

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zementhydratation	5
2.1	Grundlagen	5
2.1.1	Bestandteile des Portlandzementes	5
2.1.2	Hydratation der Klinkerphasen	6
2.1.3	Verlauf der Hydratation	7
2.1.4	Hydratationsgrad	9
2.2	Volumetrische Betrachtung der Hydratation	11
2.2.1	Modell von Powers und Brownyard	11
2.2.2	Chemisch gebundenes Wasser	12
2.2.3	Physikalisch gebundenes Wasser	17
2.2.4	Chemisches Schwinden	22
2.2.5	Gelporosität und Kapillarporosität	25
2.2.6	Hydratationsgradabhängige Beschreibung der Volumenanteile	29
2.3	Reaktionsmechanismus der Hydratation	30
2.3.1	Mechanismen	30
2.3.2	Einfluss der Mahlfeinheit des Zementes	33
2.3.3	Einfluss von Temperatur und Feuchte	33
2.4	Porenstruktur und Modelle	37
2.4.1	Porengrößen	37
2.4.2	Gelporosität	38
2.4.3	Kapillarporen	41
2.4.4	Porenmodelle	42
3	Strukturmodelle für Zementstein	43
3.1	Der zelluläre Automat CEMHYD3D	44
3.2	Kern-Schalen-Modelle	45
3.3	Vergleich der Modelle	48
4	Hydratations- und Strukturmodell auf der Basis finiter Elemente	51
4.1	Ziel und Modellansatz	51
4.2	Teilmodelle	52

4.2.1	Beschreibung der Ausgangssituation	52
4.2.1.1	Partikelgrößen und Volumen	52
4.2.1.2	Partikelanordnung in der Kontaktzone	55
4.2.1.3	Partikelanordnung infolge Agglomeration	56
4.2.1.4	Transformation der Partikel in ein räumliches Gitter	62
4.2.2	Hydratationsmodell	65
4.2.2.1	Die Lösung und somit Mobilisierung von Zement	66
4.2.2.2	Der Transport von gelöstem Zement	68
4.2.2.3	Die Bildung von Produkten	71
4.2.3	Die Kopplung der Teilprozesse	74
4.3	Umsetzung in der FEM	75
4.3.1	Aufstellen der Finiten-Elemente-Lösung	76
4.3.2	Zeitliche Lösung des Gleichungssystems	78
4.4	Numerische Umsetzung	79
4.4.1	Abfolge und Struktur des Programmkerns	79
4.4.2	Berechnung der reaktiven Oberfläche	81
5	Experimentelle Untersuchungen und Simulationsergebnisse	83
5.1	Zeitliche Entwicklung des Hydratationsgrades	84
5.1.1	Wärmefreisetzung	85
5.1.1.1	Versuchsaufbau und Vorgehensweise	85
5.1.1.2	Versuchsauswertung und Ergebnisse	86
5.1.2	Chemisch gebundene Wassermenge	90
5.1.3	Vergleich der Messmethoden	92
5.2	Anpassung der Modellfreiwerte	93
5.2.1	Parameter zur Beschreibung der Ruhephase	94
5.2.2	Parameter zur Beschreibung der Modellprozesse	95
5.3	Chemisches Schwinden	98
5.4	Quecksilberdruckporosimetrie	101
5.4.1	Einschränkungen und Vorteile der Methode	101
5.4.2	Probenherstellung	103
5.4.3	Ergebnisse – Gesamtporosität	103
5.4.4	Ergebnisse – Porenradienverteilung	108
5.4.5	Hydratationsgradabhängige Beschreibung der MIP-Ergebnisse	112
6	Gemessene und berechnete Strukturen	121
6.1	Porositäten und Porenradienverteilung	122
6.1.1	Geometrische und fraktale Ansätze	123
6.1.2	Ansatz porositätsspezifischer Porenradienverteilungen	124
6.2	Virtuelle Quecksilberdruckporosimetrie	128
6.2.1	Methode und Vorgehensweise	129

6.2.2	Einfluss der Größe des RVE	131
6.3	Kombination der VMIP und des Ansatzes porositätsspezifischer RV . . .	135
6.3.1	Bestimmung des Einflusses der Flaschenhalsporen	135
6.3.2	Umsetzung der Transformation	137
6.3.3	Ergebnisse der Transformation	139
6.4	Übertragbarkeit der Transformation	143
7	Erweiterungen und Anwendungen	149
7.1	Versiegelte Lagerung	149
7.1.1	Ansatz	150
7.1.2	Modellierung und Berechnung des Hydratationsgrades	153
7.1.3	Ergebnisse	155
7.2	Struktur der Kontaktzone	162
8	Zusammenfassung und Ausblick	171
8.1	Zusammenfassung	171
8.2	Ausblick	174