

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung.....	1
2	Literaturüberblick.....	2
2.1	Hydratation des Portlandzements.....	2
2.2	Einfluss der Alkalien.....	5
2.2.1	Einfluss auf die C_3A -Hydratation.....	5
2.2.2	Einfluss auf die C_3S -Hydratation.....	6
2.2.3	Einfluss auf die Hydratationsprodukte.....	6
2.2.4	Einfluss auf die Morphologie des Ettringits.....	6
2.2.5	Sorption der Alkalien.....	6
2.3	Einfluss der Sulfatträger.....	7
2.3.1	Einfluss auf die Reaktionsprodukte des C_3A	7
2.3.2	Einfluss auf die Reaktionsrate des C_3A	7
2.3.3	Einfluss auf die C_3S -Hydratation.....	8
2.4	Ursache der dormanten Periode der Zementhydratation.....	8
2.5	Thermodynamische Berechnung.....	9
2.6	Kristallisation.....	11
2.6.1	Keimbildungsrate.....	11
2.6.2	Strukturmodell der Ettringitkristalle.....	12
2.6.3	Morphologie der Ettringitkristalle.....	12
2.7	Ansteifen, Erstarren und Erhärten.....	13
2.8	Beschleuniger.....	15
2.8.1	Erstarrungsbeschleuniger.....	15
2.8.2	Chemische Wirkung der Beschleuniger auf die Zementhydratation.....	16
2.9	Spritzbeton.....	17
2.9.1	Anforderungen an das Erstarren.....	17
2.9.2	Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung.....	18
2.10	Dauerhaftigkeit des Spritzbetons.....	19
2.10.1	Alkali-Kieselsäure-Reaktion.....	19
2.10.2	Sulfatwiderstand des Spritzbetons.....	19
3	Offene Fragen und Zielstellung der Arbeit.....	21
4	Ausgangsstoffe und Probenherstellung.....	23
4.1	Erstarrungsbeschleuniger.....	23
4.2	Synthetische Klinkerphasen.....	23
4.3	Portlandzementklinker.....	23
4.4	Sulfatträger.....	24
4.5	Laborzemente.....	24
4.6	Portlandzemente.....	24
4.7	Weißkalkhydrat.....	25
4.8	Herstellung des Zementleims.....	26
4.9	Herstellung des Mörtels.....	26
5	Untersuchungsmethoden.....	27
5.1	Bestimmung der Erstarrungszeit.....	27
5.2	Prüfung der Frühfestigkeit des Mörtels.....	28

5.3	Bestimmung der Hydratationswärmeentwicklung	29
5.4	Charakterisierung der Mikrostruktur	29
5.5	Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie	30
5.5.1	Probenvorbereitung.....	30
5.5.2	Bestimmung der C ₃ A-Modifikation.....	32
5.5.3	Quantitative Phasenanalyse: Rietveld-Verfeinerung	32
5.5.4	Halbquantitative Phasenanalyse	32
5.6	Phasenanalyse mittels kalorimetrischer Untersuchungen.....	33
5.7	Chemische Analyse der flüssigen Phase	34
5.8	Bestimmung der Lösungsfähigkeit der Sulfatträger.....	34
5.9	Bestimmung der spezifischen Oberfläche nach BET	35
5.10	Bestimmung des Hydratationsgrads	35
6	Frühe Hydratation ohne Beschleuniger	36
6.1	Bestimmung der C ₃ A-Reaktivität von Klinkern.....	36
6.2	Sulfatträger	37
6.2.1	Lösungsfähigkeit.....	37
6.2.2	Einfluss der Alkalien	37
6.2.3	Verbrauch der Sulfatträger im Zementleim/-stein	38
6.3	Einfluss der Sulfatträger auf die C ₃ A-Hydratation.....	39
6.4	Einfluss der Sulfatträger auf die C ₃ S-Hydratation	42
6.4.1	Synthetisches C ₃ S	42
6.4.2	C ₃ S im Zementklinker	42
6.5	Ettringit.....	45
6.5.1	Übersättigung und Keimbildung des Ettringits	45
6.5.2	Morphologie des Ettringits	47
6.6	Einfluss der Wärme während des Anfangsstadiums	54
6.7	Einfluss der C ₃ S-Hydratation auf die spätere C ₃ A-Hydratation.....	55
6.8	Schlussfolgerungen	56
7	Frühe Hydratation mit dem alkalihaltigen NaAl(OH)₄-Beschleuniger	58
7.1	Erstarren	58
7.2	Frühfestigkeit.....	58
7.3	Hydratationswärmeentwicklung mittels DCA	59
7.4	Hydratphasenentwicklung mittels ESEM-FEG.....	60
7.5	Phasenanalyse mittels XRD	64
7.5.1	Zement-Beschleuniger-System.....	64
7.5.2	Einfluss des Beschleunigers auf die Löslichkeit des Sulfatträgers.....	65
7.6	Quantitativer Phasennachweis mittels Rietveld-Verfeinerung.....	66
7.6.1	C ₃ A-Abbau	67
7.6.2	C ₃ S-Abbau	67
7.6.3	Ettringitbildung.....	68
7.6.4	Sonstige Phasen	68
7.7	Bestimmung von Portlandit mittels DTA/TG	69
7.8	Hydratationsgrad mittels chemisch gebundenem Wasser	69
7.9	Chemische Zusammensetzung der flüssigen Phase.....	69
7.10	Ursache des schnellen Erstarrens und der hohen Frühfestigkeit	71
7.11	Chemische Wirkung des NaAl(OH) ₄ -Beschleunigers.....	71
7.11.1	Verbrauchsrate des NaAl(OH) ₄ -Beschleunigers.....	71

7.11.2	C ₃ A-Hydratation.....	71
7.11.3	C ₃ S-Hydratation	71
7.11.4	Löslichkeit der Sulfatträger	72
7.11.5	Flüssige Phase des Zementleims/-steins.....	72
7.12	Modellierung der frühen Hydratation des Zement-NaAl(OH) ₄ -Beschleuniger-Systems	73
7.12.1	Hydratationsverlauf	73
7.12.2	Hydratphasenentwicklung	75
7.13	Potenzielle Probleme der Dauerhaftigkeit des Spritzbetons – AKR.....	77
7.14	Schlussfolgerungen	78
8	Frühe Hydratation mit dem alkalifreien Al₂(SO₄)₃-Beschleuniger.....	80
8.1	Erstarren	80
8.2	Frühfestigkeit	80
8.3	Hydratationswärmeentwicklung mittels DCA	81
8.3.1	Zement-Beschleuniger-System.....	81
8.3.2	Klinker-Beschleuniger-System und Laborzement-Beschleuniger-System	82
8.4	Hydratphasenentwicklung mittels ESEM-FEG.....	82
8.4.1	Zement-Beschleuniger-System.....	82
8.4.2	Klinker-Beschleuniger-System und Laborzement-Beschleuniger-System	83
8.4.3	Einfluss des Weißkalkhydrats	84
8.5	Spezifische Oberfläche nach BET.....	84
8.6	Phasenanalyse mittels XRD	85
8.7	Quantitativer Phasennachweis mittels Rietveld-Verfeinerung.....	86
8.7.1	C ₃ A-Abbau	86
8.7.2	C ₃ S-Abbau	87
8.7.3	Ettringitbildung.....	87
8.7.4	Einfluss der Sulfatträger	88
8.7.5	Einfluss des Weißkalkhydrats	88
8.8	Bestimmung von Portlandit mittels DTA/TG	89
8.9	Hydratationsgrad mittels chemisch gebundenem Wasser	89
8.10	Chemische Zusammensetzung der flüssigen Phase mittels ICP-OES	89
8.10.1	Zement-Beschleuniger-System.....	89
8.10.2	Klinker-Beschleuniger-System und Laborzement-Beschleuniger-System	91
8.10.3	Einfluss des Weißkalkhydrats	91
8.11	Ursache des schnellen Erstarrens und der hohen Frühfestigkeit.....	92
8.12	Chemische Wirkung des Al ₂ (SO ₄) ₃ -Beschleunigers	92
8.12.1	Löslichkeit des Al ₂ (SO ₄) ₃ -Beschleunigers im Zementleim	92
8.12.2	Chemische Reaktionen des Beschleunigers	93
8.12.3	Hydratation der Zementbestandteile.....	94
8.12.4	Flüssige Phase des Zementleims/-steins.....	94
8.13	Modellierung der frühen Hydratation des Zement-Al ₂ (SO ₄) ₃ -Beschleuniger-Systems	94
8.13.1	Hydratationsverlauf	94
8.13.2	Hydratphasenentwicklung	97
8.13.3	Einfluss der Sulfatträger auf die Wirksamkeit des Beschleunigers.....	99
8.13.4	Einfluss des Weißkalkhydrats auf die Wirksamkeit des Beschleunigers	100
8.14	Sulfatwiderstand des Spritzbetons	101
8.15	Schlussfolgerungen	102
9	Zusammenfassung und Ausblick	104
10	Literaturverzeichnis	108