

Kira Weise

Über das Potenzial von calciniertem Ton in zementgebundenen Systemen

Materialcharakterisierung und
Reaktionsverhalten



Springer Vieweg

Werkstoffe im Bauwesen | Construction and Building Materials

Reihe herausgegeben von
Eduardus A.B. Koenders, Darmstadt, Deutschland

Die Reihe dient der Darstellung der Forschungstätigkeiten am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (WiB) der Technischen Universität Darmstadt. Diese umfassen die aktuell relevanten Bereiche der Baustoffforschung im Spannungsfeld zwischen bauchemischen und bauphysikalischen Problemstellungen. Kernthemen sind die Herstellung, die Dauerhaftigkeit und die Umweltfreundlichkeit neuer Materialien. Die Reihe beschäftigt sich mit neuen wissenschaftlichen Fragestellungen, die den zentralen Anliegen unserer Generation entspringen, wie dem Bestreben nach einer Steigerung der Energieeffizienz, einer Wiederverwendung von Rohstoffen und der Reduzierung der CO₂-Emissionen. Die verfolgten wissenschaftlichen Lösungsansätze liegen auf einer experimentellen mikro- und meso-strukturellen Ebene, wobei die chemischen und physikalischen Zusammenhänge in fundamentalen Modellansätzen münden. Auf dieser Grundlage können hochwertige Innovationen erfolgen, die über einen multiskalaren Ansatz praktisch anwendbar werden.

With this series, the Institute of Construction and Building Materials of the Technical University of Darmstadt has the ambition to publish their current research results arising from synergetic effects among the following research directions: Building materials, building physics and building chemistry. Relevant key issues addressing the processing, durability, and environmental performance of our future materials will be reported. The series covers state-of-the-art progress originating from research questions that address urgent themes like energy efficiency, sustainable reuse of raw materials and reduction of CO₂ emissions. Advanced experimental facilities are used for studying structure-property relationships of building materials. Main objective is to develop cutting edge scientific solutions that comply with actual sustainability requirements. Mechanical-Chemical-Physical interrelationships are employed to develop advanced numerical methods for simulating material behaviour. Multi-scale modelling techniques are implemented to upscale results to a practical macro-scale level.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15577>

Kira Weise

Über das Potenzial von calciniertem Ton in zementgebundenen Systemen

Materialcharakterisierung und
Reaktionsverhalten

 Springer Vieweg

Fordere viel von dir selbst und erwarte wenig von anderen.
[Konfuzius]

Vorwort

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit entstand als Teil der grundlagenorientierten Forschung zur Reaktivität von Zusatzstoffen in zementgebundenen Systemen am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (WiB) der Technischen Universität Darmstadt. Sie ist zugleich die Abschlussarbeit meines Studiums zur Wirtschaftsingenieurin mit der technischen Fachrichtung Bauingenieurwesen. Diese Arbeit erfüllt für mich persönlich nicht nur den Zweck der Vollendung des Studiums, sondern ich sehe sie auch als Ausgangspunkt für meine zukünftige Zeit am Institut für Werkstoffe im Bauwesen.

Meine enge Verbundenheit zu diesem Institut basiert auf den letzten vier Jahren, in denen ich neben meinem Studium am WiB tätig war bzw. seit August als wissenschaftliche Mitarbeiterin beschäftigt bin. Da die vorliegende Arbeit in meinen Augen maßgeblich von dieser Zeit profitierte, möchte ich mich für die jahrelange Zusammenarbeit am Institut recht herzlich bedanken.

Mein Dank gilt in erster Linie Prof. Dr. ir. Eddie Koenders für die unzähligen Möglichkeiten, die Sie mir am Institut für Werkstoffe im Bauwesen zur Verfügung stellen und für das mir entgegengebrachte Vertrauen, welches mir diese Arbeit in der vorliegenden Form erst ermöglichte.

Weiterhin möchte ich mich ganz besonders bei meinem ehemaligen Kollegen Frank Röser für die gemeinsamen lehrreichen Jahre am Institut bedanken. Durch dich habe ich die Arbeit am Institut schätzen und lieben gelernt, was meinen weiteren Lebensweg erheblich prägt. Ein großes Dankeschön richtet sich auch an unsere Sekretärin Aysen Cevik. Dein liebenswertes Wesen, deine uneingeschränkte Hilfsbereitschaft und die unterhaltsamen Gespräche bereichern in erheblichem Maße das Arbeitsklima am Institut und tragen maßgeblich zu meinem persönlichen Wohlbefinden am Arbeitsplatz bei.

Außerdem danke ich meinen beiden Kollegen Oliver Vogt und Neven Ukrainczyk für die Betreuung der Arbeit, die produktiven fachlichen Diskussionen und dafür, dass ich mit meinen Fragen bei euch jederzeit herzlich willkommen bin. Einen großen Beitrag zu dem Gelingen der vorliegenden Arbeit leisteten außerdem Yvette Schales, Helga Janning und Conrad Ballschmiede durch die Unterstützung im Labor, insbesondere am Rasterelektronenmikroskop.

Mein Dank richtet sich selbstverständlich neben den fachlichen Aspekten auch an alle, die mich persönlich unterstützen. Ich möchte mich insbesondere bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken, die immer an meiner Seite ste-

hen. Danke für euer Verständnis, eure Unterstützung und den Rückhalt, den ihr mir permanent bietet.

Mein Dank richtet sich abschließend von ganzem Herzen an meine Eltern. Danke, dass ihr mich jederzeit auf meinem Weg begleitet und immer für mich da seid.

Kira Weise

Inhaltsübersicht

1	Einleitung.....	1
2	Calciniertes Ton.....	5
	2.1 Calciniierung.....	6
	2.2 Chemische und mineralogische Eigenschaften.....	10
	2.3 Puzzolanische Aktivität.....	14
	2.4 Stand der Forschung zum Reaktionsverhalten.....	25
3	Experimentelle Untersuchungen.....	33
	3.1 Forschungskonzept.....	33
	3.2 Materialien.....	37
	3.3 Probenvorbereitung.....	40
	3.4 Untersuchungsverfahren und Methoden.....	49
4	Reaktionsmodell zur Auswertung von TGA-Ergebnissen der R³-Proben.....	75
5	Untersuchungsergebnisse.....	83
	5.1 Analyse der Ausgangsstoffe.....	83
	5.2 Untersuchung der einzelnen Schichten des calcinierten Tons.....	88
	5.3 Untersuchung des Reaktionsverhaltens im klinkerfreien System.....	93
	5.4 Untersuchung des Reaktionsverhaltens im zementgebundenen System.....	105
6	Diskussion der Ergebnisse.....	125
	6.1 Untersuchung der einzelnen Schichten des calcinierten Tons.....	125
	6.2 Untersuchung des Reaktionsverhaltens im klinkerfreien System.....	128
	6.3 Untersuchung des Reaktionsverhaltens im zementgebundenen System.....	133
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	145
	Literaturverzeichnis.....	149
	Normen und Standards.....	153
	Anhang.....	155
	Ergänzende Tabellen.....	155
	Ergänzende Abbildungen.....	159

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Calciniertes Ton	5
2.1	Calcinierung	6
2.2	Chemische und mineralogische Eigenschaften	10
2.3	Puzzolanische Aktivität	14
2.3.1	Definition	14
2.3.2	Einflussfaktoren	16
2.3.3	Untersuchungsmethoden	17
2.3.3.1	Direkte Methoden	18
2.3.3.2	Indirekte Methoden	21
2.3.4	Weitere Methoden	22
2.3.4.1	Vergleich der unterschiedlichen Methoden	22
2.4	Stand der Forschung zum Reaktionsverhalten	25
2.4.1	Reaktionsverhalten im klinkerfreien System	26
2.4.2	Reaktionsverhalten im zementgebundenen System	30
3	Experimentelle Untersuchungen	33
3.1	Forschungskonzept	33
3.2	Materialien	37
3.2.1	Rohton (RT)	38
3.2.2	Ungemahlener calcinierter Ton (CTS)	39
3.2.3	Gemahlener calcinierter Ton (CT)	40
3.2.4	Portlandzement	40
3.3	Probenvorbereitung	40
3.3.1	Herstellung der pulverförmigen Ausgangsstoffe	40
3.3.2	Probenvorbereitung für Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop	42
3.3.3	Herstellung der Proben für den R ³ -Test	44
3.3.4	Herstellung der Proben für die Löslichkeitsuntersuchungen	45
3.3.5	Herstellung und Nachbehandlung der Zementleimproben	47
3.4	Untersuchungsverfahren und Methoden	49
3.4.1	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	49
3.4.1.1	Allgemeine Beschreibung des Untersuchungsverfahrens	49
3.4.1.2	Durchführung und Vorversuche zur Festlegung der Heizrate	50
3.4.1.3	Auswertung der Ergebnisse	55
3.4.2	Röntgendiffraktometrie (XRD)	65

3.4.2.1	Allgemeine Beschreibung des Untersuchungsverfahrens.....	65
3.4.2.2	Durchführung und Auswertung der Ergebnisse.....	65
3.4.3	Rasterelektronenmikroskop (SEM und EDX).....	67
3.4.3.1	Allgemeine Beschreibung des Untersuchungsverfahrens.....	67
3.4.3.2	Durchführung und Auswertung der Ergebnisse.....	67
3.4.4	Ionenlöslichkeit.....	68
3.4.5	R ³ -Test.....	68
3.4.5.1	Allgemeine Beschreibung des Untersuchungsverfahrens.....	68
3.4.5.2	Durchführung und Auswertung der Ergebnisse.....	69
3.4.6	Biegezug- und Druckfestigkeit.....	72
3.4.7	„Tunkversuch“.....	72
4	Reaktionsmodell zur Auswertung von TGA-Ergebnissen der R³-Proben.....	75
5	Untersuchungsergebnisse.....	83
5.1	Analyse der Ausgangsstoffe.....	83
5.1.1	TGA.....	83
5.1.2	XRD.....	86
5.2	Untersuchung der einzelnen Schichten des calcinierten Tons.....	88
5.3	Untersuchung des Reaktionsverhaltens im klinkerfreien System.....	93
5.3.1	Ionenlöslichkeit.....	93
5.3.2	R ³ -Test.....	96
5.3.3	TGA der Proben des R ³ -Tests.....	97
5.4	Untersuchung des Reaktionsverhaltens im zementgebundenen System.....	105
5.4.1	Zug- und Druckfestigkeit der Zementleimproben.....	105
5.4.2	TGA der Zementleimproben.....	109
5.4.3	„Tunkversuch“.....	118
6	Diskussion der Ergebnisse.....	125
6.1	Untersuchung der einzelnen Schichten des calcinierten Tons.....	125
6.2	Untersuchung des Reaktionsverhaltens im klinkerfreien System.....	128
6.3	Untersuchung des Reaktionsverhaltens im zementgebundenen System.....	133
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	145
	Literaturverzeichnis.....	149
	Normen und Standards.....	153
	Anhang.....	155
	Ergänzende Tabellen.....	155
	Ergänzende Abbildungen.....	159

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Darstellung eines Silicium-Tetraeders und eines Aluminium-Oktaeders.....	5
Abb. 2:	Kristallstruktur von Kaolinit.....	6
Abb. 3:	Chemische Zusammensetzung ausgewählter Tongemische.....	11
Abb. 4:	Chemische Zusammensetzung ausgewählter calcinierter Tone.....	12
Abb. 5:	Vergleich der chemischen Zusammensetzung eines Rohtons und calcinierten Tons aus Deutschland.....	13
Abb. 6:	Übersicht über ausgewählte Methoden zur Bestimmung der Puzzolanität.....	18
Abb. 7:	Zuordnung ausgewählter Testverfahren zu verschiedenen Phasen der puzzolanischen Aktivität.....	25
Abb. 8:	Calciumhydroxidkonsum ausgewählter calcinierter Tone über die Zeit.....	29
Abb. 9:	Grafische Darstellung des Forschungskonzepts.....	34
Abb. 10:	Prozesskette vom Rohton (RT) über den calcinierten Ton als Stück (CTS) zum gemahlene calcinierten Ton (CT).....	37
Abb. 11:	Darstellung der Probenbezeichnungen des ungemahlene calcinierten Tons.....	38
Abb. 12:	Partikelgrößenverteilungen der Ausgangsstoffe RT, CTS und CT.....	42
Abb. 13:	Probenvorbereitung für Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop.....	43
Abb. 14:	Herstellung der alkalischen Emulsion für den R ³ -Test.....	45
Abb. 15:	Probenvorbereitung für den R ³ -Test.....	45
Abb. 16:	Herstellung der gesättigten Calciumhydroxidlösung.....	46
Abb. 17:	Herstellung der Proben für die Löslichkeitsuntersuchungen.....	47
Abb. 18:	Herstellung der Zementleimproben.....	48
Abb. 19:	Nachbehandlung der Zementleimproben.....	49
Abb. 20:	TGA-Gerät geöffnet (links).....	51
Abb. 21:	TGA-Gerät Tiegel (rechts).....	51
Abb. 22:	Lineare Regressionen der charakteristischen Temperatur (RT).....	53
Abb. 23:	Lineare Regressionen der charakteristischen Temperatur (CT).....	53
Abb. 24:	DTG-Kurve des Rohtons (RT) bei verschiedenen Heizraten.....	54
Abb. 25:	Vergleich der TG-Kurven (links) von drei Messungen (RT).....	55
Abb. 26:	Vergleich der DTG-Kurven (rechts) von drei Messungen (RT).....	55

Abb. 27:	Vergleich der stufenweisen Methode und der Tangentenmethode....	59
Abb. 28:	Darstellung der Normierung auf 100 g Bindemittel ($t=0$).....	61
Abb. 29:	Darstellung der Basislinie für die Peakanalyse.....	63
Abb. 30:	Messdaten DTG normiert auf die Basislinie.....	63
Abb. 31:	Peakanalyse exemplarisch (Referenz Zementleim, 1 Tag).....	64
Abb. 32:	XRD-Gerät geschlossen.....	66
Abb. 33:	XRD-Gerät geöffnet.....	66
Abb. 34:	Probe im XRD-Gerät.....	66
Abb. 35:	Standard-Probenhalter.....	66
Abb. 36:	Rasterelektronenmikroskop.....	68
Abb. 37:	Probekörper auf der Halterung im Rasterelektronenmikroskop.....	68
Abb. 38:	Durchführung des R^3 -Tests und Entnahme der pulverförmigen Proben (TGA).....	71
Abb. 39:	Durchführung der Biegezug- und Druckversuche nach 28 Tagen....	72
Abb. 40:	Vorbereitung des Probekörpers für den „Tunkversuch“.....	73
Abb. 41:	Reaktionsmodell der R^3 -Proben mit Aceton Nachbehandlung.....	78
Abb. 42:	Reaktionsmodell der R^3 -Proben mit Ofentrocknung bei 105 °C.....	79
Abb. 43:	TGA-Ergebnis Portlandzement CEM I 52.5N.....	84
Abb. 44:	TGA-Ergebnisse Rohton (RT), ungemahlener calcinierter Ton (CTS) und calcinierter Ton (CT).....	84
Abb. 45:	TGA-Ergebnisse ungemahlener calcinierter Ton (CTS), innere Schicht von CTS (CTSI) und äußere Schicht von CTS (CTSA).....	86
Abb. 46:	BSE-Aufnahme der äußeren Schicht und weiter innen liegenden Bereichen.....	89
Abb. 47:	Elementanalyse Mapping.....	89
Abb. 48:	BSE-Aufnahme eisenhaltiger Bereich (CTSI).....	91
Abb. 49:	BSE-Aufnahme Bereich 1 (CTSA).....	91
Abb. 50:	BSE-Aufnahme Bereich 2 (CTSA).....	92
Abb. 51:	Ionenlöslichkeit RT.....	93
Abb. 52:	Ionenlöslichkeit CTS.....	93
Abb. 53:	Ionenlöslichkeit CTSI.....	94
Abb. 54:	Ionenlöslichkeit CTSA.....	94
Abb. 55:	Ionenlöslichkeit CT.....	94
Abb. 56:	Ionenlöslichkeit Ca.....	94
Abb. 57:	Ionenlöslichkeit Si.....	94
Abb. 58:	Ionenlöslichkeit Al.....	94
Abb. 59:	Ergebnisse des R^3 -Tests im Zeitverlauf.....	97
Abb. 60:	Vergleich des CGW- R^3 nach sieben Tagen (R^3 -Test und TGA).....	99

Abb. 61:	TGA-Ergebnis R ³ -Probe mit RT nach sieben Tagen.....	100
Abb. 62:	TGA-Ergebnis R ³ -Probe mit CTS nach sieben Tagen.....	100
Abb. 63:	TGA-Ergebnis R ³ -Probe mit CT nach sieben Tagen.....	101
Abb. 64:	Vergleich des CGW ermittelt mit R ³ -Test (CGW-R ³) und über TGA-Ergebnisse (CGW) normiert auf 100 g Zusatzstoff.....	102
Abb. 65:	Konsum Calciumhydroxid nach 7 Tagen (TGA).....	104
Abb. 66:	TGA-Ergebnisse der Referenzprobe (R ³ -Test) ohne Zusatzstoff (Trocknung 105 °C).....	105
Abb. 67:	Druckfestigkeit RT.....	106
Abb. 68:	Druckfestigkeit CT.....	106
Abb. 69:	Druckfestigkeiten bezogen auf 100 M.-% Zement.....	107
Abb. 70:	Zugfestigkeit RT.....	108
Abb. 71:	Zugfestigkeit CT.....	108
Abb. 72:	„Setzfließmaß“ RT.....	109
Abb. 73:	„Setzfließmaß“ CT.....	109
Abb. 74:	TG- und DTG-Kurven der Zementleimproben mit CT nach 28 Tagen.....	109
Abb. 75:	TG- und DTG-Kurven der Zementleimproben mit RT nach 28 Tagen.....	110
Abb. 76:	Calciumhydroxidgehalt der Zementleimproben im Zeitverlauf.....	110
Abb. 77:	Calciumhydroxidgehalt bezogen auf 100 M.-% Zement.....	111
Abb. 78:	Konsum Calciumhydroxid im Zeitverlauf.....	112
Abb. 79:	Chemisch gebundenes Wasser der Zementleimproben im Zeitverlauf.....	113
Abb. 80:	Chemisch gebundenes Wasser bezogen auf 100 M.-% Zement.....	113
Abb. 81:	Peakanalyse exemplarisch (Referenz Zementleim, 1 Tag).....	115
Abb. 82:	CSH- und Aft-Phasen der Zementleimproben (Peak I + III).....	116
Abb. 83:	CSH- und Aft-Phasen bezogen auf 100 M.-% Zement (Peak I + III).....	116
Abb. 84:	CAH-, CASH- und AFm-Phasen der Zementleimproben (Peak II).....	118
Abb. 85:	CAH-, CASH- und AFm-Phasen bezogen auf 100 M.-% Zement (Peak II).....	118
Abb. 86:	BSE-Aufnahme der Übergangszone der unbearbeiteten Außenkante CTSA (links, oben) und Zementleim (rechts, unten).....	119
Abb. 87:	BSE-Aufnahme der Übergangszone der unbearbeiteten Außenkante CTSA (links) und Zementleim (rechts).....	120
Abb. 88:	BSE-Aufnahme zur Übersicht der Übergangszonen von CTS und Zementleim.....	121

Abb. 89: BSE-Aufnahme der Übergangszone CTSA (links) und Zementleim (rechts).....	123
Abb. 90: Mapping der Übergangszone CTSA (links) und Zementleim (rechts).....	123
Abb. 91: BSE-Aufnahme der Übergangszone CTSI (links) und Zementleim (rechts).....	124
Abb. 92: Mapping der Übergangszone CTSI (links) und Zementleim (rechts).....	124
Abb. 93: XRD der inneren (CTSI) und äußeren Schicht (CTSA) sowie die charakteristischen Signale von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	127
Abb. 94: Zusammenhang des CGW-R ³ und dem Calciumhydroxidkonsum (TGA).....	130
Abb. 95: XRD der R ³ -Proben mit RT und CT nach sieben Tagen (Acetonnachbehandlung) sowie die charakteristischen Signale von Ettringit.....	133
Abb. 96: Zusammenhang der Druckfestigkeit nach 28 Tagen am Zementleim und dem Calciumhydroxidkonsum nach 7 Tagen (TGA mit R ³ -Proben).....	138
Abb. 97: Zusammenhang der Druckfestigkeit nach 28 Tagen und dem chemisch gebundenen Wassers im Zementleim (TGA).....	139
Abb. 98: Zusammenhang der Differenz des CGW zur Referenzprobe und dem Calciumhydroxidkonsum im Zementleim (TGA).....	140
Abb. 99: Zusammenhang des CGW-R ³ nach sieben Tagen und der Druckfestigkeit an Zementleimproben nach 28 Tagen.....	142
Abb. 100: Zusammenhang des CGW-R ³ und dem Calciumhydroxidkonsum von Zementleimproben nach sieben Tagen.....	143
Abb. 101: DTG-Kurve des calcinierten Tons (CT) bei verschiedenen Heizraten [%/°C].....	159
Abb. 102: Zusammenhang des CGW-R ³ und dem Calciumhydroxidkonsum (TGA) - vollständig.....	159
Abb. 103: XRD der inneren (CTSI) und äußeren Schicht (CTSA) sowie die charakteristischen Signale von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) - vollständig. .	160
Abb. 104: XRD der R ³ -Proben mit RT und CT nach sieben Tagen (Acetonnachbehandlung) sowie die charakteristischen Signale von Ettringit - vollständig.....	160

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Calciniertemperaturen ausgewählter Literatur (Labor).....	7
Tab. 2:	Ausgewählte „optimale“ Calciniertemperaturen (Labor).....	8
Tab. 3:	Mineralogische Zusammensetzung ausgewählter Tongemische.....	12
Tab. 4:	Vergleich der mineralogischen Zusammensetzung vor und nach der Calciniierung eines deutschen Tons.....	14
Tab. 5:	Testverfahren zur puzzolanischen Aktivität anhand ausgewählter Literatur.....	27
Tab. 6:	Tabellarische Darstellung des Forschungskonzepts.....	35
Tab. 7:	Übersicht über die Abkürzungen der verwendeten Materialien.....	35
Tab. 8:	Chemische Zusammensetzung des Rohtons [M.-%]	39
Tab. 9:	Mineralogische Zusammensetzung des Rohtons und des calcinierten Tons	39
Tab. 10:	Chemische Zusammensetzung des calcinierten Tons [M.-%].....	40
Tab. 11:	Chemische Zusammensetzung des Portlandzementes [M.-%].....	40
Tab. 12:	Spezifische Oberflächen der Ausgangsstoffe RT, CTS und CT.....	41
Tab. 13:	Programm für das Polieren der Probekörper.....	44
Tab. 14:	Zusammensetzung von 100 g Emulsion für den R ³ -Test („R ³ -Emulsion“).....	45
Tab. 15:	Übersicht über die in der Literatur verwendeten Heizraten (TGA).....	52
Tab. 16:	Temperaturprogramm für die thermogravimetrische Analyse.....	55
Tab. 17:	Zuordnung ausgewählter Stoffe zu charakteristischen Temperaturbereichen in thermischen Analysen (1/2).....	56
Tab. 18:	Zuordnung ausgewählter Stoffe zu charakteristischen Temperaturbereichen in thermischen Analysen (2/3).....	57
Tab. 19:	Zuordnung ausgewählter Stoffe zu charakteristischen Temperaturbereichen in thermischen Analysen (3/3).....	58
Tab. 20:	Röntgenamorpher Anteil der untersuchten Ausgangsstoffe.....	87
Tab. 21:	Übersicht über die mittels EDX-Punktanalyse ermittelten Elemente (Schichten).....	92
Tab. 22:	Übersicht über die mittels EDX-Punktanalyse ermittelten Elemente.....	120
Tab. 23:	Übersicht über die Abkürzungen der Materialien in Li et al. 2018.	130
Tab. 24:	Konsum Calciumhydroxid bezogen auf das chemisch gebundene Wasser (TGA).....	132

Tab. 25:	Übersicht über die chemische Zusammensetzung ausgewählter Tongemische (1/2).....	155
Tab. 26:	Übersicht über die chemische Zusammensetzung ausgewählter Tongemische (2/2).....	156
Tab. 27:	Gemessene pH-Werte der Proben zur Bestimmung der Ionenlöslichkeit.....	156
Tab. 28:	Ergebnisse der Versuche zur Ionenlöslichkeit.....	157
Tab. 29:	Chemisch gebundenes Wasser aus R ³ -Test.....	158
Tab. 30:	Vergleich der Ergebnisse des CGW-R ³ (R ³ -Test und TGA).....	158

Abkürzungsverzeichnis

A	Al_2O_3	Aluminiumoxid
C	CaO	Calciumoxid
CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Calciumhydroxid
H	H_2O	Wasser
S	SiO_2	Siliciumdioxid

CGW Chemisch gebundenes Wasser

CGW-R³ Chemisch gebundenes Wasser ermittelt über den R³-Test

$m_{x^\circ\text{C}}$ Masse bei x °C in thermogravimetrischen Analysen [M.-%]

$m_{x^\circ\text{C}}^*$ Angepasste Masse bei x °C in thermogravimetrischen Analysen (TGA) [M.-%]

$MV_{x^\circ\text{C}-y^\circ\text{C}}$ Massenverlust zwischen x °C und y °C in TGA [M.-%]

RT Raumtemperatur