

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Der Baustoff Porenbeton	3
1.2	Produktionsablauf	3
1.3	Problemstellung	4
2	Theoretische Grundlagen	8
2.1	Das System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$	8
2.1.1	CSH I	9
2.1.2	CSH II	9
2.1.3	Tobermorit	9
2.2	Modellreaktionen vor der hydrothermalen Härtung	11
2.2.1	Zemementhydratation	11
2.2.2	Einflüsse von K_2O , Al_2O_3 und SO_3 (bzw. SO_4^{2-}) auf die Zementehärtung	18
2.2.3	Brannkalkhydratation	19
2.2.4	Reaktion des Aluminiumpulvers	19
2.2.5	Reaktionen von Quarzsandbestandteilen unter „Normalbedingungen“	20
2.3	Modellreaktionen während der hydrothermalen Härtung	20
2.3.1	Reaktionsablauf im reinen $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ System unter hydrothermalen Bedingungen	20
2.3.2	Einflüsse von K_2O , Al_2O_3 und SO_3 (bzw. SO_4^{2-}) auf die Reaktionsabläufe während der hydrothermalen Härtung	24
3	Untersuchungsmethoden	26
3.1	Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung der Ausgangsmaterialien	26
3.1.1	Freikalkbestimmung nach Franke	26
3.1.2	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	26
3.2	Kalorimetrie als Untersuchungsmethode des Sulfateinflusses vor der hydrothermalen Härtung	26
3.2.1	Grundlagen zur Kalorimetrie	26
3.2.2	Handhabung des Differentialkalorimeters	28
3.3	Untersuchungsmethoden während und nach der hydrothermalen Härtung	29
3.3.1	Diffraktometrische Untersuchungsmethoden	29
3.3.1.1	Röntgendiffraktometrie	29
3.3.1.2	Neutronenbeugung	30
3.3.1.3	Verarbeitung der Diffraktogramme	33
3.3.2	Rohdichtepfung	37

3.3.3	Druckfestigkeitsprüfung	37
3.3.4	E-Modul Bestimmung	38
3.3.5	Wärmeleitfähigkeitsuntersuchung	39
3.3.6	Messung der Schwindung	39
3.3.7	Mikroporenanalyse	40
3.3.8	Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM)	41
3.3.9	Bestimmung des eluierbaren Sulfats	42
3.4	Fehlerbetrachtung	43
4	Materialien	44
4.1	Sulfatträger	44
4.1.1	Gips, Halbhydrat und Anhydrit (synthetisch)	44
4.1.2	Synthetisches Bariumsulfat	44
4.1.3	Synthetisches Kaliumsulfat, wasserfrei	44
4.1.4	Ettringit (CASULprotect®)	44
4.1.5	Anhydrit, Sekundärprodukt	45
4.1.6	Handelsüblicher Stuckgips	45
4.2	Zemente	46
4.2.1	Werkszement	46
4.2.2	Laborzemente	46
4.3	Aluminiumträger	50
4.3.1	Tricalciumaluminat	50
4.3.2	Tonerdeschmelzzement	50
4.3.3	Aluminiumhydroxid	50
4.3.4	Aluminiumpulver	51
4.4	Branntkalk und Kalkhydrat	52
4.4.1	Laborbranntkalk	52
4.4.1.1	Branntkalk für kalorimetrische Untersuchungen	52
4.4.1.2	Laborbranntkalk für ILL-Versuche	54
4.4.2	Werksbranntkalk und Kalkhydrat (Technikumsgießungen)	54
4.5	Quarzsande	55
4.5.1	Quarzmehl für kalorimetrische Untersuchung	55
4.5.2	Quarzsandmehl W12	55
4.5.3	Werksquarzsande S1-S4	56
5	Versuchsdurchführung	57
5.1	Sulfateinfluss auf die Reaktionen vor der hydrothermalen Härtung: Kalorimetrische Untersuchungen	57

5.2	Kontinuierliche Neutronenbeugungsexperimente (ILL)	57
5.3	Diskontinuierliche Versuchsreihen analog zu den ILL-Experimenten	58
5.4	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Sand und Sulfatträger	60
5.5	Zusätzliche Versuchsreihen	62
5.5.1	Versuche mit aluminatreichem Laborklinker	62
5.5.2	Versuche mit verschiedenen Calciumphosphaten	62
6	Ergebnisse	64
6.1	Sulfateinfluss auf die Reaktionen vor der hydrothermalen Härtung: Kalorimetrische Untersuchungen	64
6.1.1	Einfluss der Zement-Sulfatträger auf die Hydratation der Laborzementklinker	64
6.1.1.1	Aluminatfreie Zemente	64
6.1.1.2	Aluminatreiche Zemente	65
6.1.1.3	Aluminatreiche Zemente mit 1 M.-% K_2O (K_2SO_4 mitgebrannt)	66
6.1.1.4	Aluminatreiche Zemente mit 1 M.-% K_2O (K_2SO_4 nachträglich zugegeben)	67
6.1.2	Einfluss der Klinkerphasengehalte bei gleichem Zement-Sulfatträger auf die Zementhydratation	68
6.1.3	Einfluss der Temperatur bei gleichem Zement-Sulfatträger auf die Zementhydratation	69
6.1.4	Einfluss des Porenbeton-Sulfatträger auf die Hydratation der Laborzemente bei gleichem Zement-Sulfatträger	70
6.1.4.1	Aluminatfreier Zement mit verschiedenen Porenbeton-Sulfatträger	73
6.1.4.2	Aluminatreicher Zement mit verschiedenen Porenbeton-Sulfatträger	74
6.1.4.3	Aluminatreicher Zement 1 M.-% K_2O (K_2SO_4 mitgebrannt) mit verschiedenen Porenbeton-Sulfatträger	74
6.1.4.4	Aluminatreicher Zement 1 M.-% K_2O (K_2SO_4 nachträglich zugegeben) mit verschiedenen Porenbeton-Sulfatträger	75
6.1.5	Einfluss der Porenbeton-Sulfatträger auf die Kalklöschreaktion der Laborbranntkalk	80
6.1.5.1	Weich gebrannter Kalk mit verschiedenen Porenbeton-Sulfatträger	81
6.1.5.2	Hart gebrannter Kalk mit verschiedenen Porenbeton-Sulfatträger	82
6.1.6	Einfluss der Variation eines Bindemittels auf die Hydratation einer Beispiel-Porenbetonmischung	84
6.1.6.1	Variation des Zementtyps	85
6.1.6.2	Variation des Brantkalks	86
6.2	Sulfateinfluss auf die Reaktionen während der hydrothermalen Härtung: Kontinuierliche Neutronenbeugungsexperimente (ILL)	87
6.2.1	Reaktionsmechanismus	88
6.2.2	Auswertung des 0.308 nm-Tobermoritreflexes	89
6.2.3	Phasenzusammensetzung während der hydrothermalen Härtung	91

6.3	Diskontinuierliche Versuchsreihen analog zu den ILL-Experimenten	94
6.3.1	Gegenüberstellung der röntgendiffraktometrischen Ergebnisse der beiden Versuchsreihen	94
6.3.2	Gegenüberstellung der CSH-Morphologie (REM), der Phasenanalyse und der Druckfestigkeit (Technikumsversuche)	95
6.3.2.1	System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nach 0, 2, 4, 6 und 8 h Autoklavierung bei 190 °C	95
6.3.2.2	System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nach 6 h Autoklavierung bei 190 °C mit verschiedenen Zusätzen	98
6.3.3	Entwicklung der Druckfestigkeit	102
6.3.3.1	Vergleich der ILL-Experimente	102
6.3.3.2	Experimente mit Kaliumhydroxid, Alu-Träger und Anhydrit	103
6.3.3.3	Versuchsreihe mit Alu-Träger	104
6.3.3.4	Experimente mit Sulfatträger	105
6.3.3.5	Experimente mit Kalium-Trägern	106
6.4	Sulfateinfluss auf das gehärtete Material	107
6.4.1	Variation des Sulfatträgeranteils	107
6.4.2	Variation des Sands mit und ohne Anhydrit	109
6.4.3	Variation der Sulfatträgerart	110
6.5	Zusätzliche Versuchsreihen	112
6.5.1	Versuche mit aluminatreichem Laborklinker	112
6.5.2	Versuche mit verschiedenen Calciumphosphaten	112
7	Diskussion	114
7.1	Sulfateinfluss auf die Prozesse vor der hydrothermalen Härtung: kalorimetrische Untersuchungen	114
7.1.1	Einfluss der Zement-Sulfatträger auf die Hydratation der Laborzementklinker	114
7.1.1.1	Aluminatfreie Zemente	114
7.1.1.2	Aluminatreiche Zemente ohne K_2O	114
7.1.1.3	Aluminatreiche Zemente mit 1 M.-% K_2O (K_2SO_4 mitgebrannt)	114
7.1.1.4	Aluminatreiche Zemente 1 M.-% K_2O (K_2SO_4 nachträglich zugegeben)	117
7.1.2	Einfluss der Klinkerphasengehalte bei gleichem Zement-Sulfatträger auf die Zementhydratation	117
7.1.3	Einfluss der Temperatur auf die Zementhydratation bei gleichem Zement-Sulfatträger	118
7.1.4	Einfluss der Porenbeton-Sulfatträger auf die Hydratation der Laborzemente bei gleichem Zement-Sulfatträger	118
7.1.4.1	Aluminatfreier Zement und Porenbeton-Sulfatträger	119
7.1.4.2	Aluminatreiche Zemente und Porenbeton-Sulfatträger	120
7.1.4.3	Porenbeton-Sulfatträger Einflüsse auf die Zemente (nach Sulfatträger aufgeschlüsselt)	121
7.1.5	Einfluss der Porenbeton-Sulfatträger auf die Kalklöschreaktion der Laborbranntkalk	123
7.1.6	Einfluss der Variation eines Bindemittels auf die Hydratation einer Beispiel-Porenbetonmischungen	123

7.1.6.1	Einfluss des Zementes auf die Wärmeentwicklung einer Beispielmischung	123
7.1.6.2	Einfluss des Branntkalks auf die Wärmeentwicklung einer Beispielmischung	126
7.2	Sulfateinfluss auf die Reaktionen während der hydrothermalen Härtung	127
7.2.1	Kontinuierliche Neutronenbeugungsexperimente (ILL)	127
7.2.1.1	Reaktionsmechanismus	128
7.2.1.2	Auswertung des 0.308 nm –Tobermorit-Reflexes	128
7.2.1.3	Phasenzusammensetzung während der hydrothermalen Härtung	129
7.2.2	Diskontinuierliche Versuchsreihen analog zu den ILL-Experimenten	134
7.2.2.1	Gegenüberstellung der röntgendiffraktometrischen Ergebnisse beider Versuchsreihen	134
7.2.2.2	Zusammenfassung charakteristischer Reaktionen in der Porenbetonproduktion	135
7.2.2.3	Druckfestigkeitsentwicklung	143
7.3	Sulfateinfluss auf das gehärtete Material	144
7.3.1	Variation des Sulfatträgeranteils	144
7.3.2	Variation des Sands mit und ohne Anhydrit	144
7.3.3	Variation der Sulfatträgerart	145
7.4	Zusätzliche Versuchsreihen	146
7.4.1	Versuche mit aluminatreichem Laborklinker	146
7.4.2	Versuche mit verschiedenen Calciumphosphaten	146
8	Zusammenfassung	147
8.1	Sulfateinfluss auf die Reaktionen vor der hydrothermalen Härtung: Kalorimetrische Untersuchungen	147
8.2	Sulfateinfluss auf die Reaktionen während der hydrothermalen Härtung	148
8.3	Sulfateinfluss auf das gehärtete Material	148
9	Ausblick	150
10	Literatur	151
11	Anhang	159
