

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Aufbau der Arbeit .....	6
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Werkstoff mineralisierter Schaum .....	9
2.1.1 Entwicklungsgeschichte und Anwendungsfelder .....	9
2.1.2 Kategorisierung und Eigenschaften zementgebundener Schäume im Allgemeinen .....	11
2.1.3 Materialzusammensetzung des mineralisierten Schaums.....	21
2.1.4 Herstellungsverfahren des mineralisierten Schaums .....	23
2.1.5 Schaumzerstörende Mechanismen .....	24
2.1.6 Bisher bekannte Materialeigenschaften des mineralisierten Schaums	25
2.2 Ökobilanzierung von Werkstoffen.....	27
2.2.1 Grundsätze und Nutzen .....	27
2.2.2 Ziele und Untersuchungsrahmen .....	30
2.2.3 Sachbilanz und Datenqualität .....	35
2.2.4 Wirkungsabschätzung .....	39
2.2.5 Auswertung .....	42
2.2.6 Ökologischer Hintergrund von Zementwerkstoffen .....	43
2.2.7 Geschichtlicher und ökologischer Hintergrund von Dämmstoffen ....	51
2.3 Prüfverfahren mechanischer Kennwerte verschiedener Materialgruppen.....	60
2.3.1 Allgemeines.....	60
2.3.2 Probekörperbeschaffenheit.....	60
2.3.3 Druck - Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit .....	63
2.3.4 Zug – Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit.....	65
2.3.5 Schubmodul und Schubfestigkeit .....	67
2.3.6 Statistische Methoden.....	68
2.4 Sandwichbauweisen und Sandwichtheorien .....	73
2.4.1 Definition und Einteilung von Sandwichelementen .....	73
2.4.2 Konstruktion und Tragverhalten.....	74

2.4.3	Mechanische Grundlagen der Sandwichtheorien .....	76
2.4.4	Analytische und numerische Berechnungsverfahren.....	84
<b>3</b>	<b>Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von zementösem, mineralisiertem Schaum</b>	<b>89</b>
3.1	Allgemeines .....	89
3.2	Auswahl zweier Porositäten.....	90
3.2.1	Zusammenhang von Porosität und Rohdichte .....	90
3.2.2	Auswahl der Porositätsklassen .....	92
3.3	Vorversuche zur Probekörpergeometriebestimmung.....	92
3.3.1	Geometrie für Schubversuche .....	92
3.3.2	Geometrie für uniaxiale Zugversuche .....	93
3.3.3	Geometrie für uniaxiale Druckversuche.....	96
3.4	Probekörperherstellung und Versuchsvorbereitung .....	96
3.4.1	Mischungsentwurf des mineralisierten Schaums.....	96
3.4.2	Vorbereitung der Schalung.....	97
3.4.3	Betonage der Probekörper .....	101
3.4.4	Ausschalvorgang und Lagerung .....	102
3.5	Schubversuche am Biegebalken.....	103
3.5.1	Rohdichte der Probekörper .....	103
3.5.2	Vorbereitung der Probekörper .....	104
3.5.3	Versuchsaufbau und Messequipment .....	105
3.5.4	Versuchsdurchführung .....	106
3.5.5	Ermittlung der Schubfestigkeit und des Schubmoduls .....	110
3.5.6	Statistische Auswertung .....	113
3.6	Uniaxiale Zugversuche .....	116
3.6.1	Rohdichte der Probekörper .....	116
3.6.2	Vorbereitung der Probekörper .....	117
3.6.3	Versuchsaufbau und Messequipment .....	119
3.6.4	Versuchsdurchführung .....	120
3.6.5	Ermittlung der Zugfestigkeit .....	122
3.6.6	Statistische Auswerteverfahren .....	123
3.7	Uniaxiale Druckversuche.....	125
3.7.1	Rohdichte der Probekörper .....	125
3.7.2	Vorbereitung der Probekörper .....	125
3.7.3	Versuchsaufbau und Messequipment .....	126
3.7.4	Versuchsdurchführung .....	127
3.7.5	Ermittlung der Druckfestigkeit.....	130
3.7.6	Statistische Auswerteverfahren .....	131
3.8	Morphologie der beiden Schäume .....	132
3.8.1	Porengrößeneinteilung und deren Ermittlung.....	132

3.8.2	Porengrößenverteilung .....	134
3.8.3	Porositätsklasseneinteilung.....	136
3.9	Ergänzende Untersuchungen zur Carbonatisierungsneigung von mineralisiertem Schaum.....	137
3.9.1	Carbonatisierungsvorgang zementöser Werkstoffe .....	137
3.9.2	Untersuchung zum Carbonatisierungsverhalten .....	138
3.10	Ergänzende Ausführungen zum Formänderungsverhalten infolge Schwindens .....	147
3.11	Zusammenfassung und Vergleich mit anderen Kernwerkstoffen .....	150
<b>4</b>	<b>Ökobilanzierung von mineralisiertem Schaum</b>	<b>153</b>
4.1	Allgemeines .....	153
4.2	Prinzipdarstellung einer Stoffstromanalyse am Beispiel von Normalbeton....	154
4.3	Durchführung der Produktökobilanzierung .....	162
4.3.1	Ziel und Untersuchungsrahmen für die Bilanzierung.....	162
4.3.2	Sachbilanz durch Stoffstromanalyse und Datenerhebung .....	163
4.3.3	Datenberechnung und Wirkungsabschätzung mit GaBi.....	166
4.3.4	Auswertung der Umweltwirkungen von mineralisiertem Schaum ....	168
4.4	Mineralisierter Schaum im ökologischen Vergleich mit anderen Dämmstoffen .....	173
4.5	Recyclingpotential von mineralisiertem Schaum.....	178
4.6	Zusammenfassung .....	183
<b>5</b>	<b>Berechnungsverfahren von Sandwichelementen mit mineralisiertem Schaum</b>	<b>185</b>
5.1	Allgemeines .....	185
5.2	Analytische Berechnungsverfahren .....	187
5.2.1	Verfahren nach dem Einschichtansatz.....	187
5.2.2	Verfahren nach Stamm und Witte .....	197
5.2.3	Verfahren nach Wölfel .....	212
5.2.4	Verfahren nach DIN 14509 Anhang E .....	215
5.2.5	Zickzack-Theorie.....	216
5.2.6	Verfahren nach Pagano.....	230
5.2.7	Fachwerkmodell .....	233
5.2.8	Zusammenfassung und Unterscheidungsmerkmale der analytischen Berechnungsansätze .....	236
5.3	Umsetzung in Matlab.....	237
5.3.1	Vorgehensweise bei der Erstellung von GUIs.....	237
5.3.2	Einfeldträgerlösungen .....	246
5.3.3	Plattenlösung .....	260
5.4	Validierungsversuche an Sandwichelementen aus Schaum und Papier .....	262

5.4.1	Hintergrund .....	262
5.4.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	262
5.4.3	Versuchsergebnisse .....	265
5.4.4	Aufbereitung der Materialparameter und Nachrechnung der Versuche 268	
5.5	Vergleich verschiedener Berechnungstheorien .....	274
5.5.1	Referenzsysteme und Vorgaben .....	274
5.5.2	Vergleichsberechnung für einen Sandwichbalken mit Deckschichten aus mikrobewehrtem ultrahochfestem Beton .....	282
5.5.3	Vergleichsberechnung für einen Sandwichbalken mit Deckschichten aus Papier .....	289
5.5.4	Vergleichsberechnungen für Sandwichplatten mit Deckschichten aus mikrobewehrtem ultrahochfestem Beton und Trayformer - Papier...296	
5.6	Zusammenfassung .....	299
<b>6</b>	<b>Mineralisierter Schaum in der baupraktischen Anwendung</b>	<b>303</b>
6.1	Allgemeines .....	303
6.2	Analyse von Hüllbauteilen.....	304
6.2.1	Bauliche Anwendungsmöglichkeiten neuartiger Sandwichelemente 304	
6.2.2	Erläuterungen zum Verbund zwischen Kern- und Deckschichten ...306	
6.2.3	Geometrie typischer Sandwichplattenelemente.....309	
6.3	Anforderung an Hüllbauteile .....	311
6.3.1	Bauphysikalische Anforderungen.....311	
6.3.2	Statisch-konstruktive Anforderungen.....313	
6.3.3	Brandschutztechnische Anforderungen .....	315
6.4	Umsetzung von Sandwichelementen mit mineralisiertem Schaum .....	318
6.4.1	Nachweis ausreichender Wärmedämmeigenschaften.....318	
6.4.2	Nachweis ausreichender Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit..320	
6.4.3	Vordimensionierung von Sandwichbalken und Sandwichplatten ....326	
6.4.4	Anwendungsbeispiel Sandwich mit Papierdeckschichten.....334	
6.5	Zusammenfassung .....	341
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>343</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>345</b>
<b>Anhang</b>		<b>353</b>
A.1	Zusammenstellung von Prüfverfahren zur Ermittlung mechanischer Kennwerte .....	353
A.1.1	Ermittlung druckabhängiger Parameter.....353	
A.1.2	Ermittlung zugabhängiger Parameter .....	354
A.1.3	Ermittlung schubabhängiger Parameter.....355	

A.2	Statische Auswertung der Versuche an mineralisiertem Schaum .....	356
A.2.1	Schubversuche.....	356
A.2.2	Zugversuche .....	360
A.3	Morphologische Untersuchungen an mineralisiertem Schaum .....	361
A.3.1	Schaum A mit Wasser – Zement – Wert 0,4 .....	361
A.3.2	Schaum B mit Wasser – Zement – Wert 0,45 .....	364
A.4	Stoffstromanalyse zur Herstellung von 1 m <sup>3</sup> mineralisiertem Schaum .....	367
A.5	Ergänzende Gleichungen der Sandwichtheorien.....	368
A.5.1	Gleichungen für die Plattenlösung nach Stamm und Witte .....	368
A.5.2	Berechnung der Koppelfaktoren für nachgiebigen Verbund nach der Theorie von Wölfel .....	371
A.5.3	Berechnung der Elemente der Steifigkeitsmatrix für die Zickzack – Theorie nach Tessler .....	378
A.5.4	Berechnung des Lastvektors einer Einzellast für die Zickzack – Theorie nach Tessler .....	381
A.6	Vergleichsberechnungen verschiedener Sandwichtheorien von Sandwichplatten .....	384
A.6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse einer Vergleichsrechnung verschiedener Sandwichtheorien am Beispiel einer Sandwichplatte mit Deckschichten aus mikrobewehrtem ultrahochfestem Beton .....	384
A.6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse einer Vergleichsrechnung verschiedener Sandwichtheorien am Beispiel einer Sandwichplatten mit Deckschichten aus Trayformer - Papier .....	392
A.6.3	Ermittlung eines Mindestschubmoduls für Kernschichten aus mineralisiertem Schaum und Deckschichten aus mrUHPC und Trayformer – Papier bei Sandwichplatten .....	400