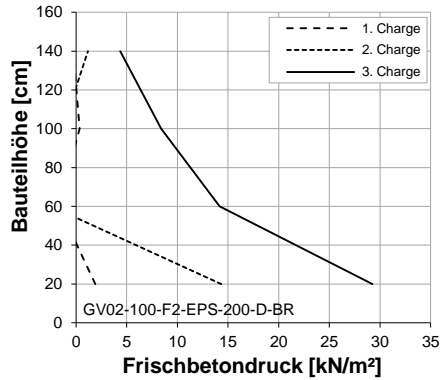


Abb. B 8: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe bei GV02

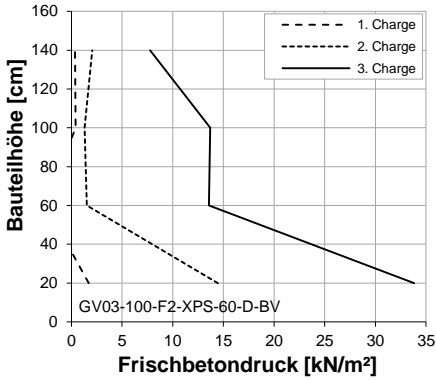


Abb. B 9: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe bei GV03

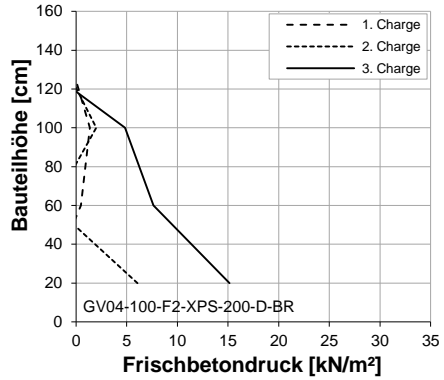


Abb. B 10: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe bei GV04

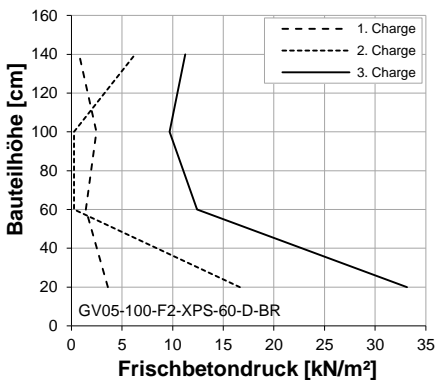


Abb. B 11: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe bei GV05

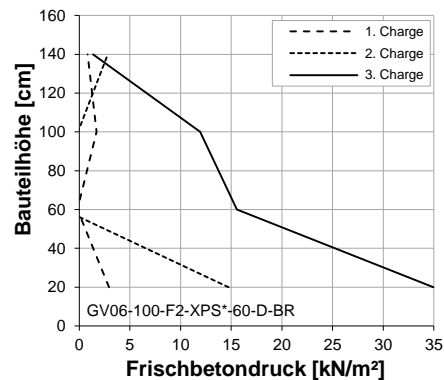


Abb. B 12: Maximaler Frischbetondruck über die Bauteilhöhe bei GV06

Anhang C

Versuche an hohen Elementwänden (Kapitel 3.6)

Tab. C 1: Zusammenstellung aller Daten der hohen Elementwände (HE)

Charge			1	2	3	4	5	6	7	8	
Ausbreitmaß [cm]	HE01	Vertikaler Abstand vom Fußpunkt [cm]	57,5	58,5	60,5	55,0	57,0	58,0	57,5	52,5	
	HE02		63,0	55,5	55,0	54,5	53,0	56,0	55,5	55,0	
	HE03		54,5	55,5	61,0	58,5	62,5	57,5	55,5	54,5	
Betonierhöhe [cm]	HE01		47,5	97,0	147,0	195,0	246,5	295,0	346,0	396,0	
	HE02		44,0	97,0	143,0	194,0	244,0	293,0	344,0	397,0	
	HE03		48,0	101,0	151,0	203,0	249,0	297,0	344,5	397,0	
Abst. Fußpunkt zu Rüttler [cm]			0,0	25,5	74,0	122,5	170,5	219,5	268,0	316,5	
Mittlere Frischbetonrohddichte [kN/m³]	HE01		23,04								
	HE02	23,03									
	HE03	23,00									
Maximale Verbindungsmittelkraft [kN]	HE01	DMS 1	20	0,96	3,22	5,26	3,63	2,63	2,29	2,12	2,07
		DMS 2	60	-0,12	0,72	2,14	1,72	0,44	-0,04	-0,24	-0,29
		DMS 3	100	-0,05	0,29	1,67	2,96	2,34	0,88	0,26	0,10
		DMS 4	140	-0,01	0,03	0,69	1,86	3,00	1,97	0,64	0,22
		DMS 5	180	-0,01	-0,01	0,05	0,70	2,17	2,84	1,79	0,66
		DMS 6	220	0,00	0,02	0,04	0,13	1,01	2,59	3,45	1,97
		DMS 7	260	-0,01	-0,01	-0,01	-0,04	0,24	1,48	3,12	3,69
		DMS 8	300	-0,02	-0,02	-0,01	0,03	-0,04	0,21	1,50	2,92
	HE02	DMS 1	20	1,30	3,26	5,24	7,24	7,95	6,58	4,66	3,77
		DMS 2	60	0,01	0,71	1,80	3,25	4,62	3,79	1,79	0,12
		DMS 3	100	-0,03	0,35	1,44	3,11	4,88	5,62	4,86	2,86
		DMS 4	140	0,01	0,02	0,45	1,76	3,56	5,31	6,68	4,19
		DMS 5	180	0,00	-0,05	0,03	0,62	1,68	3,48	5,76	4,40
		DMS 6	220	0,00	0,00	0,04	0,18	0,98	2,52	4,50	5,39
		DMS 7	260	0,00	0,03	0,04	0,02	0,10	1,36	2,89	4,91
		DMS 8	300	0,00	-0,04	-0,05	-0,05	-0,06	0,26	1,63	3,29
	HE03	DMS 1	20	1,42	3,52	5,51	7,29	8,61	8,46	6,03	4,99
		DMS 2	60	0,27	1,64	3,18	4,98	6,62	7,95	6,38	4,90
		DMS 3	100	0,03	0,47	1,71	3,42	5,09	6,76	7,79	8,40
		DMS 4	140	-0,04	0,07	0,55	2,20	3,76	5,44	7,25	9,28
		DMS 5	180	-0,01	0,21	0,23	0,74	2,14	3,79	5,54	7,63
		DMS 6	220	-0,04	-0,08	0,08	0,12	0,77	2,25	4,02	6,12
		DMS 7	260	0,02	-0,04	-0,01	-0,12	0,17	1,10	2,65	4,53
		DMS 8	300	0,00	-0,05	0,15	0,03	0,04	0,13	1,35	3,14
Maximaler Frischbetondruck [kN/m²]	HE01	DMS 1	20	6,02	20,15	32,85	22,67	16,45	14,32	13,22	12,92
		DMS 2	60	-0,73	4,50	13,36	10,75	2,76	-0,24	-1,48	-1,81
		DMS 3	100	-0,32	1,82	10,42	18,47	14,65	5,48	1,61	0,60
		DMS 4	140	-0,05	0,20	4,32	11,65	18,75	12,33	4,03	1,36
		DMS 5	180	-0,05	-0,04	0,29	4,36	13,57	17,77	11,19	4,15
		DMS 6	220	0,01	0,10	0,27	0,80	6,33	16,16	21,58	12,32
		DMS 7	260	-0,04	-0,07	-0,05	-0,22	1,48	9,23	19,51	23,06
		DMS 8	300	-0,12	-0,15	-0,06	0,17	-0,25	1,28	9,39	18,23
	HE02	DMS 1	20	8,13	20,39	32,74	45,24	49,68	41,12	29,10	23,56
		DMS 2	60	0,05	4,42	11,27	20,31	28,87	23,71	11,19	0,72
		DMS 3	100	-0,20	2,17	8,97	19,43	30,52	35,11	30,40	17,86
		DMS 4	140	0,07	0,15	2,78	11,01	22,27	33,16	41,73	26,19
		DMS 5	180	0,01	-0,31	0,19	3,85	10,51	21,73	36,02	27,53
		DMS 6	220	0,00	0,01	0,28	1,15	6,12	15,74	28,11	33,69
		DMS 7	260	0,03	0,21	0,27	0,14	0,60	8,49	18,05	30,72
		DMS 8	300	0,01	-0,26	-0,31	-0,31	-0,40	1,63	10,21	20,59
	HE03	DMS 1	20	8,87	21,98	34,46	45,59	53,82	52,88	37,69	31,20
		DMS 2	60	1,67	10,25	19,88	31,15	41,37	49,68	39,91	30,64
		DMS 3	100	0,20	2,94	10,69	21,40	31,84	42,25	48,69	52,52
		DMS 4	140	-0,23	0,43	3,45	13,73	23,51	34,00	45,31	57,99
		DMS 5	180	-0,09	1,32	1,45	4,63	13,40	23,71	34,65	47,71
		DMS 6	220	-0,26	-0,53	0,53	0,75	4,82	14,04	25,13	38,24
		DMS 7	260	0,10	-0,27	-0,04	-0,77	1,07	6,88	16,59	28,29
		DMS 8	300	-0,03	-0,30	0,91	0,18	0,28	0,81	8,44	19,64

Anhang D

Sensitivitätsanalyse (Kapitel 5.2)

Tab. D 1: Zusammenfassung der in der Sensitivitätsanalyse ermittelten Daten

Nr.	Variante	Ausbreitmaß [cm]	Massenermittlung während den Versuchen [g]					Massenberechnung nach den Versuchen [g]				
			m_0	m_{1A}	m_{1B}	m_2	m_3	m_{WA} bzw. m_{WB}		m_z		
								Einzel	Mittel	Einzel	Mittel	
S01	(1)	53,75	62,76	138,10	-	85,90	81,41	52,20	40,96	18,65	21,57	
	(2)	54,00	62,76	130,43	-	96,60	90,63	29,73		24,49		
S02	(1)	53,75	62,77	149,74	-	84,01	79,90	55,35	46,55	14,43	29,33	
	(2)	54,00	62,77	125,23	-	90,76	87,02	34,47		24,25		
	(3)	56,00	62,58	167,42	-	117,59	111,90	49,83		49,32		
S03	(1)	51,00	62,58	125,75	-	82,75	78,67	38,00	42,01	14,22	15,47	
	(2)	54,00	62,71	129,1	-	83,08	79,44	46,02		16,73		
S04	(1)	53,75	28,92	97,31	-	51,36	43,81	45,95	45,95	14,89	14,89	
S05	(1)	53,75	29,71	89,75	-	44,44	41,30	45,31	45,31	11,59	11,59	
S06	(1)	51,00	30,3	83,24	-	44,59	40,32	38,65	38,65	10,02	10,02	
S07	(1)	51,00	61,97	96,13	-	69,75	66,81	26,38	44,10	4,84	5,09	
	(2)	56,00	64,75	135,75	-	73,93	70,08	61,82		5,33		
S08	(1)	51,00	64,09	158,84	-	110,98	106,45	47,86	52,50	42,36	35,30	
	(2)	56,00	64,14	176,66	-	108,52	97,8	57,15		28,23		
S09	(1)	30,00	29,64	30,56	-	30,18	29,86	0,38	0,38	0,22	0,22	
S10	(1)	30,00	30,32	48,63	-	38,02	35,62	12,61	12,61	5,30	5,30	
S11	(1)	30,00	30,22	58,54	-	43,87	41,10	14,67	14,67	10,88	10,88	
S12	(1)	48,50	30,57	58,74	-	43,34	39,56	15,40	15,40	8,99	8,99	
S13	(1)	48,50	63,39	100,15	-	76,80	73,03	23,35	23,35	9,64	9,64	
S14	(1)	B	48,50	62,3	-	88,22	81,96	79,16	6,26	6,26	16,86	16,86
S15	(1)	A	34,00	61,92	101,38	-	80,93	75,98	19,21	21,95	13,21	21,26
	(2)	43,00	64,54	132,6	-	104,38	98,04	24,69	29,31			
S16	(1)	B	34,00	62,71	-	98,69	90,42	85,05	7,54	8,28	20,37	17,42
	(2)	43,00	63,9	-	88,7	79,68	78,38	9,02	14,48			
S17	(1)	A	49,25	63,69	162,68	-	99,82	93,57	54,09	51,30	25,71	38,86
	(2)	53,00	63,33	208,91	-	142,38	134,66	48,51	52,01			
S18	(1)	B	49,25	64,57	-	107,54	97,03	90,48	7,66	9,98	18,89	25,42
	(2)	53,00	64,43	-	115,27	102,49	97,66	12,29	31,95			

Anhang E

Quantifizierung der Zementleimaufnahme (Kapitel 5.3)

Tab. E 1: Zusammenfassung der in der Quantifizierung ermittelten Daten – Teil 1

Nr.	Variante	Ausbreitmaß [cm]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Massenermittlung während den Versuchen [g]					Massenberechnung nach den Versuchen [g/m ²]			
				m ₀	m _{1A}	m _{1B}	m ₂	m ₃	m _{WA} bzw. m _{WB}		m _Z	
									Einzel	Mittel	Einzel	Mittel
F01	(1)	35,50	67,39	29,0	43,79	-	35,0	32,8	390,67	350,52	168,89	121,48
	(2)		66,84	28,0	42,37	-	35,4	31,8	309,78		168,89	
	(3)		65,31	28,6	44,10	-	36,2	32,2	351,11		160,00	
	(4)		66,36	28,8	-	30,53	30,2	30,0	14,67	21,33	53,33	
	(5)		72,56	28,6	-	30,45	29,8	29,8	28,89		53,33	
	(6)		69,29	29,0	-	32,66	32,2	31,8	20,44		124,44	
F02	(1)	42,50	44,72	29,6	47,60	-	36,6	32,0	488,89	542,22	106,67	155,56
	(2)		44,96	28,8	48,40	-	34,8	32,0	604,44		142,22	
	(3)		43,05	30,4	51,20	-	39,2	35,0	533,33		204,44	
	(4)		51,35	29,0	-	38,40	37,0	33,0	62,22	47,41	177,78	
	(5)		55,39	28,6	-	33,90	33,0	32,2	40,00		160,00	
	(6)		53,54	30,2	-	34,50	33,6	33,4	40,00		142,22	
F03	(1)	53,00	22,32	30,4	55,20	-	39,0	35,2	720,00	773,33	213,33	179,26
	(2)		23,05	28,8	54,80	-	37,0	33,2	791,11		195,56	
	(3)		23,88	29,2	55,80	-	37,6	33,2	808,89		177,78	
	(4)		26,94	30,2	-	38,40	34,8	34,0	160,00	145,19	168,89	
	(5)		28,85	29,6	-	39,60	35,8	34,4	168,89		213,33	
	(6)		27,22	29,0	-	33,80	31,4	31,4	106,67		106,67	
F04	(1)	53,50	14,14	29,2	56,00	-	39,2	34,6	746,67	802,96	240,00	195,56
	(2)		12,33	29,8	54,20	-	37,0	34,4	764,44		204,44	
	(3)		11,82	28,0	56,00	-	35,8	32,8	897,78		213,33	
	(4)		23,81	29,8	-	38,40	34,8	34,4	160,00	121,48	204,44	
	(5)		21,15	29,4	-	36,20	34,0	33,2	97,78		168,89	
	(6)		23,45	30,2	-	36,40	34,0	33,4	106,67		142,22	
F05	(1)	48,25	42,25	51,4	66,80	-	55,8	53,8	488,89	497,78	106,67	108,89
	(2)		48,37	51,2	68,00	-	56,6	54,5	506,67		146,67	
	(3)		44,68	50,0	65,00	-	53,8	52,8	497,78		124,44	
	(4)		57,60	50,2	-	54,20	53,2	52,8	44,44	53,33	115,56	
	(5)		55,40	51,4	-	54,20	53,0	53,0	53,33		71,11	
	(6)		52,18	50,0	-	53,60	52,2	52,0	62,22		88,89	
F06	(1)	48,50	31,02	48,7	66,60	-	54,2	51,9	551,11	598,52	142,22	127,41
	(2)		33,49	49,8	69,40	-	56,6	53,3	568,89		155,56	
	(3)		30,50	50,4	72,20	-	57,0	54,2	675,56		168,89	
	(4)		44,80	50,1	-	53,80	52,6	52,6	53,33	56,30	111,11	
	(5)		43,57	48,5	-	52,20	50,6	50,6	71,11		93,33	
	(6)		43,83	48,3	-	51,40	50,4	50,4	44,44		93,33	

☐ Beschädigter Probewürfel und damit keine weitere Berücksichtigung in der Auswertung

Tab. E 2: Zusammenfassung der in der Quantifizierung ermittelten Daten – Teil 2

Nr.	Variante	Ausbreitmaß [cm]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Massenermittlung während den Versuchen [g]					Massenberechnung nach den Versuchen [g/m ²]			
				m ₀	m _{1A}	m _{1B}	m ₂	m ₃	m _{WA} bzw. m _{WB}		m _Z	
									Einzel	Mittel	Einzel	Mittel
F07	A	47,50	30,91	49,8	71,80	-	57,2	53,0	648,89	675,56	142,22	197,04
			28,25	49,4	80,40	-	64,6	54,4	702,22		222,22	
			30,15	51,2	73,20	-	58,0	55,0	675,56		168,89	
	B		41,67	50,0	-	59,80	57,2	54,0	115,56	130,37	177,78	
			40,87	49,6	-	67,00	63,6	56,0	151,11		284,44	
			32,84	50,4	-	66,00	63,2	54,6	124,44		186,67	
F08	A	47,50	-	50,0	77,40	-	58,0	56,0	862,22	838,52	266,67	260,74
			29,76	53,0	78,00	-	58,8	58,2	853,33		231,11	
			33,01	52,8	78,80	-	60,8	58,2	800,00		240,00	
	B		37,35	51,0	-	61,00	58,6	58,2	106,67	106,67	320,00	
			36,46	51,2	-	-	-	-	-		-	
			32,71	50,8	-	60,00	57,6	56,0	106,67		231,11	
F09	A	51,00	45,15	63,0	88,49	-	71,4	66,0	759,56	756,30	133,33	204,44
			51,50	62,8	86,98	-	69,6	66,6	772,44		168,89	
			50,59	59,6	86,98	-	70,4	65,8	736,89		275,56	
	B		58,92	61,8	-	74,61	69,8	68,0	213,78	181,48	275,56	
			56,10	60,0	-	68,80	65,6	65,4	142,22		240,00	
			52,83	60,2	-	68,44	64,2	63,2	188,44		133,33	
F10	A	48,50	37,36	60,8	87,80	-	68,8	65,4	844,44	814,81	204,44	214,81
			33,51	61,8	89,00	-	69,8	66,8	853,33		222,22	
			34,23	61,4	89,00	-	72,2	67,2	746,67		257,78	
	B		45,76	59,2	-	64,80	63,4	63,2	62,22	91,85	177,78	
			43,03	61,0	-	69,80	67,6	67,2	97,78		275,56	
			37,51	59,2	-	65,80	63,2	62,6	115,56		151,11	
F11	A	49,00	37,75	62,8	97,80	-	74,0	70,6	1057,78	1105,19	346,67	284,44
			39,09	61,0	95,60	-	71,4	65,4	1075,56		195,56	
			37,89	60,8	94,00	-	67,4	66,8	1182,22		266,67	
	B		43,11	61,2	-	71,20	69,0	67,8	97,78	130,37	293,33	
			42,85	62,0	-	77,80	74,2	70,2	160,00		364,44	
			44,28	61,8	-	70,60	67,6	67,2	133,33		240,00	
F12	A	50,25	20,79	61,2	100,40	-	73,6	68,6	1191,11	1208,89	328,89	333,33
			17,34	63,8	107,80	-	79,6	73,4	1253,33		426,67	
			18,25	60,0	97,00	-	70,4	67,6	1182,22		337,78	
	B		35,50	64,0	-	77,20	73,2	71,8	177,78	186,67	346,67	
			32,51	58,6	-	65,40	63,0	63,0	106,67		195,56	
			29,69	61,8	-	77,80	71,0	70,00	275,56		364,44	

□ Beschädigter Probewürfel und damit keine weitere Berücksichtigung in der Auswertung

Anhang F

Betonrezepturen

Tab. F 1: Kleinversuchsstand (Kap. 3.4)

Ausgangsstoff	Menge [kg/m³]
Wasser	187,5
Zement CEM 42,5 N	450,0
Zuschlag 0/2	525,0
Zuschlag 2/8	580,0
Zuschlag 8/16	530,0
Fließmittel (ACE 30)	0,804 für F2
	1,373 für F4
	1,745 für SVB
Eigenschaften	
Druckfestigkeitsklasse	C50/60
Sieblinie	A/B16
w/z-Wert	0,42
Konsistenzklasse	-
Verdichtungsmaß	-
Erstarrungsende	-

Tab. F 2: Großversuchsstand (Kap. 3.5)

Ausgangsstoff	Menge [kg/m³]
Wasser	170,0
Zement CEM 42,5 N	298,8
Zuschlag 0/2	576,5
Zuschlag 2/8	626,5
Zuschlag 8/16	581,9
Fließmittel (ACE 30)	-
Eigenschaften	
Druckfestigkeitsklasse	C30/37
Sieblinie	A/B16
w/z-Wert	0,57
Konsistenzklasse	F2/F3
Verdichtungsmaß	-
Erstarrungsende	6,00h

Tab. F 3: Hohe Elementwände (Kap. 3.6)

Ausgangsstoff	Menge [kg/m³]
Wasser	200,0
Zement CEM 42,5 N	315,0
Zuschlag 0/2	724,0
Zuschlag 2/8	586,0
Zuschlag 8/16	414,0
Fließmittel (ACE 30)	-
Eigenschaften	
Druckfestigkeitsklasse	C25/30
Sieblinie	B16
w/z-Wert	0,63
Konsistenzklasse	F5
Verdichtungsmaß	1,03
Erstarrungsende	6,00h

Tab. F 4: Sensitivitätsanalyse (Kap. 5.2)

Ausgangsstoff	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
	Menge [kg/m³]			
Wasser	230,0	187,5	187,5	187,5
Zement CEM 42,5 N	354,0	450,0	450,0	288,0
Zuschlag 0/2	718,0	525,0	525,0	566,0
Zuschlag 2/8	558,0	580,0	580,0	627,0
Zuschlag 8/16	390,0	530,0	530,0	572,0
Fließmittel (ACE 30)	-	-	1,373	-
Eigenschaften				
Druckfestigkeitsklasse	C25/30	C50/60	C50/60	C20/25
Sieblinie	B16	A/B16	A/B16	A/B16
w/z-Wert	0,65	0,42	0,42	0,65
Konsistenzklasse	F4	F1	F4	F4
Verdichtungsmaß	-	-	-	-
Erstarrungsende	-	-	-	-

Tab. F 5: Quantifizierung der Zementleimaufnahme (Kap. 5.3)

Ausgangsstoff	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
	Menge [kg/m³]			
Wasser	184,5	184,5	184,5	184,5
Zement CEM 42,5 N	450,0	376,5	323,7	283,8
Zuschlag 0/2	525,0	566,7	581,2	591,8
Zuschlag 2/8	580,0	626,1	642,1	653,8
Zuschlag 8/16	530,0	572,1	586,7	597,4
Fließmittel (ACE 30)	1,373	0,915	0,455	-
Eigenschaften				
Druckfestigkeitsklasse	C50/60	C40/50	C30/37	C20/25
Sieblinie	A/B16	A/B16	A/B16	A/B16
w/z-Wert	0,41	0,49	0,57	0,65
Konsistenzklasse	F4	F4	F4	F4
Verdichtungsmaß	-	-	-	-
Erstarrungsende	-	-	-	-

Tab. F 6: Untersuchungen zur Schwingungsübertragung in Frischbeton (Kap. 6.4)

Ausgangsstoff	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Beton A aus Garbotz u. Ersoy 1964
	Menge [kg/m³]			
Wasser	177,0	194,7	230,1	135,0
Zement CEM 42,5 N	354,0	354,0	354,0	300,0
Zuschlag 0/2	774,1	751,7	718,0	479,8
Zuschlag 2/8	601,6	584,2	558,0	556,2
Zuschlag 8/16	420,5	408,3	390,0	428,9
Zuschlag 16/32	-	-	-	493,5
Fließmittel (ACE 30)	-	-	-	-
Eigenschaften				
Druckfestigkeitsklasse	C40/50	C30/37	C20/25	C40/50
Sieblinie	B16	B16	B16	A/B32
w/z-Wert	0,50	0,55	0,65	0,45
Konsistenzklasse	F2	F3	F4	F2
Verdichtungsmaß	-	-	-	-
Erstarrungsende	-	-	-	-

Tab. F 7: Validierung des Berechnungsmodells (Kap. 7.4)

Ausgangsstoff	Mischung 1	Mischung 2
	Menge [kg/m³]	
Wasser	186,6	203,3
Zement CEM 42,5 N	450,0	323,0
Zuschlag 0/2	713,3	739,8
Zuschlag 2/8	577,5	598,9
Zuschlag 8/16	407,6	422,8
Zuschlag 16/32	-	-
Fließmittel (ACE 30)	-	-
Eigenschaften		
Druckfestigkeitsklasse	C50/60	C20/25
Sieblinie	B16	B16
w/z-Wert	0,42	0,63
Konsistenzklasse	F2	F4
Verdichtungsmaß	1,15	1,02
Erstarrungsende	4,50h	6,00h

Anhang G

Wasserdampfdiffusionstechnische Berechnungen

Tab. G 1: Wasserdampfdiffusionstechnische Berechnung einer Elementwand mit integriertem Dämmstoff

Bauteilschicht	d	λ	R	θ	p_s	rT/D	μ		s_d	Z
	m	W/(mK)	m ² K/W	°C	Pa	mhPa/g	min	max	m	m ² hPa/g

Wärmeübergang innen				Luft innen	20,0	2332,6					vernachl.
				Oberfl. Innen	19,1	2204,0					
Stahlbeton (1% Stahl)	0,16	2,30	0,07	1	18,6	2137,8	1500	80	130	12,8	19200
EPS	0,16	0,04	4,00	2	-9,5	271,5	1500	20	100	16,0	24000
Stahlbeton (1% Stahl)	0,07	2,30	0,03	Oberfl. Außen	-9,7	266,4	1500	80	130	9,1	13650
Wärmeübergang außen				Luft außen	-10,0	259,9					vernachl.

Wärmedurchlasswiderstand R 4,10 (m²K)/W
 Wärmedurchgangswiderstand R_T 4,27 (m²K)/W
 Wärmedurchgangskoeffizient U 0,234 W/(m²K)
 Wärmestromdichte q 7,03 W/m²

Z_i 43200
 Z_z 0
 Z_e 13650

 ΣZ **56850**

Tauperiode				
Randbedingungen				
θ_{Li}	20,0	°C	p_{si}	2332,6 Pa
ϕ_i	50	%	p_i	1166,3 Pa
θ_{Le}	-10,0	°C	p_{se}	259,9 Pa
ϕ_e	80	%	p_e	207,9 Pa

Verdunstungsperiode				
Randbedingungen				
θ_{Li}	12,0	°C	p_{si}	1400,0 Pa
ϕ_i	70	%	p_i	980,0 Pa
θ_{Le}	12,0	°C	p_{se}	1400,0 Pa
ϕ_e	70	%	p_e	980,0 Pa

T_T	1440	h	(Dauer der Periode)
g_i	0,021	g/(m ² h)	
g_e	0,005	g/(m ² h)	


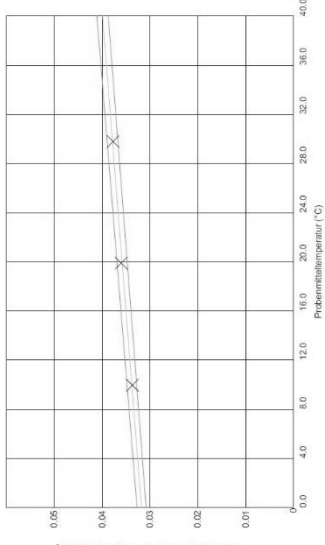
T_V	2160	h	(Dauer der Periode)
g_i	0,010	g/(m ² h)	
g_e	0,031	g/(m ² h)	

$m_{w,T}$ **23,1 g/m²**
 (Tauwassermenge pro Jahr)

$m_{w,V}$ **87,5 g/m²**
 (Verdunstungsmenge pro Jahr)

Verdunstete Wassermenge pro Jahr: 64,3 g/m²

Protokolle der Wärmeleitfähigkeitsprüfungen

 Technische Universität Kaiserslautern Fakultät für Bauingenieurwesen und Fortschrittliche Bautechnik Professur für Bauphysik Paul Ehrlich-Str. 11, Gebäude 14 67661 Kaiserslautern		BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT				
Prüfbericht Nr.:						
Probenstärke : 100,58 mm Probe : M1 - mit Zement (0,45 Vol.-%) Material : EPS Abmessung Probe S-123 : (300,0 x 300,0 x 100,58) mm Prüfdatum : 27.05.2016 Prüfung mit : TLP 500 - GX1, Einplatten-Messung Bemerkungen : Lambda V.2012, Einplatten Programm-Version :						
Messung Nr.	Heizleistung (W)	Temperatur der kalten Ober- bzw. unteren benetzten Oberfläche (°C)	Temperatur der warmen Ober- bzw. unteren benetzten Oberfläche (°C)	Temperaturdifferenz an der Probe (K)	Mitteltemperatur der Probe (°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))
1	0,266	5,0	14,9	9,9	10,0	0,03567
2	0,314	15,0	24,8	9,7	19,9	0,03601
3	0,327	25,0	34,7	9,7	29,8	0,03771
W/(m·K)						
						
Lambda (10°C) = (0,0338 +/-0,0010) W/(m·K) Lambda = 0,03175 + 0,000204 * MT W/(m·K) Wert +/- Erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor 2)						
Kaiserslautern, 27.05.2016						
Name						
Bereich Wärmeleitfähigkeit						


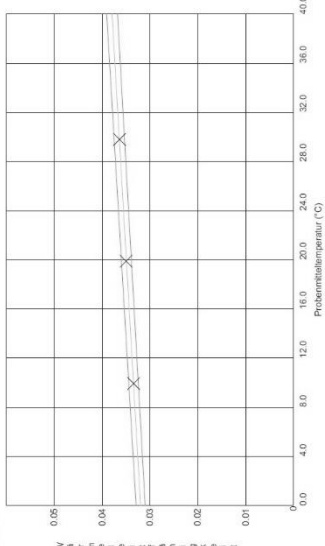
 Technische Universität Kaiserslautern Fakultät für Bauingenieurwesen und Fortschrittliche Bautechnik Professur für Bauphysik Paul Ehrlich-Str. 11, Gebäude 14 67661 Kaiserslautern		BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT				
Prüfbericht Nr.:						
Probenstärke : 100,53 mm Probe : M1 - ohne Zement Material : EPS Abmessung Probe S-123 : (300,0 x 300,0 x 100,53) mm Prüfdatum : 19.05.2016 Prüfung mit : TLP 500 - GX1, Einplatten-Messung Bemerkungen : Lambda V.2012, Einplatten Programm-Version :						
Messung Nr.	Heizleistung (W)	Temperatur der kalten Ober- bzw. unteren benetzten Oberfläche (°C)	Temperatur der warmen Ober- bzw. unteren benetzten Oberfläche (°C)	Temperaturdifferenz an der Probe (K)	Mitteltemperatur der Probe (°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))
1	0,294	5,0	14,8	9,8	9,9	0,03339
2	0,306	15,0	24,8	9,8	19,9	0,03497
3	0,317	24,9	34,7	9,7	29,8	0,03636
W/(m·K)						
						
Lambda (10°C) = (0,0334 +/-0,0010) W/(m·K) Lambda = 0,03194 + 0,000149 * MT W/(m·K) Wert +/- Erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor 2)						
Kaiserslautern, 19.05.2016						
Name						
Bereich Wärmeleitfähigkeit						

Abb. G 1: Protokolle der Wärmeleitfähigkeitsprüfungen von Dämmstoffprobe M1

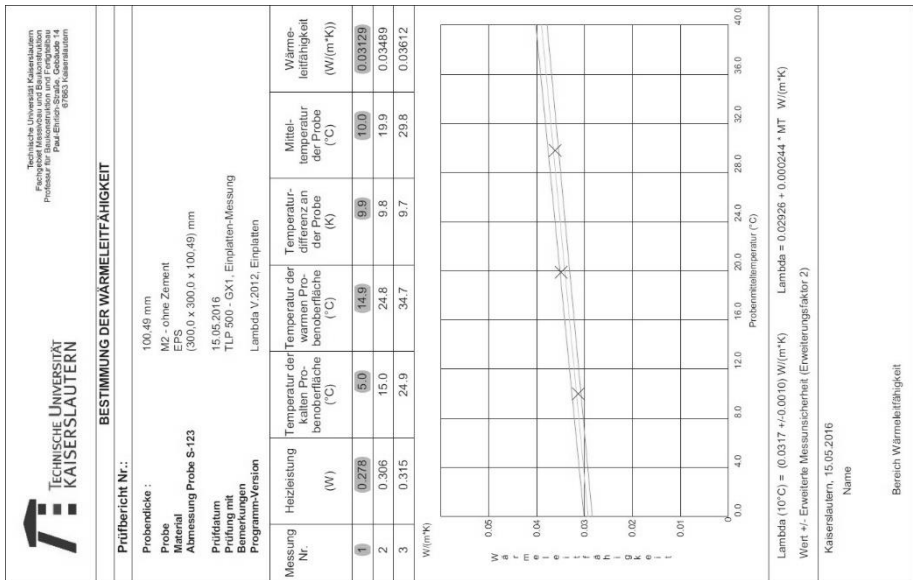
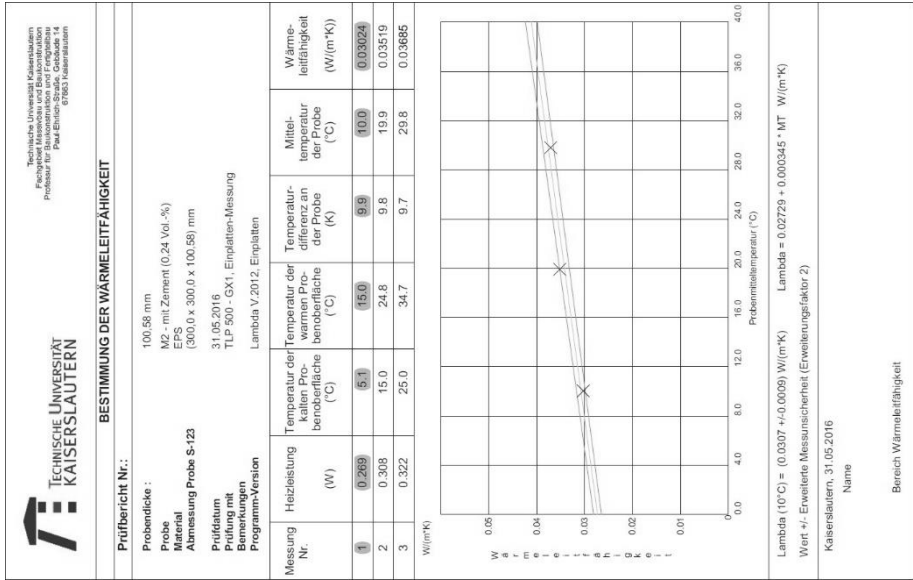


Abb. G 2: Protokolle der Wärmeleitfähigkeitsprüfungen von Dämmstoffprobe M2

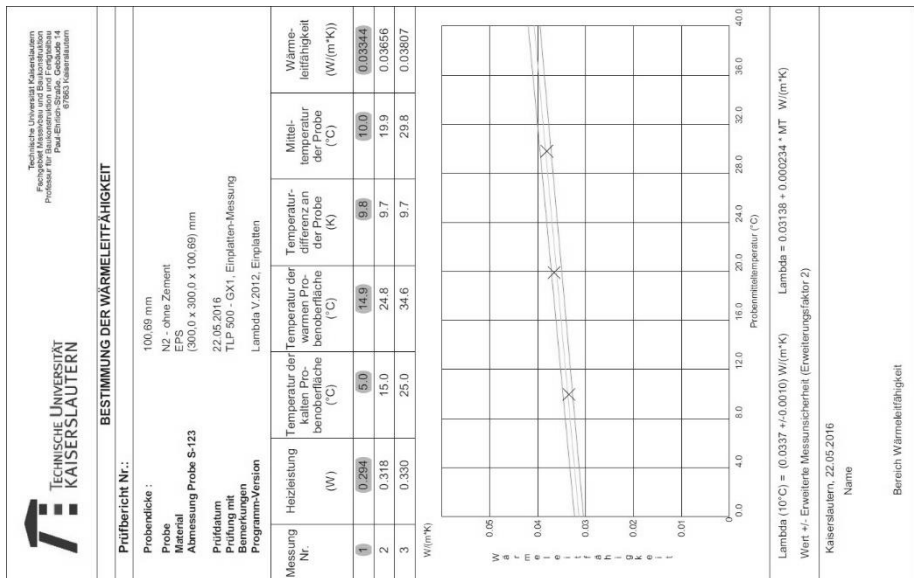
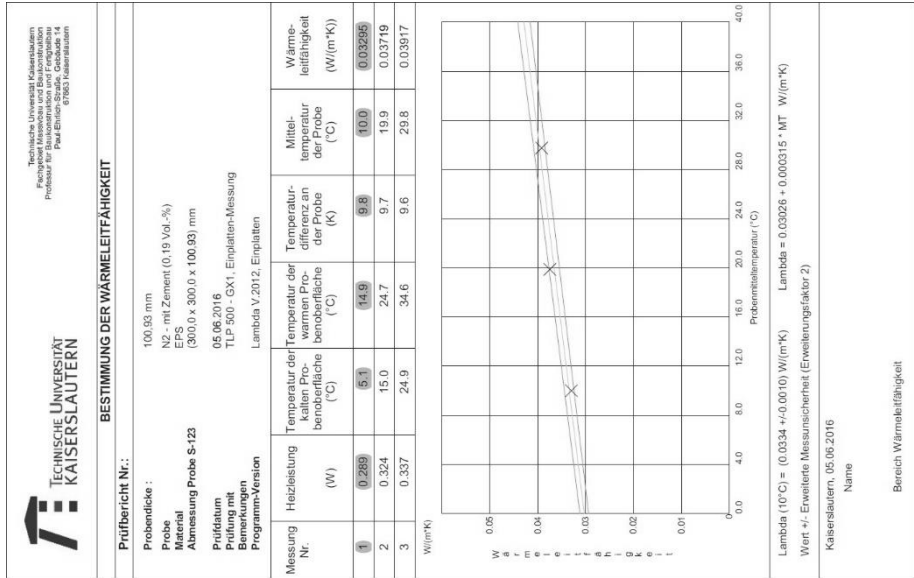

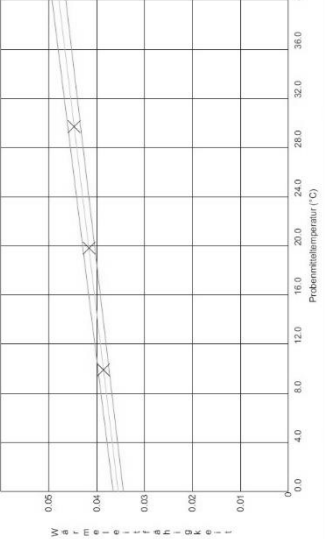


Abb. G 4: Protokolle der Wärmeleitfähigkeitsprüfungen von Dämmstoffprobe N2

 Technische Universität Kaiserslautern Fachbereich Bauwesen und Umweltschutz Professur für Bauphysik und Energieeffizienz Paul Ehrlich-Str. 11, Gebäude 14 67663 Kaiserslautern		BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT					
Prüfbericht Nr.:							
Probenbreite :		99,93 mm					
Probe		O1 - mit Zement (0,65 Vol.-%)					
Material		EPS					
Abmessung Probe S-123		300,0 x 300,0 x 99,93 mm					
Prüfdatum		09.06.2016					
Prüfung mit		TLP 500 - GX1, Einplatten-Messung					
Bemerkungen		Lambda V.2012, Einplatten					
Programm-Version							
Messung Nr.	Heizleistung (W)	Temperatur der kalten Oberfläche (°C)	Temperatur der warmen Oberfläche (°C)	Temperaturdifferenz an der Probe (K)	Mitteltemperatur der Probe (°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))	
1	0,336	5,1	14,7	9,7	9,9	0,03659	
2	0,359	15,0	24,6	9,6	19,8	0,04251	
3	0,382	25,0	34,4	9,5	29,7	0,04495	
W/(m·K)							
							
Lambda (10°C) = (0,0396 ± 0,0012) W/(m·K) Lambda = 0,03550 + 0,000309 · MT W/(m·K) Wort +/- Erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor 2)							
Kaiserslautern, 09.06.2016 Name							
Bereich Wärmeleitfähigkeit							


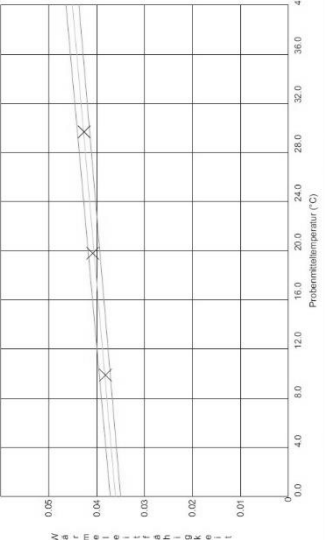

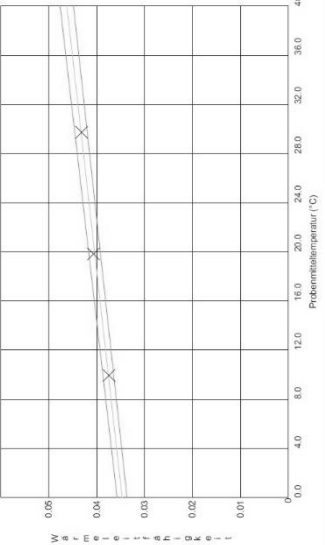
 Technische Universität Kaiserslautern Fachbereich Bauwesen und Umweltschutz Professur für Bauphysik und Energieeffizienz Paul Ehrlich-Str. 11, Gebäude 14 67663 Kaiserslautern		BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT					
Prüfbericht Nr.:							
Probenbreite :		100,10 mm					
Probe		O1 - ohne Zement					
Material		EPS					
Abmessung Probe S-123		300,0 x 300,0 x 100,10 mm					
Prüfdatum		08.05.2016					
Prüfung mit		TLP 500 - GX1, Einplatten-Messung					
Bemerkungen		Lambda V.2012, Einplatten					
Programm-Version							
Messung Nr.	Heizleistung (W)	Temperatur der kalten Oberfläche (°C)	Temperatur der warmen Oberfläche (°C)	Temperaturdifferenz an der Probe (K)	Mitteltemperatur der Probe (°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))	
1	0,332	5,0	14,7	9,7	9,9	0,03817	
2	0,352	15,0	24,6	9,6	19,8	0,04081	
3	0,366	24,9	34,5	9,5	29,7	0,04281	
W/(m·K)							
							
Lambda (10°C) = (0,0383 ± 0,0012) W/(m·K) Lambda = 0,03609 + 0,000224 · MT W/(m·K) Wort +/- Erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor 2)							
Kaiserslautern, 08.05.2016 Name							
Bereich Wärmeleitfähigkeit							

Abb. G 5: Protokolle der Wärmeleitfähigkeitsprüfungen von Dämmstoffprobe O1

 Technische Universität Kaiserslautern Institut für Bauphysik und Bautechnik Professur für Bauphysik und Bautechnik Paul Ehrlich-Str. 11, Gebäude 14 67663 Kaiserslautern					
BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT					
Prüfbericht Nr.: Probendicke : 99,85 mm Probe : O2 - mit Zement (0,33 Vol.-%) Material : EPS Abmessung Probe S-123 : (300,0 x 300,0 x 99,85) mm Prüfdatum : 07.06.2016 Prüfungsmit : TLP 500 - GX1, Einplatten-Messung Bemerkungen : Programm-Version : Lambda V.2012, Einplatten					
Messung Nr.	Heizleistung (W)	Temperatur der kalten Ober- bzw. warmen Unterseite (°C)	Temperaturdifferenz an der Probe (K)	Mitteltemperatur der Probe (°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))
1	0,327	5,1	14,8	9,7	0,03749
2	0,352	15,0	24,6	9,6	0,04065
3	0,371	25,0	34,5	9,5	0,04314
W/(m·K)					
					
Lambda (10°C) = (0,0376 +/-0,0011) W/(m·K) Lambda = 0,03469 + 0,000288 * MT W/(m·K) Wert +/- Erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor 2)					
Kaiserslautern, 07.06.2016 Name Bereich Wärmeleitfähigkeit					


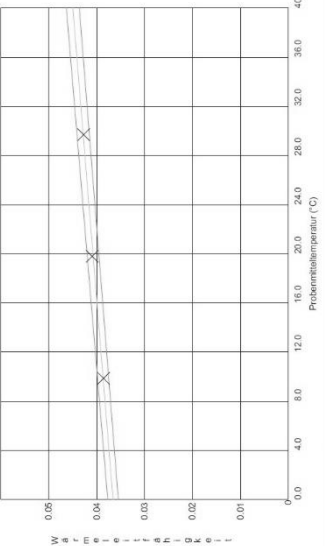
 Technische Universität Kaiserslautern Institut für Bauphysik und Bautechnik Professur für Bauphysik und Bautechnik Paul Ehrlich-Str. 11, Gebäude 14 67663 Kaiserslautern					
BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT					
Prüfbericht Nr.: Probendicke : 100,08 mm Probe : O2 - ohne Zement Material : EPS Abmessung Probe S-123 : (300,0 x 300,0 x 100,08) mm Prüfdatum : 10.05.2016 Prüfungsmit : TLP 500 - GX1, Einplatten-Messung Bemerkungen : Programm-Version : Lambda V.2012, Einplatten					
Messung Nr.	Heizleistung (W)	Temperatur der kalten Ober- bzw. warmen Unterseite (°C)	Temperaturdifferenz an der Probe (K)	Mitteltemperatur der Probe (°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))
1	0,335	5,0	14,7	9,7	0,03656
2	0,353	15,0	24,6	9,6	0,04094
3	0,367	24,9	34,5	9,5	0,04271
W/(m·K)					
					
Lambda (10°C) = (0,0387 +/-0,0012) W/(m·K) Lambda = 0,03656 + 0,000210 * MT W/(m·K) Wert +/- Erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor 2)					
Kaiserslautern, 10.05.2016 Name Bereich Wärmeleitfähigkeit					

Abb. G 6: Protokolle der Wärmeleitfähigkeitsprüfungen von Dämmstoffprobe O2

Anhang H

Untersuchungen zur Schwingungsübertragung

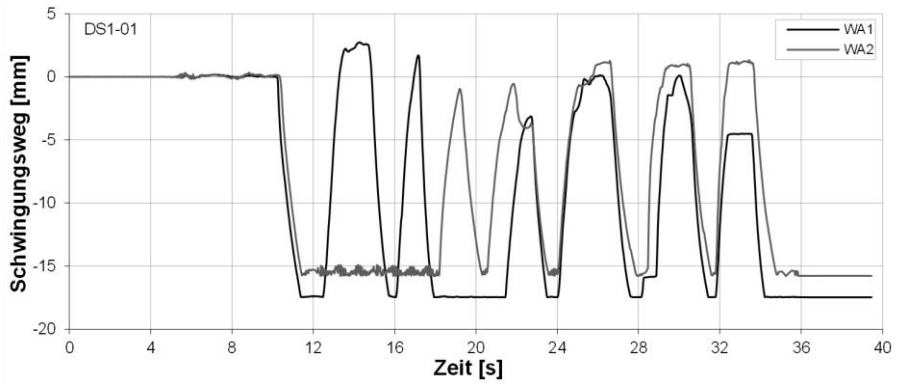


Abb. H 1: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS1-01

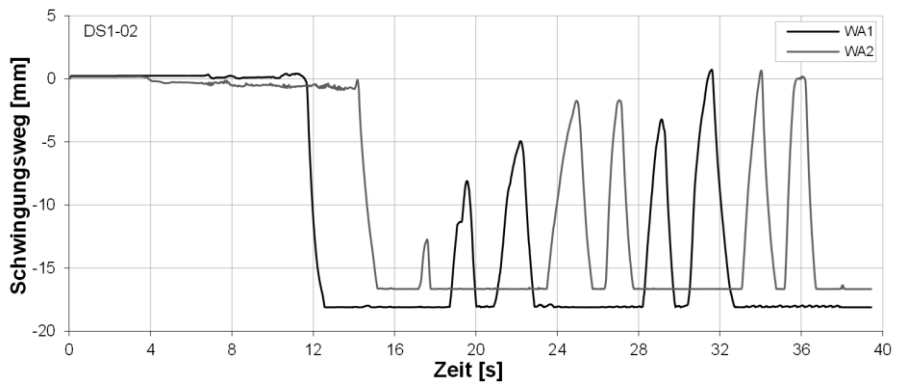


Abb. H 2: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS1-02

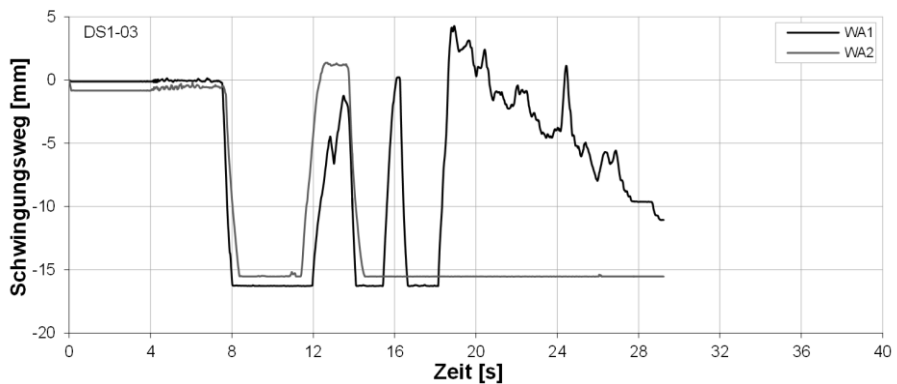


Abb. H 3: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS1-03

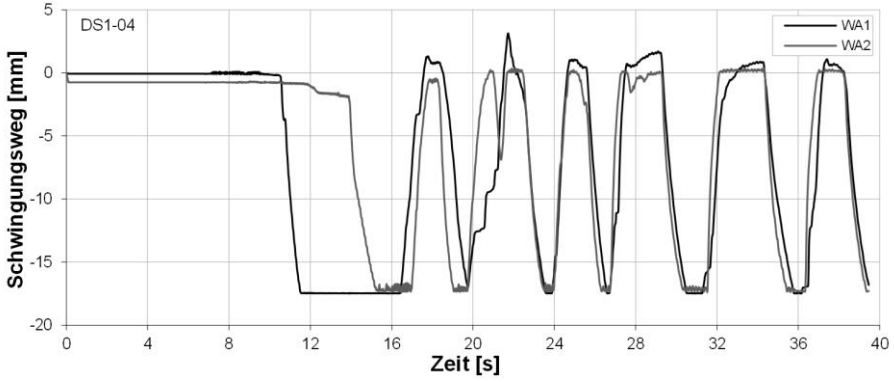


Abb. H 4: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS1-04

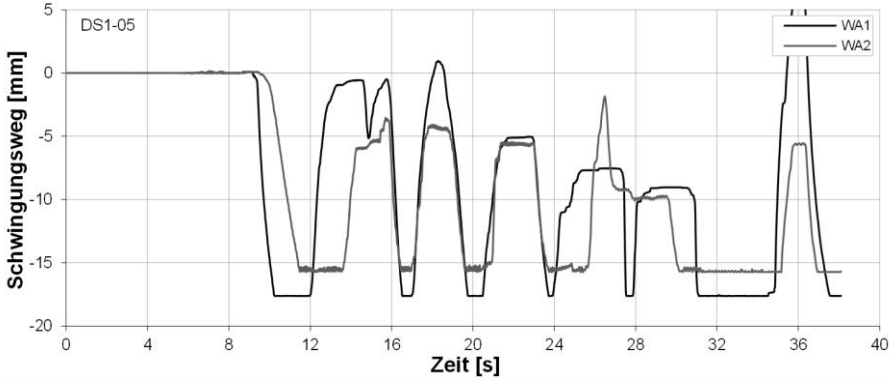


Abb. H 5: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS1-05

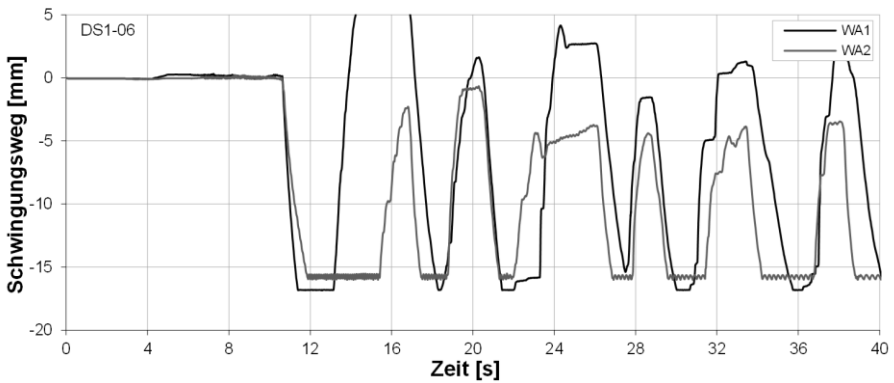


Abb. H 6: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS1-06

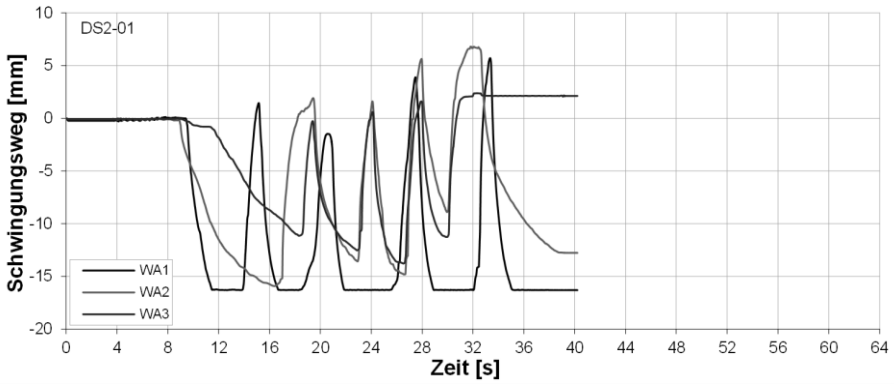


Abb. H 7: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-01

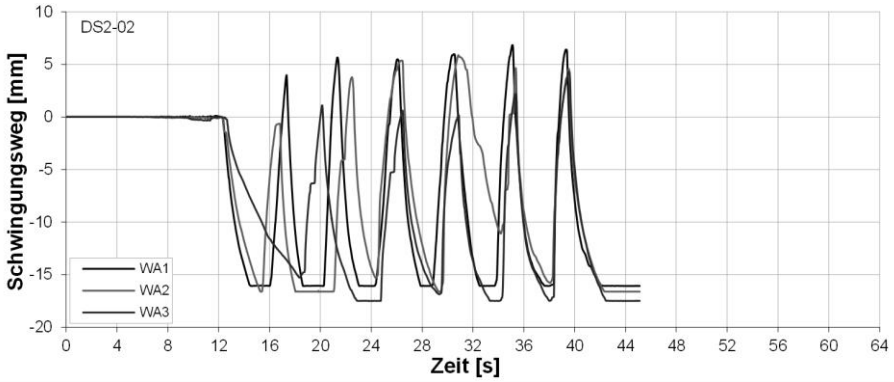


Abb. H 8: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-02

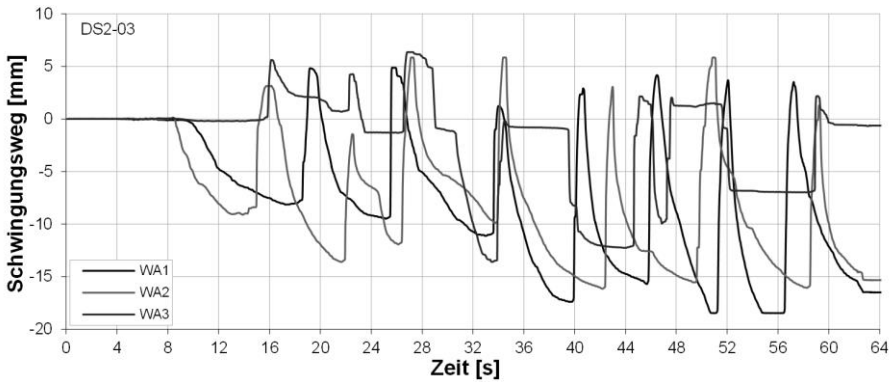


Abb. H 9: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-03

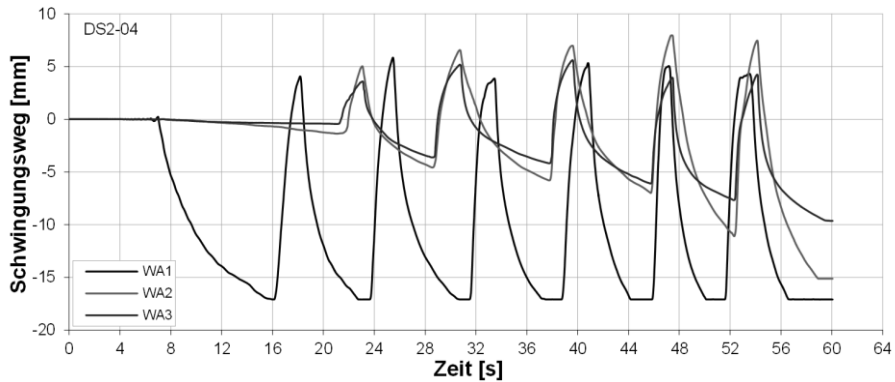


Abb. H 10: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-04

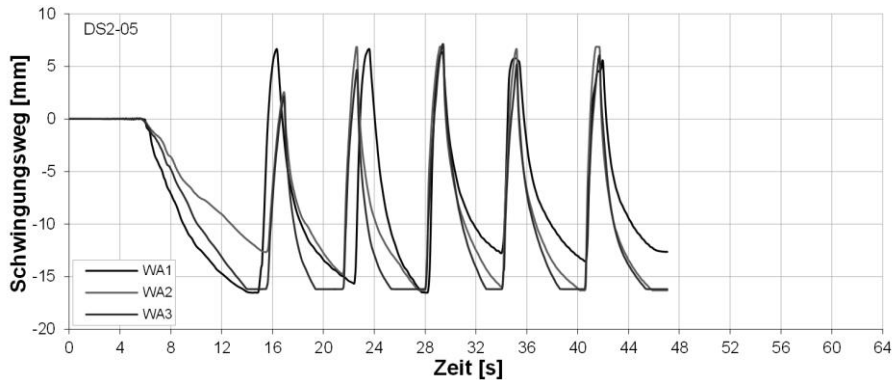


Abb. H 11: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-05

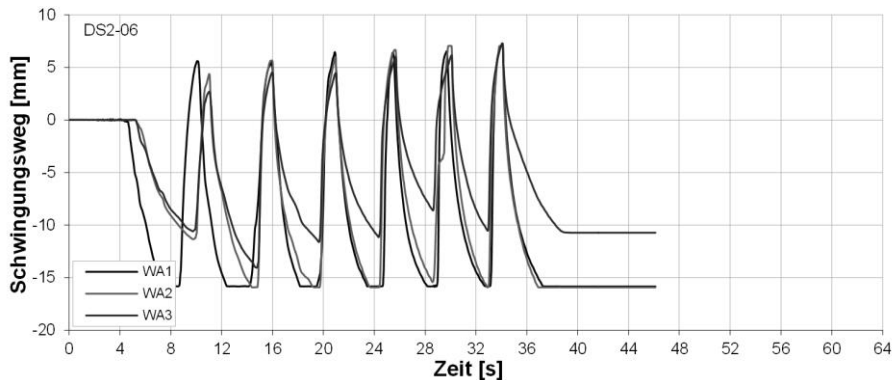


Abb. H 12: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-06

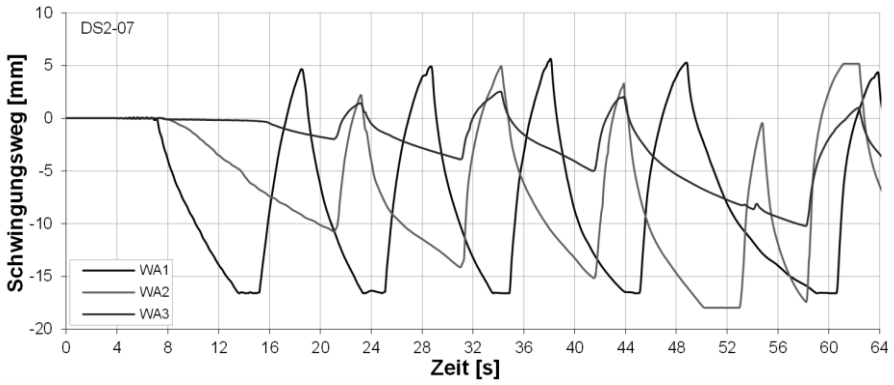


Abb. H 13: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-07

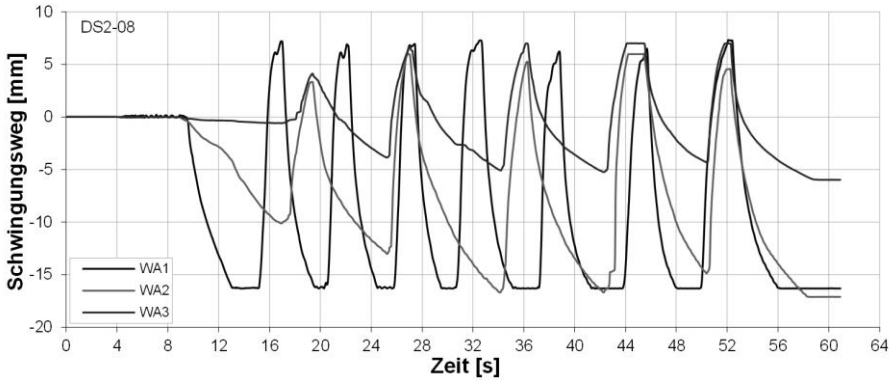


Abb. H 14: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-08

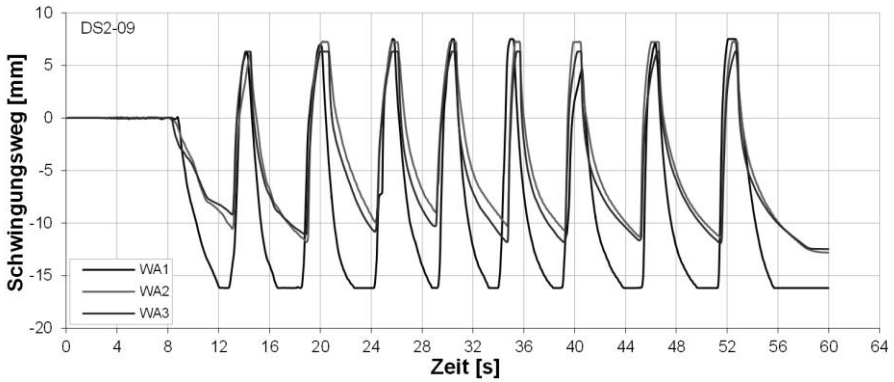


Abb. H 15: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-09

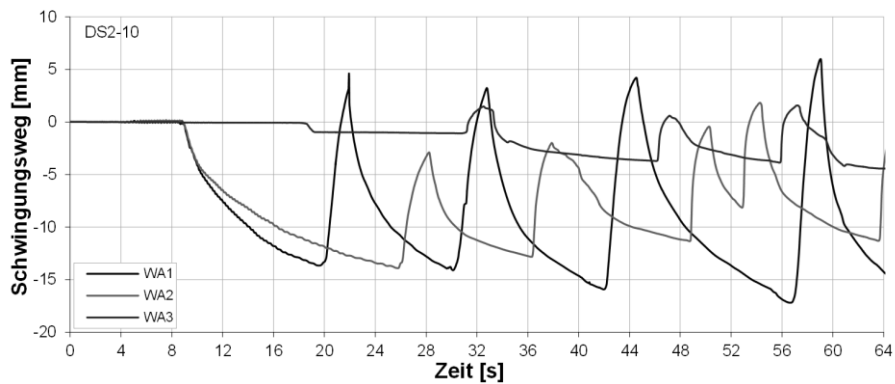


Abb. H 16: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-10

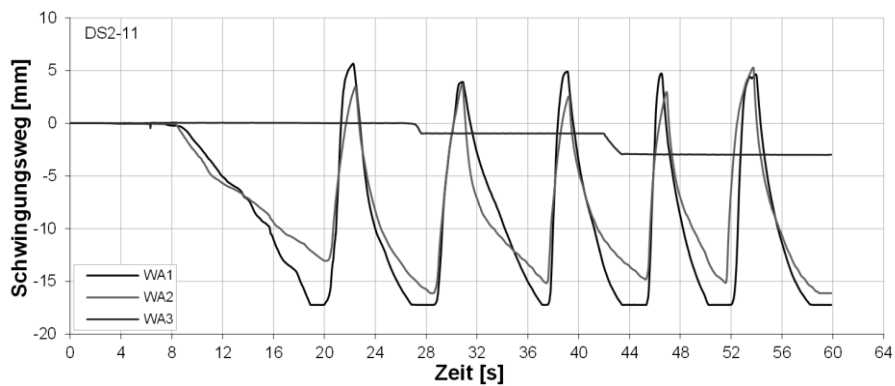


Abb. H 17: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-11

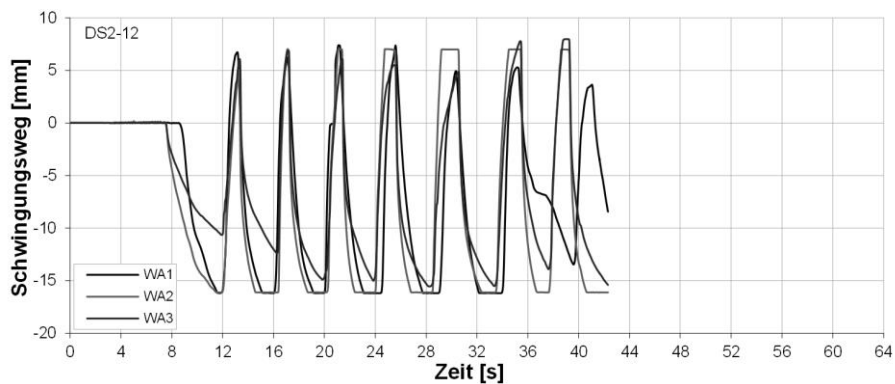


Abb. H 18: Schwingungsweg-Zeit-Diagramm von Versuch DS2-12

Tab. H 1: Datenzusammenstellung der Ergebnisse aus Garbotz u. Ersoy 1964

Frequenz f [Hz]	Zentrifugalkraft F [N]	s oder Ω	Abstand Rüttler zu Messpunkt [mm]				Mittel Ω
			0	100	300	500	
160	376,75	s [mm]	0,060	0,020	0,004	-	0,020
		Ω [1/mm]	-	0,022	0,018	-	
220	712,29	s [mm]	0,140	0,065	0,007	-	0,018
		Ω [1/mm]	-	0,015	0,020	-	
220	1930,68	s [mm]	0,210	0,112	0,058	0,035	0,009
		Ω [1/mm]	-	0,013	0,009	0,007	
260	2696,58	s [mm]	0,300	0,160	0,090	0,050	0,009
		Ω [1/mm]	-	0,013	0,008	0,007	
160	1685,46	s [mm]	0,125	0,080	0,045	0,030	0,007
		Ω [1/mm]	-	0,009	0,007	0,006	
210	2903,46	s [mm]	0,240	0,145	0,083	0,055	0,007
		Ω [1/mm]	-	0,010	0,004	0,006	
160	3569,20	s [mm]	0,195	0,140	0,100	0,065	0,005
		Ω [1/mm]	-	0,007	0,004	0,004	
200	5576,88	s [mm]	0,310	0,230	0,165	0,110	0,005
		Ω [1/mm]	-	0,006	0,004	0,004	
190	6990,46	s [mm]	0,330	0,260	0,200	0,130	0,004
		Ω [1/mm]	-	0,005	0,003	0,004	
145	6188,40	s [mm]	0,270	0,200	0,130	0,100	0,005
		Ω [1/mm]	-	0,006	0,005	0,004	

Tab. H 2: Einzel- und Mittelwerte der gemessenen Schwingungsamplituden (Versuchsreihe DS2)

Versuch		Schwingungsamplitude am abfallenden Ast [mm]								Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	7	8	
DS2-01	WA 1	0,117*	0,065	0,063	(0,039)	(0,021)				0,064
	WA 2	0,046	(0,019)	(0,019)	(0,034)	(0,026)				0,046
	WA 3	(0,019)	(0,014)	0,037	(0,022)	-				0,037
DS2-02	WA 1	0,056	(0,039)	0,048	(0,033)	(0,041)	(0,035)	(0,035)	(0,029)	0,052
	WA 2	0,035	0,041	0,036	(0,020)	(0,022)	(0,025)	-	-	0,038
	WA 3	(0,008)	0,035	0,026	-	(0,011)	(0,022)	-	-	0,030
DS2-03	WA 1	(0,017)	(0,018)	(0,016)	(0,017)	(0,013)	(0,022)	0,060	0,061	0,061
	WA 2	(0,021)	(0,025)	(0,024)	(0,018)	(0,022)	(0,027)	(0,026)	0,036	0,036
	WA 3	(0,013)	(0,012)	0,025	0,026	-	(0,012)	(0,010)	-	0,026
DS2-04	WA 1	0,040	0,047	0,045	0,052	0,045	0,053	0,056		0,050
	WA 2	(0,008)	(0,016)	(0,017)	(0,016)	(0,017)	0,023	-		0,023
	WA 3	(0,005)	0,011	0,013	0,013	0,009	0,009	-		0,011
DS2-05	WA 1	0,048	0,042	0,043	(0,030)	(0,027)	(0,028)			0,044
	WA 2	(0,008)	(0,010)	0,016	0,018	0,014	0,019			0,017
	WA 3	(0,006)	0,009	0,013	0,011	0,014	0,012			0,012
DS2-06	WA 1	0,056	(0,037)	(0,043)	(0,032)	(0,025)	(0,028)	(0,026)		0,056
	WA 2	0,036	0,030	0,037	0,038	0,037	0,037	0,035		0,036
	WA 3	0,017	0,015	(0,012)	(0,012)	(0,012)	0,019	0,018		0,017
DS2-07	WA 1	(0,05)	0,072	(0,057)	0,065	0,068	0,063	-		0,067
	WA 2	0,038	0,041	0,045	0,045	0,044	0,038	-		0,042
	WA 3					-				-
DS2-08	WA 1	0,087*	0,076	0,072	0,067	0,066	0,051	0,054	0,042	0,061
	WA 2	(0,024)	0,035	0,039	0,034	(0,024)	(0,030)	-	-	0,036
	WA 3					-				-
DS2-09	WA 1	0,056	0,055	(0,030)	(0,036)	(0,029)	(0,032)	(0,028)	(0,028)	0,056
	WA 2	0,048	(0,020)	0,033	0,038	(0,022)	0,028	0,028	(0,025)	0,035
	WA 3	0,017	(0,011)	(0,010)	(0,006)	(0,006)	(0,006)	(0,006)	(0,006)	0,017
DS2-10	WA 1	0,051	0,052	(0,032)	(0,043)	(0,037)	(0,040)			0,052
	WA 2	0,040	0,037	0,036	0,032	0,030	0,035			0,035
	WA 3	-	0,015	(0,011)	-	-	-			0,015
DS2-11	WA 1	0,049	0,036	0,048	0,039	0,056	0,054			0,047
	WA 2	0,033	(0,015)	(0,015)	(0,021)	(0,016)	(0,015)			0,033
	WA 3	0,014	(0,009)	-	-	-	-			0,014
DS2-12	WA 1	0,048	0,052	(0,031)	(0,040)	0,057				0,052
	WA 2	0,039	0,039	0,033	0,037	0,038				0,037
	WA 3	0,017	0,017	0,018	0,015	(0,010)				0,017

() Schwingungsmechanismus durch Zementleim blockiert (keine Verwendung der Messwerte)

* dynamische Anregung der Schalung (keine Verwendung der Messwerte)

Anhang I

Untersuchungen zum Ausbreitmaß des Frischbetons

Tab. I 1: Ergebnisse von *Bonzel u. Dahms 1978* sowie Inter- und Extrapolation der Werte

Stieb- linie	Konsistenzklasse und Ausbreitmaß [cm]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	F1						F2						F3						F4						F5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
A63	120	124	127	131	134	138	141	145	147	149	151	154	156	158	160	162	164	166	169	171	173	175	177	179	181	184	186	188	190	192	194	196																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
A32	130	134	137	141	144	148	151	155	158	161	164	166	169	172	175	178	181	184	186	189	192	195	198	201	204	206	209	212	215	218	221	224																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
A16	140	144	149	153	157	161	166	170	173	176	179	181	184	187	190	193	196	199	201	204	207	210	213	216	219	221	224	227	230	233	236	239	241	244	247	250	253	256	259																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
A8	155	160	165	170	175	180	185	190	193	196	199	201	204	207	210	213	216	219	221	224	227	230	233	236	239	241	244	247	250	253	256	259	262	265	268	271	274																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
B63	135	139	142	146	149	153	156	160	163	166	169	171	174	177	180	183	186	189	191	194	197	200	203	206	209	211	214	217	220	223	226	229	231	234	237	240	243	246	249																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
B32	140	145	150	155	160	165	170	175	178	181	184	186	189	192	195	198	201	204	206	209	212	215	218	221	224	226	229	232	235	238	241	244	247	250	253	256	259	262	265	268	271	274																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
B16	150	155	160	165	170	175	180	185	188	191	194	196	199	202	205	208	211	214	216	219	222	225	228	231	234	236	239	242	245	248	251	254	256	259	262	265	268	271	274																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
B8	175	179	184	188	192	196	201	205	208	211	214	216	219	222	225	228	231	234	236	239	242	245	248	251	254	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283	286	289	292	295	298	301	304																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
C63	145	150	155	160	165	170	175	180	183	186	189	191	194	197	200	203	206	209	211	214	217	220	223	226	229	231	234	237	240	243	246	249	252	255	258	261	264	266	269	272	275	278	281	284																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
C32	165	170	175	180	185	190	195	200	203	206	209	211	214	217	220	223	226	229	231	234	237	240	243	246	249	251	254	257	260	263	266	269	272	275	278	281	284	287	290	293	296	299	302	305	308	311	314																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
C16	185	189	194	198	202	206	211	215	218	221	224	226	229	232	235	238	241	244	246	249	252	255	258	261	264	266	269	272	275	278	281	284	287	290	293	296	299	302	305	308	311	314	317	320	323	326	329	332	335	338	341	344	347	350	353	356	359	362	365	368	371	374	377	380	383	386	389	392	395	398	401	404	407	410	413	416	419	422	425	428	431	434	437	440	443	446	449	452	455	458	461	464	467	470	473	476	479	482	485	488	491	494	497	500	503	506	509	512	515	518	521	524	527	530	533	536	539	542	545	548	551	554	557	560	563	566	569	572	575	578	581	584	587	590	593	596	599	602	605	608	611	614	617	620	623	626	629	632	635	638	641	644	647	650	653	656	659	662	665	668	671	674	677	680	683	686	689	692	695	698	701	704	707	710	713	716	719	722	725	728	731	734	737	740	743	746	749	752	755	758	761	764	767	770	773	776	779	782	785	788	791	794	797	800	803	806	809	812	815	818	821	824	827	830	833	836	839	842	845	848	851	854	857	860	863	866	869	872	875	878	881	884	887	890	893	896	899	902	905	908	911	914	917	920	923	926	929	932	935	938	941	944	947	950	953	956	959	962	965	968	971	974	977	980	983	986	989	992	995	998	1001	1004	1007	1010	1013	1016	1019	1022	1025	1028	1031	1034	1037	1040	1043	1046	1049	1052	1055	1058	1061	1064	1067	1070	1073	1076	1079	1082	1085	1088	1091	1094	1097	1100	1103	1106	1109	1112	1115	1118	1121	1124	1127	1130	1133	1136	1139	1142	1145	1148	1151	1154	1157	1160	1163	1166	1169	1172	1175	1178	1181	1184	1187	1190	1193	1196	1199	1202	1205	1208	1211	1214	1217	1220	1223	1226	1229	1232	1235	1238	1241	1244	1247	1250	1253	1256	1259	1262	1265	1268	1271	1274	1277	1280	1283	1286	1289	1292	1295	1298	1301	1304	1307	1310	1313	1316	1319	1322	1325	1328	1331	1334	1337	1340	1343	1346	1349	1352	1355	1358	1361	1364	1367	1370	1373	1376	1379	1382	1385	1388	1391	1394	1397	1400	1403	1406	1409	1412	1415	1418	1421	1424	1427	1430	1433	1436	1439	1442	1445	1448	1451	1454	1457	1460	1463	1466	1469	1472	1475	1478	1481	1484	1487	1490	1493	1496	1499	1502	1505	1508	1511	1514	1517	1520	1523	1526	1529	1532	1535	1538	1541	1544	1547	1550	1553	1556	1559	1562	1565	1568	1571	1574	1577	1580	1583	1586	1589	1592	1595	1598	1601	1604	1607	1610	1613	1616	1619	1622	1625	1628	1631	1634	1637	1640	1643	1646	1649	1652	1655	1658	1661	1664	1667	1670	1673	1676	1679	1682	1685	1688	1691	1694	1697	1700	1703	1706	1709	1712	1715	1718	1721	1724	1727	1730	1733	1736	1739	1742	1745	1748	1751	1754	1757	1760	1763	1766	1769	1772	1775	1778	1781	1784	1787	1790	1793	1796	1799	1802	1805	1808	1811	1814	1817	1820	1823	1826	1829	1832	1835	1838	1841	1844	1847	1850	1853	1856	1859	1862	1865	1868	1871	1874	1877	1880	1883	1886	1889	1892	1895	1898	1901	1904	1907	1910	1913	1916	1919	1922	1925	1928	1931	1934	1937	1940	1943	1946	1949	1952	1955	1958	1961	1964	1967	1970	1973	1976	1979	1982	1985	1988	1991	1994	1997	2000	2003	2006	2009	2012	2015	2018	2021	2024	2027	2030	2033	2036	2039	2042	2045	2048	2051	2054	2057	2060	2063	2066	2069	2072	2075	2078	2081	2084	2087	2090	2093	2096	2099	2102	2105	2108	2111	2114	2117	2120	2123	2126	2129	2132	2135	2138	2141	2144	2147	2150	2153	2156	2159	2162	2165	2168	2171	2174	2177	2180	2183	2186	2189	2192	2195	2198	2201	2204	2207	2210	2213	2216	2219	2222	2225	2228	2231	2234	2237	2240	2243	2246	2249	2252	2255	2258	2261	2264	2267	2270	2273	2276	2279	2282	2285	2288	2291	2294	2297	2300	2303	2306	2309	2312	2315	2318	2321	2324	2327	2330	2333	2336	2339	2342	2345	2348	2351	2354	2357	2360	2363	2366	2369	2372	2375	2378	2381	2384	2387	2390	2393	2396	2399	2402	2405	2408	2411	2414	2417	2420	2423	2426	2429	2432	2435	2438	2441	2444	2447	2450	2453	2456	2459	2462	2465	2468	2471	2474	2477	2480	2483	2486	2489	2492	2495	2498	2501	2504	2507	2510	2513	2516	2519	2522	2525	2528	2531	2534	2537	2540	2543	2546	2549	2552	2555	2558	2561	2564	2567	2570	2573	2576	2579	2582	2585	2588	2591	2594	2597	2600	2603	2606	2609	2612	2615	2618	2621	2624	2627	2630	2633	2636	2639	2642	2645	2648	2651	2654	2657	2660	2663	2666	2669	2672	2675	2678	2681	2684	2687	2690	2693	2696	2699	2702	2705	2708	2711	2714	2717	2720	2723	2726	2729	2732	2735	2738	2741	2744	2747	2750	2753	2756	2759	2762	2765	2768	2771	2774	2777	2780	2783	2786	2789	2792	2795	2798	2801	2804	2807	2810	2813	2816	2819	2822	2825	2828	2831	2834	2837	2840	2843	2846	2849	2852	2855	2858	2861	2864	2867	2870	2873	2876	2879	2882	2885	2888	2891	2894	2897	2900	2903	2906	2909	2912	2915	2918	2921	2924	2927	2930	2933	2936	2939	2942	2945	2948	2951	2954	2957	2960	2963	2966	2969	2972	2975	2978	2981	2984	2987	2990	2993	2996	2999	3002	3005	3008	3011	3014	3017	3020	3023	3026	3029	3032	3035	3038	3041	3044	3047	3050	3053	3056	3059	3062	3065	3068	3071	3074	3077	3080	3083	3086	3089	3092	3095	3098	3101	3104	3107	3110	3113	3116	3119	3122

Anhang J

Untersuchungen an hohen Elementwänden (HEII) (Kapitel 7.4)

Tab. J 1: Zusammenstellung aller Daten der Versuche zur Modellvalidierung – Teil 1

Charge			1	2	3	4	5	6	
Ausbreitmaß [cm]	HEII01	Vertikaler Abstand vom Fußpunkt [cm]	64,5	56,0	54,5	52,5	53,5	50,0	
	HEII02		59,0	57,0	59,5	57,5	55,5	58,5	
	HEII03		34,5	39,5	34,0	37,0	39,0	37,5	
	HEII04		57,5	63,5	60,0	63,5	64,0	61,0	
	HEII05		57,5	55,0	56,5	59,0	61,0	60,0	
	HEII06		41,0	41,5	42,5	46,0	44,5	42,0	
Betonierhöhe [cm]	HEII01		55,3	112,0	170,0	222,0	277,7	317,7	
	HEII02		47,3	104,0	161,0	219,7	274,0	317,0	
	HEII03		56,0	110,0	165,3	223,3	280,0	317,3	
	HEII04		54,3	108,7	164,3	220,7	278,0	317,0	
	HEII05		54,3	111,3	166,3	220,3	275,7	317,7	
	HEII06		58,0	125,3	171,7	214,0	272,0	316,7	
Eintauchtiefe des Rüttler [cm]	HEII01		55,3	72,3	75,5	72,8	73,7	58,9	
	HEII02		47,3	64,3	66,5	70,5	70,0	58,2	
	HEII03		56,0	70,3	70,8	74,1	76,0	58,5	
	HEII04		54,3	69,0	69,8	71,5	74,0	58,2	
	HEII05		54,3	71,6	71,8	71,1	71,7	58,9	
	HEII06		58,0	85,6	77,2	64,8	68,0	57,9	
Mittlere Frischbetonrohddichte [kN/m³]	HEII01	23,20							
	HEII02	23,32							
	HEII03	23,40							
	HEII04	23,62							
	HEII05	23,69							
	HEII06	23,58							
Erstarrungszeit des Frischbetons [h]	HEII01	6,25							
	HEII02	5,63							
	HEII03	3,75							
	HEII04	6,25							
	HEII05	5,63							
	HEII06	4,38							
Maximaler Frischbeton-druck [kN/m²]	HEII01	DMS 1	20	-	-	-	-	-	-
		DMS 2	60	2,73	13,30	12,46	6,35	4,19	3,08
		DMS 3	100	-0,55	3,78	12,46	10,51	6,40	4,68
		DMS 4	140	0,77	2,60	14,41	19,52	14,24	9,75
		DMS 5	180	0,29	1,22	3,67	16,56	21,33	13,75
		DMS 6	220	0,57	1,60	2,12	7,38	20,80	20,73
		DMS 7	260	0,47	1,31	2,53	3,45	10,89	21,44
	HEII02	DMS 1	20	6,93	22,68	15,12	11,54	8,73	8,09
		DMS 2	60	0,16	12,36	15,11	7,12	3,66	1,49
		DMS 3	100	0,90	6,54	14,85	14,43	9,05	6,89
		DMS 4	140	0,19	1,24	9,10	16,86	15,98	11,48
		DMS 5	180	0,60	1,27	2,56	14,31	25,15	19,51
		DMS 6	220	0,53	1,56	2,04	5,56	17,88	24,32
		DMS 7	260	1,91	3,09	3,62	3,68	8,23	18,38
	HEII03	DMS 1	20	11,40	18,26	9,32	5,38	4,06	3,57
		DMS 2	60	2,69	14,10	13,99	5,90	3,71	3,15
		DMS 3	100	0,42	9,10	17,31	9,26	4,00	2,73
		DMS 4	140	0,58	1,55	7,93	12,71	8,75	6,53
		DMS 5	180	0,05	0,02	1,63	12,74	16,86	9,53
		DMS 6	220	0,02	0,31	0,85	5,24	12,03	11,24
		DMS 7	260	-0,04	0,52	1,14	2,09	10,88	16,99

Tab. J 2: Zusammenstellung aller Daten der Versuche zur Modellvalidierung – Teil 2

Charge		1	2	3	4	5	6		
Frischbeton- druck [kN/m ²]	HEII04	DMS 1	20	13,16	27,75	19,68	10,26	7,65	6,89
		DMS 2	60	0,85	13,84	16,71	7,99	0,75	-0,91
		DMS 3	100	0,59	14,19	23,04	22,87	15,76	9,16
		DMS 4	140	1,24	3,52	15,25	27,49	27,37	17,57
		DMS 5	180	0,66	2,65	2,69	14,59	24,92	24,40
		DMS 6	220	0,59	2,38	2,43	5,76	15,81	22,45
		DMS 7	260	0,79	2,90	3,87	3,78	12,26	18,94
	HEII05	DMS 1	20	8,83	23,14	18,62	10,34	6,56	5,02
		DMS 2	60	-0,27	11,91	18,83	11,03	1,41	-0,79
		DMS 3	100	-0,19	5,37	19,66	27,03	16,32	9,95
		DMS 4	140	2,00	3,93	13,52	25,56	29,25	17,34
		DMS 5	180	0,26	1,12	2,43	13,31	26,49	22,80
		DMS 6	220	0,36	1,40	1,68	4,66	17,06	23,74
		DMS 7	260	0,74	1,85	2,03	2,95	9,92	18,03
	HEII06	DMS 1	20	10,97	31,29	20,26	10,58	6,30	5,32
		DMS 2	60	0,09	14,04	13,50	5,84	-0,75	-2,68
		DMS 3	100	0,07	8,37	15,87	15,35	5,15	2,00
		DMS 4	140	0,69	2,27	10,91	18,60	20,56	8,75
		DMS 5	180	0,59	1,91	3,92	13,42	24,82	19,18
		DMS 6	220	0,04	0,31	0,52	1,90	13,96	20,05
		DMS 7	260	0,47	0,77	0,77	0,69	5,72	13,91

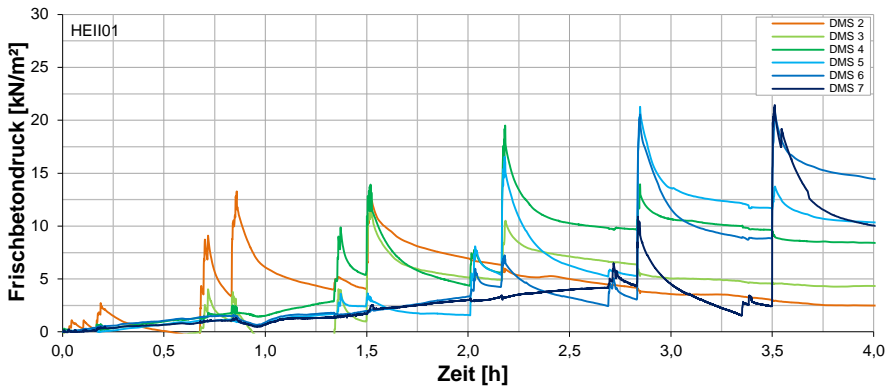


Abb. J 1: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von Versuch HEII01

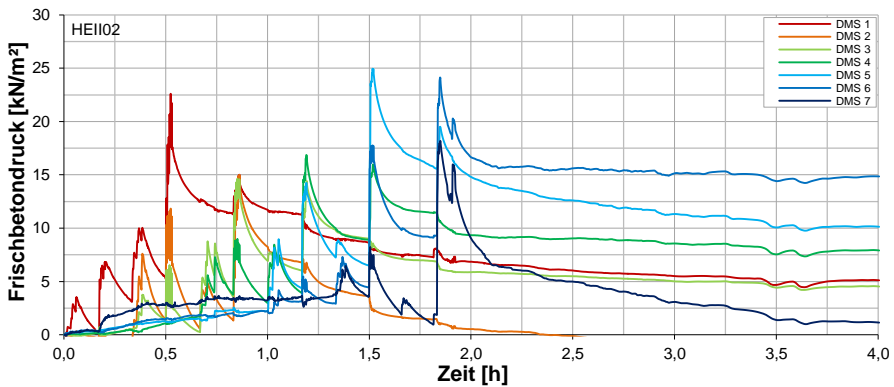


Abb. J 2: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von Versuch HEII02

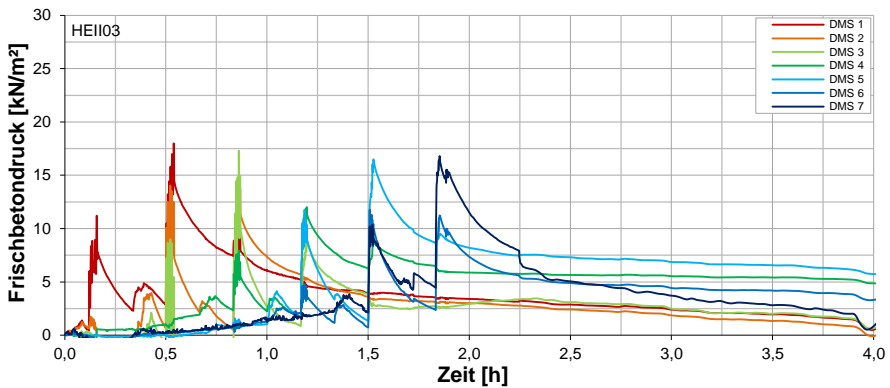


Abb. J 3: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von Versuch HEII03

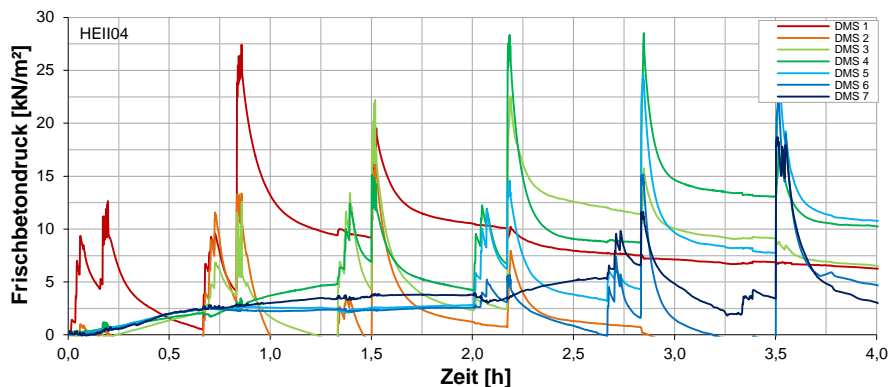


Abb. J 4: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von Versuch HEI104

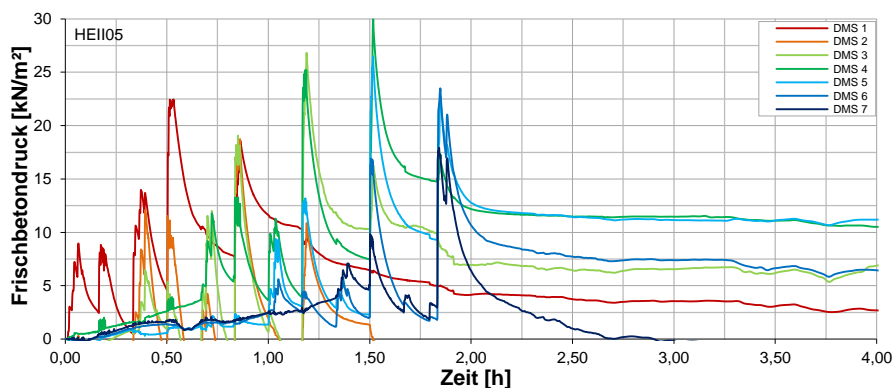


Abb. J 5: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von Versuch HEI105

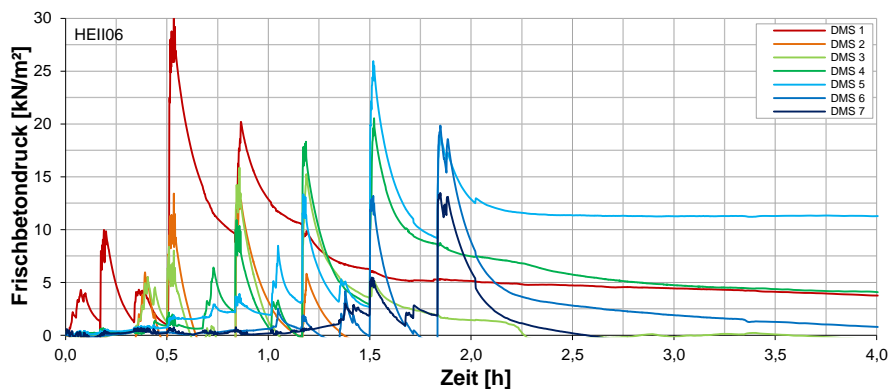


Abb. J 6: Zeitlicher Verlauf des Frischbetondrucks von Versuch HEI106

Nachrechnung der hohen Elementwände (HEII)

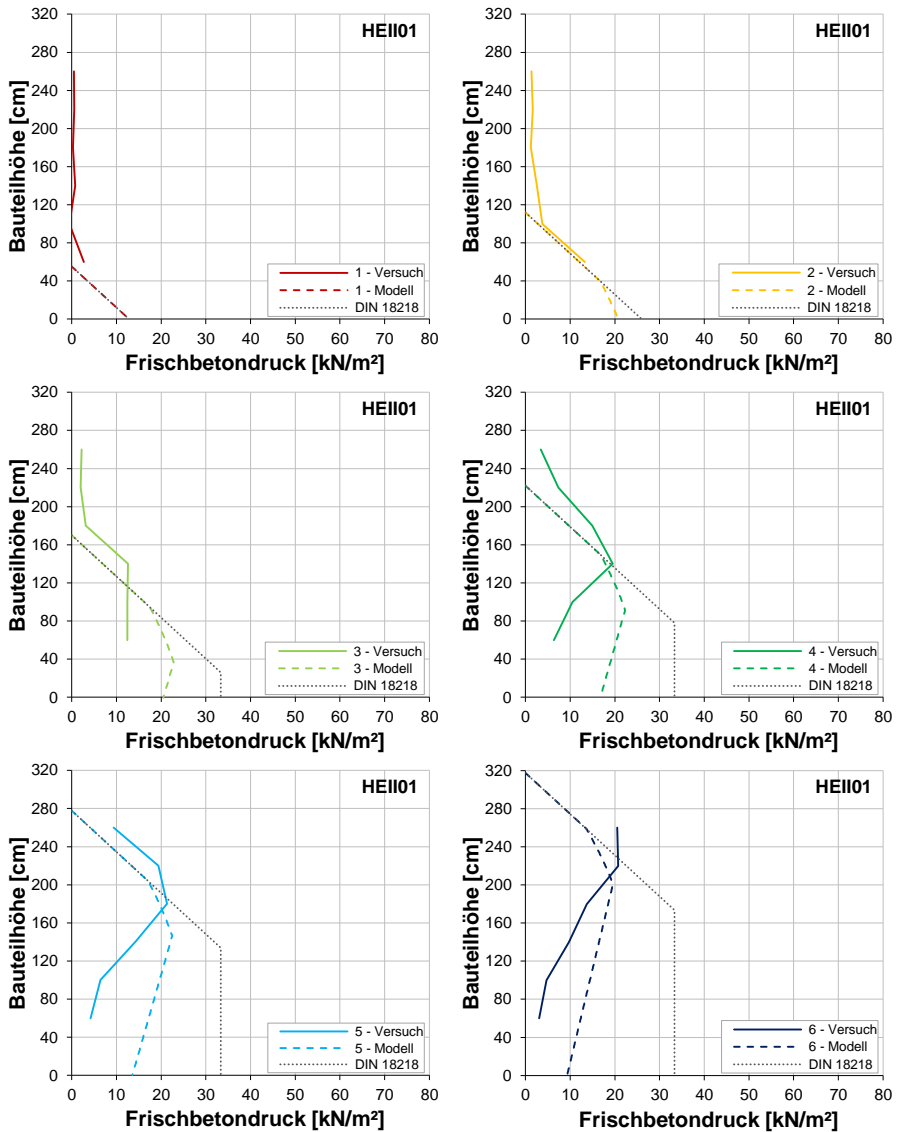


Abb. J 7: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach *DIN 18218* ermittelten Druck für alle sechs Verdichtungsvorgänge bei HEII01

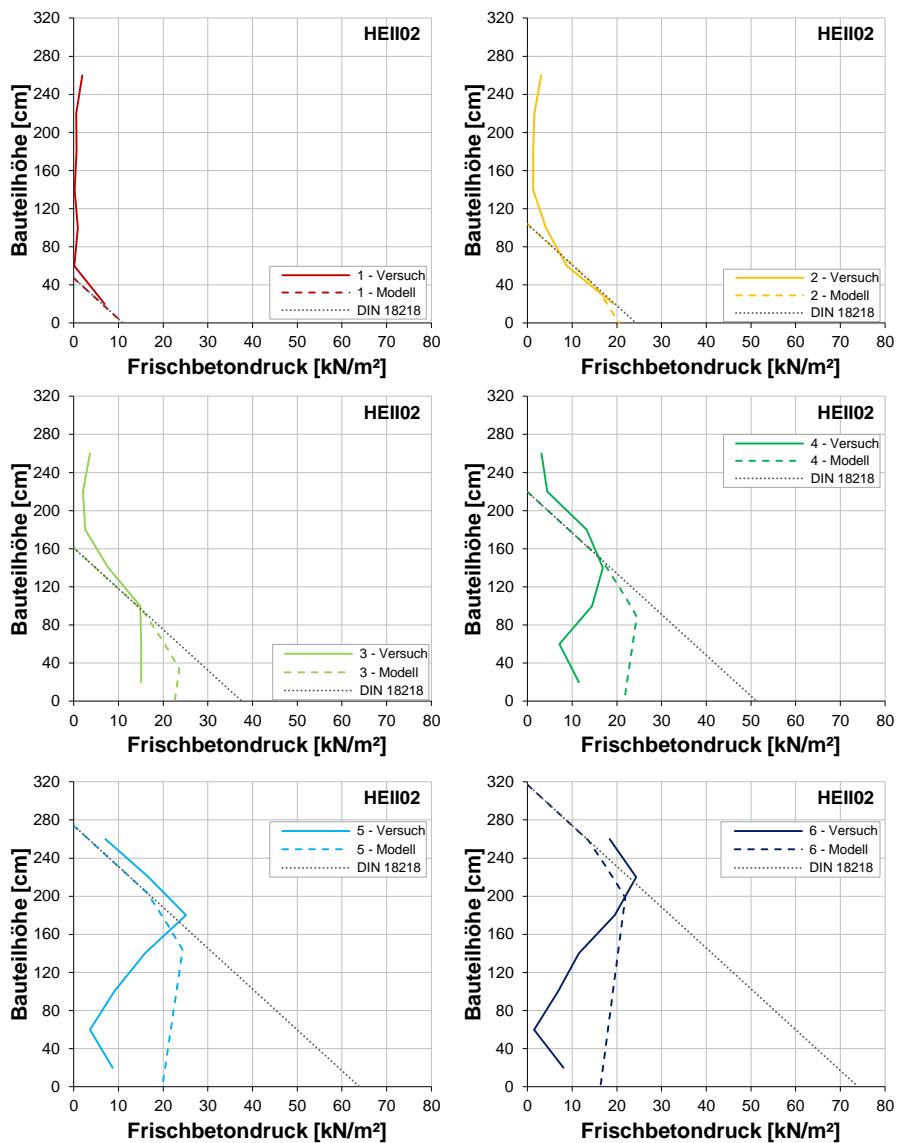


Abb. J 8: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach *DIN 18218* ermittelten Druck für alle sechs Verdichtungsvorgänge bei HEI102

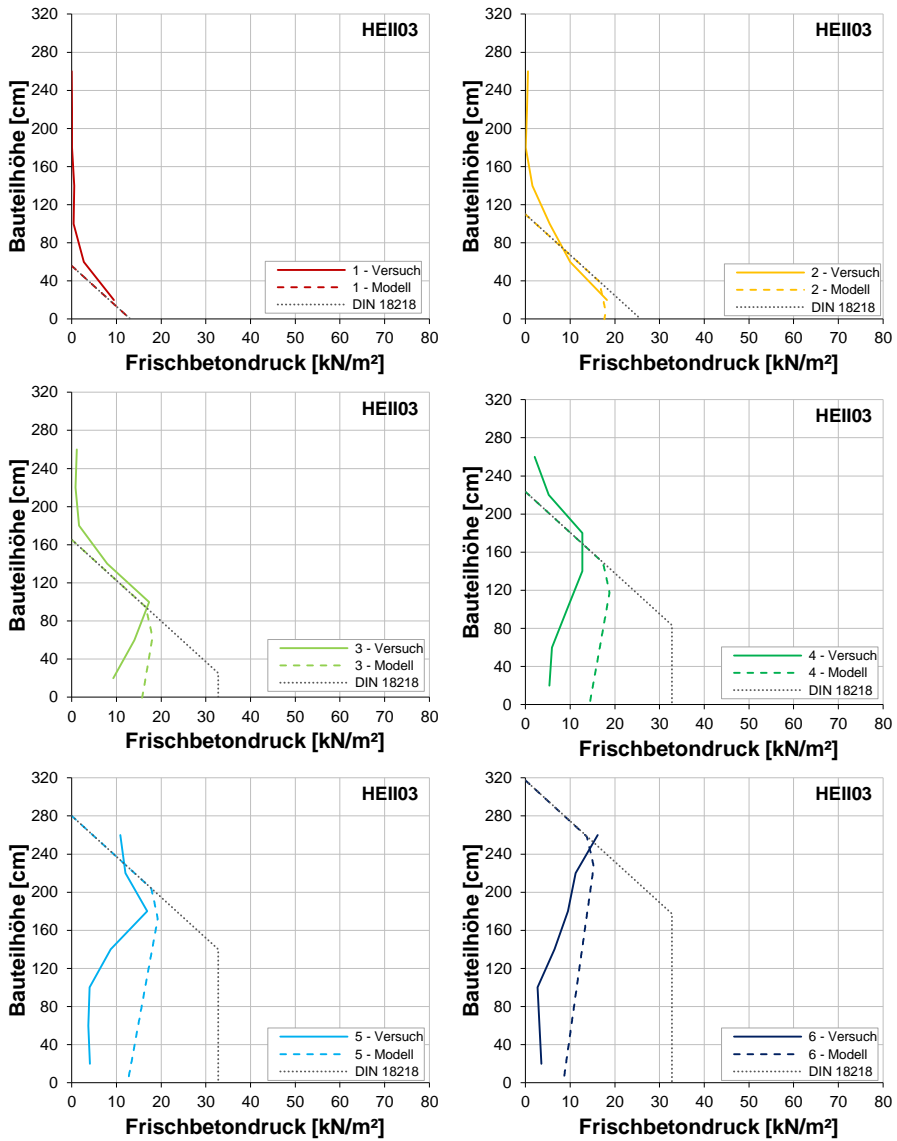


Abb. J 9: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach *DIN 18218* ermittelten Druck für alle sechs Verdichtungsvorgänge bei HEI103

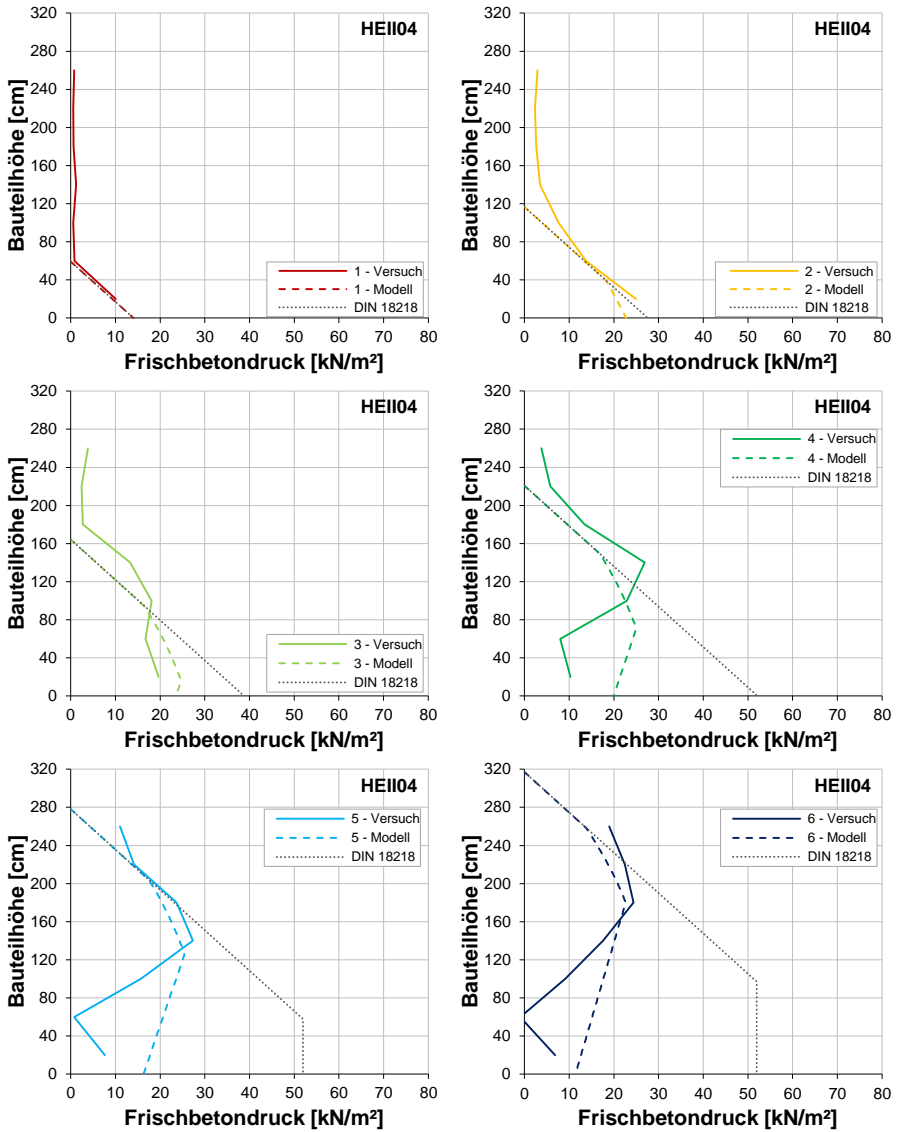


Abb. J 10: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach *DIN 18218* ermittelten Druck für alle sechs Verdichtungsvorgänge bei HEI104

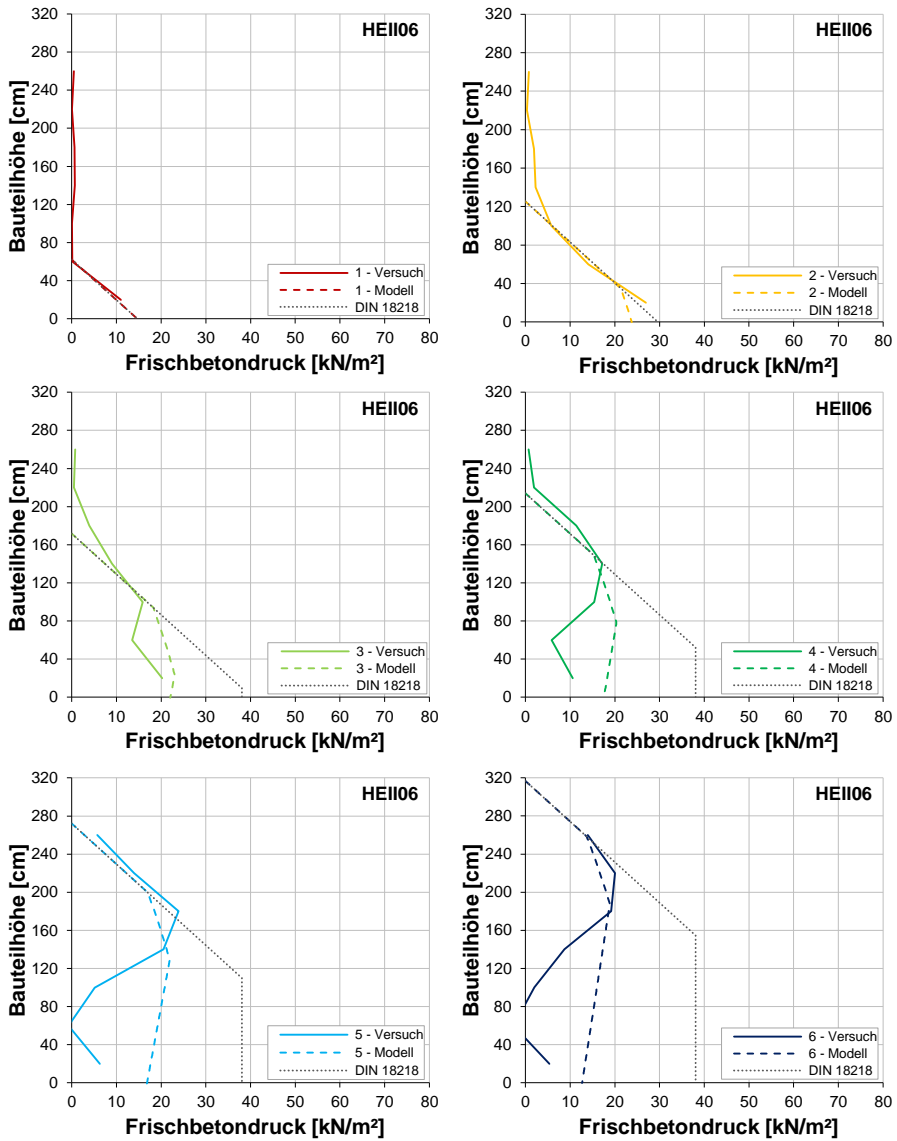


Abb. J 11: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach *DIN 18218* ermittelten Druck für alle sechs Verdichtungsvorgänge bei HEI106

Nachrechnung der hohen Elementwände (HE)

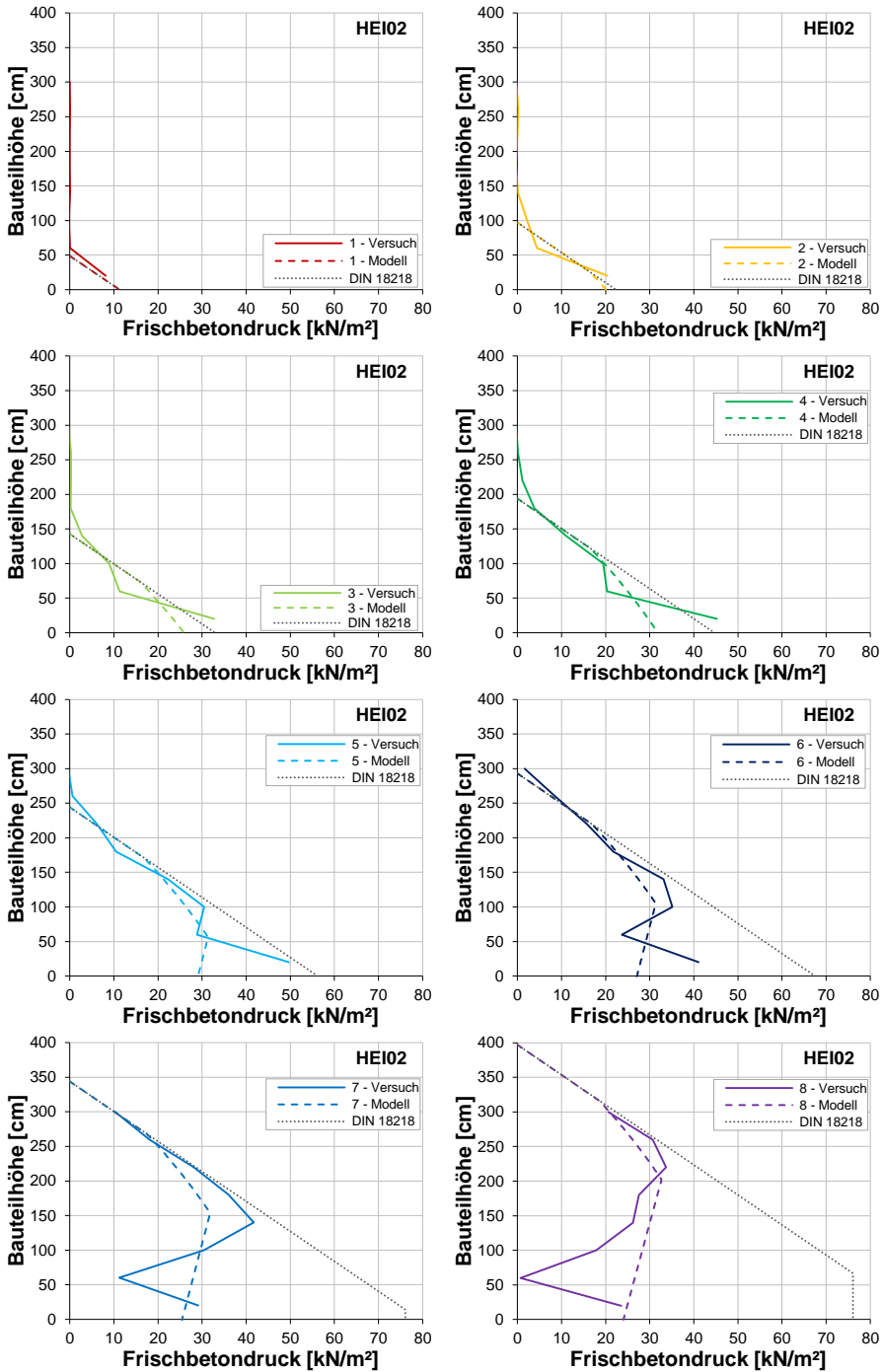


Abb. J 12: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach DIN 18218 ermittelten Druck für alle acht Verdichtungsvorgänge bei HEI02

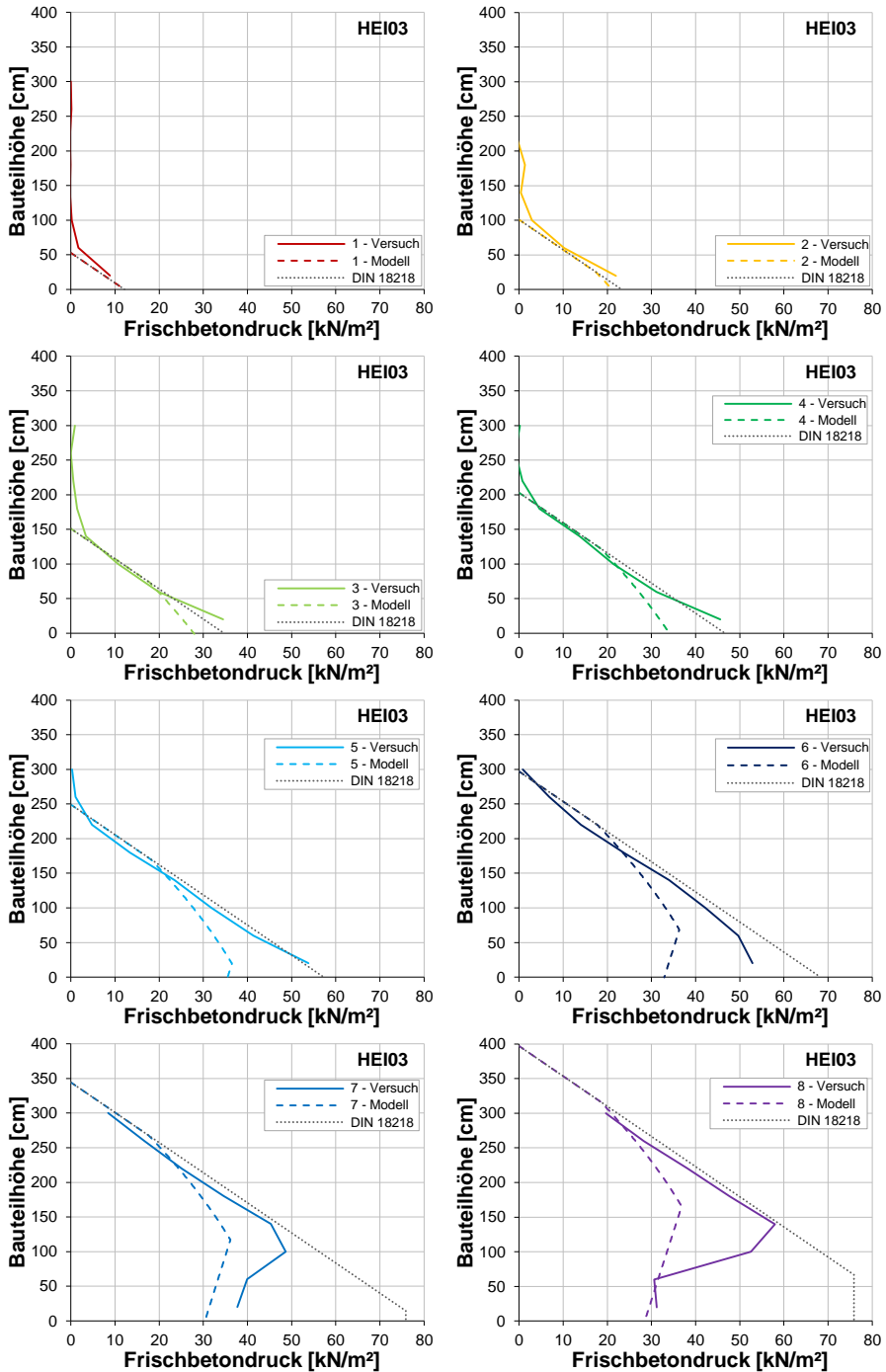


Abb. J 13: Vergleich von gemessenem Druck mit dem mittels Berechnungsmodell und nach DIN 18218 ermittelten Druck für alle acht Verdichtungsvorgänge bei HEI03

Anhang K

Berechnungsvorschlag Frischbetondruck (Kapitel 8.1)

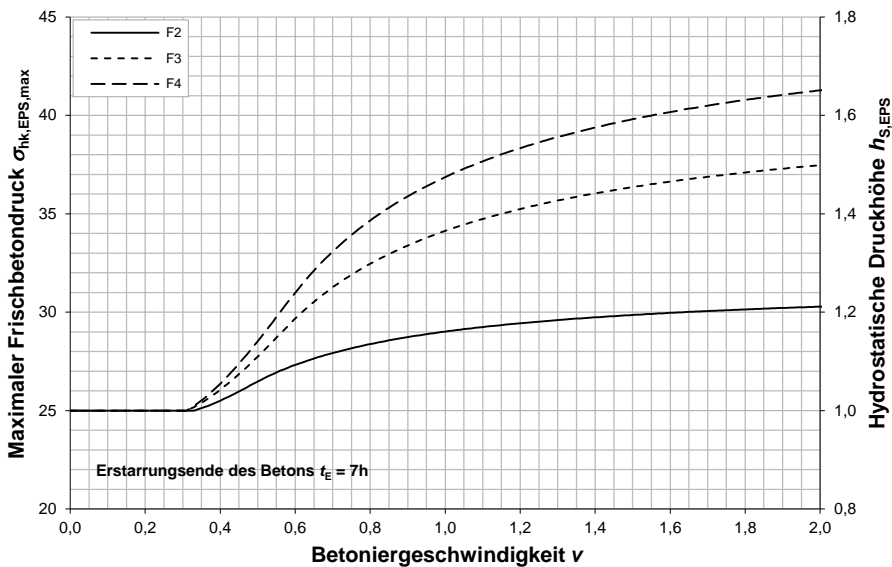


Abb. K 1: Diagramm zur Bestimmung des Frischbetondrucks in Elementwänden mit integriertem EPS-Dämmstoff bei einem Erstarrungsende t_E von 7 h

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Andreas Schmitt

Beruflicher Werdegang

01/2012 – 12/2016: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Kaiserslautern am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion bei Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell sowie im Lehrgebiet Baukonstruktion und Fertigteilbau bei Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

Hochschulausbildung

10/2006 – 12/2011: Studium des Bauingenieurwesens an der TU Kaiserslautern; Vertiefungsfächer: Massivbau, Stahlbau und Grundbau; Abschluss als Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Schulbildung

06/2006: Abitur am Cusanus Gymnasium in St. Wendel