

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen

xvii

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Aufbau der Arbeit	6
2	Theoretische Grundlagen	9
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

3	Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von zementösem, mineralisiertem Schaum	89
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	Ausschaltvorgang 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
4	Ökobilanzierung von mineralisiertem Schaum	153
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
5	Berechnungsverfahren von Sandwichelementen mit mineralisiertem Schaum	185
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	V 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
6	Mineralisierter Schaum in der baupraktischen Anwendung	303
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
7	Fazit und Ausblick	343
	Literaturverzeichnis	345
	Anhang	353
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 ³ 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