

Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel bei gleichbleibender Druckfestigkeit

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der
Naturwissenschaftlichen Fakultät III
(Agrar-, Geowissenschaften, Mathematik und Informatik)
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Sebastian Schmidt
geb. am 22.08.1984 in Nürnberg

Gutachter:

1. Prof. Dr. Dr. Herbert Pöllmann
2. Prof. Dr. Bernhard Middendorf

Nürnberg, 11. Mai 2018
Tag der Verteidigung: 22. Januar 2019

Fortes fortuna adiuvat

*für Tini
und meine lieben Eltern*

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Nomenklatur.....	III
Zusammenfassung.....	IV
1 Einleitung.....	1
1.1 Die Entwicklung des Dünnbettmörtel-Verfahrens.....	2
1.2 Aufgabenstellung.....	5
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Zusammensetzung von Mörtel.....	6
2.2 Arten von Mörtel.....	7
2.3 Herstellung von Mörtel.....	8
2.4 Mauermörtel.....	8
2.4.1 Arten von Mauermörtel.....	9
2.4.2 Anforderungen an Mauermörtel.....	10
2.5 Zement.....	12
2.5.1 Normung und Nomenklatur.....	12
2.5.2 Zementherstellung.....	13
2.5.3 Zusammensetzung und Eigenschaften von Zement.....	15
2.5.4 Hauptklinkerphasen des Portlandzements.....	16
2.5.5 Calciumsulfat.....	22
2.5.6 Zuschlagstoffe.....	23
2.5.7 Zementhydratation.....	24
2.5.8 Zementstein- und Mörtel­eigenschaften.....	42
2.5.9 Wärmeübertragung.....	47
3 Experimentelle Methoden.....	54
3.1 Gesamt-Probenauswahl.....	54
3.2 Zusatzstoff-Screening ohne Stoffraumrechnung (Vorversuche).....	55
3.3 Methoden zur Charakterisierung der Ausgangsmaterialien.....	56
3.3.1 Auflichtmikroskopie.....	56
3.3.2 Korngrößenanalyse.....	57
3.3.3 Bestimmung der Dichte.....	57
3.3.4 Bestimmung der spezifischen Oberfläche nach BET.....	57
3.3.5 Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF).....	58
3.3.6 Röntgendiffraktometrie (XRD).....	58
3.3.7 Porenanalyse von Pulverproben durch Quecksilberporosimetrie.....	60
3.3.8 Wassersorptionsvermögen.....	61
3.4 Probenherstellung.....	61
3.4.1 Grundlagen der Stoffraumrechnung.....	62
3.5 Untersuchungen am abgebundenen Dünnbettmörtel.....	65
3.5.1 Werkstofftechnische Parameter.....	65
3.5.2 Porenanalyse.....	67
3.5.3 Röntgendiffraktometrie (XRD).....	68
3.5.4 Thermische Analyse zur Quantifizierung des Portlandit-Abbaus.....	69
3.5.5 Rasterelektronenmikroskopie (REM).....	71

3.6	Untersuchungen der Zementhydratation	71
3.6.1	Isotherme Wärmeflusskalorimetrie	71
3.6.2	Messung der Erstarrungszeiten (Beginn und Ende)	71
3.7	Finite-Elemente Berechnungen unterschiedlicher Wandaufbauten	72
3.8	Putzmörtel	72
4	Ergebnisse	73
4.1	Zusatzstoff-Screening ohne Stoffraumrechnung (Vorversuche)	73
4.2	Charakterisierung der Ausgangsmaterialien	77
4.2.1	Korngrößenanalysen, Feststoffdichten und BET-Oberflächen.....	77
4.2.2	Röntgenfluoreszenzanalysen (XRF)	79
4.2.3	Röntgendiffraktometrie (XRD)	81
4.2.4	Porenanalyse von Pulverproben durch Quecksilberporosimetrie	83
4.2.5	Wassersorptionsvermögen.....	85
4.3	Zusatzstoff-Screening mit Stoffraumrechnung	85
4.4	Untersuchungen am abgebundenen Dünnbettmörtel	86
4.4.1	Zusatzstoff-Screening mit Stoffraumrechnung – Teil I	86
4.4.2	Zusatzstoff-Screening mit Stoffraumrechnung – Teil II	103
4.4.3	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	129
4.5	Untersuchungen der Zementhydratation	134
4.5.1	Isotherme Wärmeflusskalorimetrie	134
4.5.2	Messung der Erstarrungszeiten	137
4.6	Finite-Elemente Berechnungen unterschiedlicher Wandaufbauten	138
4.7	Anwendung der Ergebnisse auf einen Sockelputz.....	141
5	Zusammenfassung.....	142
6	Literaturverzeichnis..	149
6.1	Literatur.....	149
6.2	Normen.....	162
6.2.1	DIN-Normen.....	162
6.2.2	ISO-Normen.....	165
7	Anhang.....	166
7.1	Bilderverzeichnis	166
7.2	Tabellenverzeichnis.....	170
7.3	Formeln.....	172
7.4	Ergebnisse.....	173
	Danksagung.....	236
	Erklärung.....	238
	Lebenslauf.....	239

Abkürzungen und Nomenklatur

a. u.	Ab usu / wie üblich
BET	Brunauer-Emmett-Teller
BLAINE	Verfahren zur Messung der spezifischen Oberfläche nach BLAINE
CE-Kennzeichnung	CE = Conformité Européenne = Europäische Konformität
DFT	Density functional theory
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DTG	Differentielle Thermogravimetrie
E-Modul	Elastizitäts-Modul
FEM	Finite-Elemente-Methode
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
ISO	International Organization for Standardization
GV	Glühverlust
NMR	Kernspinresonanzspektroskopie
p. a.	Pro analysis / für Analysenzwecke
PE	Polyethylen
PZ	Portlandzement
REM	Rasterelektronenmikroskopie / Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur
TG	Thermogravimetrie
Ü-Zeichen	Übereinstimmungszeichen
w/z oder w/z-Wert	Wasser-Zement-Verhältnis
w/m-Verhältnis	Wasser-Mörtel-Verhältnis
XRD	X-ray diffraction / Röntgenbeugung / Röntgendiffraktometrie
XRF	X-ray fluorescence / Röntgenfluoreszenz
Zementchemische Kurzschreibweise	Kap. 2.5.1 (Tab. 4)
Zementbestandteile	Kap. 2.5.3 (Tab. 5)
Hydratationsprodukte	Kap. 2.5.7.2 (Tab. 9)

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zur Minderung der Wärmeleitfähigkeit eines Dünnbettmörtels bei gleichbleibender Druckfestigkeit durchgeführt. Aus einer Marktanalyse ging hervor, dass für diese Mörtelkategorie bereits seit vielen Jahren die Wärmeleitfähigkeit der Produkte bei $\lambda_{10, tr.} = 0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ stagniert. Das Hauptziel dieser Arbeit bestand deshalb darin, die Wärmeleitfähigkeit so weit wie möglich abzusenken, jedoch stets unter Einhaltung der Druckfestigkeitsklasse M 10 ($\beta_D \geq 10,0 \text{ MPa}$ nach 28 Tagen). Dieser Effekt wird durch die Dosierung spezieller Zusatzstoffe bewirkt.

Durch Zugabe von pyrogener Kieselsäure konnte die Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtels von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ auf $0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ um fast 29 % gemindert werden. Dieser erfüllt die Anforderungen der Druckfestigkeitsklasse M 10. Es handelt sich hierbei um einen höchstwärmedämmenden Dünnbettmörtel, der in seiner Art neu ist. Aus den Untersuchungen ging eine deutsche Patentanmeldung hervor (Schmidt, et al., 2017). Mit der Durchführung Finiter-Elemente Berechnungen (FEM) erfolgte eine Übertragung der Ergebnisse auf eine ganze Wand. Monolithisch aufgebaute Wände, die mit einem entsprechend modifizierten Dünnbettmörtel errichtet werden, zeichnen sich durch eine verbesserte Wärmedämmung zwischen 1,0 bis 1,7 % aus. Wird der Effekt auf eine Wand mit Dickbettmörtel-Fugen übertragen, resultiert eine Verbesserung der Wärmedämmung der Wand zwischen 3,2 bis 5,2 %.

Die Minderung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtels resultiert aus einer Zunahme des Porenvolumens um 626 % im Bereich der Mesoporen zwischen 50 bis 2 nm. In diesem Porengrößen-Bereich liegt die Knudsen-Diffusion vor, wobei die mittlere freie Weglänge der Moleküle sehr groß gegenüber dem Porenradius ist. Die gleichzeitige Einhaltung der Druckfestigkeitsklasse lässt sich auf eine puzzolanische Reaktion zurückführen. Dabei löst die reaktionsfähige pyrogene Kieselsäure im Verlauf der Zementhydratation die als „Portlandit-Abbau“ bekannte Reaktion zwischen dem Calciumhydroxid und Siliziumdioxid aus. Hieraus resultiert die Bildung zusätzlicher, erhärtungsfähiger Verbindungen (C-S-H-Phasen). Mit Hilfe von röntgenographischen Untersuchungen wurde nach einer Abbindezeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen ein deutlicher Portlandit-Abbau im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe festgestellt. Durch thermogravimetrische Messungen wurde ein Portlandit-Abbau zwi-

schen 22 bis 37 % im Vergleich mit der Nullprobe nachgewiesen. Durch Zugabe von pyrogener Kieselsäure wird der Erstarrungsbeginn der Dünnbettmörtel-Mischung um 9 Stunden beschleunigt, jedoch die gesamte Abbindezeit nur um 30 Minuten verkürzt. Aus den Untersuchungen geht außerdem hervor, dass durch Zugabe von expandiertem Perlit eine Druckfestigkeitssteigerung um 99 % erfolgt. Dieser Effekt ist nicht auf die starke puzzolanische Reaktion mit Portlandit-Abbau zurückzuführen, sondern auf ein vergleichsweise niedrigeres Wasser-Mörtel-Verhältnis sowie den sogenannten „Füller-Effekt“. Die Berechnung der Porenvolumen-Verhältnisse aus Mesoporen-Volumina kleiner 50 nm und den Poren-Volumina im Bereich zwischen 1000 bis 100 nm führt zu der Erkenntnis: je höher das Porenvolumen-Verhältnis, desto erfolgreicher kann die Wärmeleitfähigkeit abgesenkt werden.

Um das Abbindeverhalten modifizierter Dünnbettmörtel-Proben genauer zu verstehen, wurde die Hydratation des Dünnbettmörtels sowohl in Laborluft-Atmosphäre, als auch unter CO₂-Ausschluss in Abhängigkeit von der Zeit untersucht. Im Falle der Hydratation unter CO₂-Ausschluss wurden die Dünnbettmörtel-Proben in einem evakuierten Exsikkator in Stickstoff-Atmosphäre gelagert. Der Portlandit-Abbau erfolgt unter CO₂-Ausschluss vergleichsweise sehr viel stärker als an Luft. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass unter CO₂-Ausschluss und einer relativen Luftfeuchtigkeit von annähernd 100 % im Exsikkator, eine vollständige Hydratation sowie ungestörte puzzolanische Reaktion der pyrogenen Kieselsäure mit Calciumhydroxid abläuft. In Laborluft-Atmosphäre und einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 60 % erfolgt eine unvollständige Hydratation bzw. gestörte puzzolanische Reaktion durch Carbonatisierung des Portlandits als Parallelreaktion. Diese verläuft für alle Dünnbettmörtel-Proben unter CO₂-Ausschluss vergleichsweise schwach sowie zeitlich abnehmend. An Laborluft-Atmosphäre zeigt sich das genaue Gegenteil, nämlich eine vergleichsweise erhöhte Carbonatbildung in Abhängigkeit von der Zeit.

Die Minderung der Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Druckfestigkeit durch Zugabe von pyrogener Kieselsäure lässt sich außerdem auf ein Putzmörtel-System übertragen, wobei die gleichen Zusammenhänge gelten.

1 Einleitung

Für das Aufmauern plangeschliffener, monolithischer Wandbaustoffe wie z. B. Ziegelsteine, aber auch für Ytong-, Bims-, Blähton- und Kalksandsteine werden u. a. Dünnbettmörtel auf Zementbasis eingesetzt (Schubert, et al., 2005a & 2005b). Die werkstofftechnischen Parameter sind dabei in der DIN 1053 und DIN EN 998-2 bzw. in der deutschen Anwendungsnorm DIN V 20000-412 geregelt, wobei für die Druckfestigkeitsklasse M 10 gemäß DIN V 18580 nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen ein Wert von $\beta_D \geq 10,0$ MPa nach DIN EN 1015-11 einzuhalten ist. Aus einer Marktanalyse geht hervor, dass für diese Mörtelkategorie bereits seit vielen Jahren die Wärmeleitfähigkeit der Produkte bei $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) stagniert (Schmidt, 2012; Schmidt, et al., 2013). Die heute eingesetzten hochwärmedämmenden Wandbaustoffe zeichnen sich jedoch durch teilweise drastisch niedrigere äquivalente Wärmeleitfähigkeiten aus. So weisen bspw. hochwärmedämmende Blähton-Mauersteine oder Planziegel äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von nur $\lambda_{\text{äquiv.}} = 0,07$ W/(m·K) auf. Aus dem Wertevergleich geht hervor, dass die Mörtelfuge, selbst wenn diese als Dünnbett-Mörtelfuge ausgeführt wird, als Kältebrücke in einem Wandsystem fungiert.



Bild 1: Aufbringen von Dünnbettmörtel auf eine Planziegel-Mauer mithilfe eines Mörtelschlittens (links) (© Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co., 2012); Vermauern von Planziegeln mit Dünnbettmörtel (rechts) (Archiv Schmidt, 2012)

1.1 Die Entwicklung des Dünnbettmörtel-Verfahrens

Nach (Neroth, et al., 2011a) sind Dünnbettmörtel spezielle Mauermörtel, die zur Vermauerung von Plansteinen mit sehr geringen Maßabweichungen ($\leq 1,0$ mm) in der Steinhöhe dienen. Die resultierenden Fugen haben dabei lediglich eine Materialhöhe von 1 bis 3 mm. Das Aufbringen dieses Dünnbettmörtels erfolgt üblicherweise mit einem Mörtelschlitten (Bild 1). Durch die Anwendung von Dünnbettmörtel ist es möglich, den Fugenanteil im Mauerwerk vergleichsweise gering zu halten. Durch das Dünnbettmörtel-Verfahren und die Maßhaltigkeit der Plansteine mit ebenen und planparallelen Lagerflächen sowie der hohen Verbundfestigkeit zwischen Stein und Mörtel, ist die gesamte Mauerwerksfestigkeit deutlich höher als bei der Verwendung anderer Mörtelarten. Dünnbettmörtel sind daher besonders vorteilhaft, wenn es um die Errichtung von hochbelastetem sowie wärmedämmendem Mauerwerk geht.

Da es sich beim Errichten eines Mauerwerks um eine sehr arbeitsintensive Tätigkeit handelt, wurde Anfang der Achtzigerjahre in Europa das zeit- und kostensparende Dünnbettmörtel-Verfahren entwickelt (Thamboo, et al., 2011). Voraussetzung hierfür war jedoch stets die Verwendung von Plansteinen nach DIN V 105-6 (Schubert, et al., 2006). Der Anteil an Dünnbettmörtel-Mauerwerk hat seither stetig zugenommen. Deutschlandweit belief sich der gesamte Zementverbrauch im Jahr 2013 auf etwa 26,5 Mio. Tonnen; 5,2 % davon wurden für die Herstellung von Mörteln, Putzen und Estrichen verwendet. Der Zementverbrauch für Mauermörtel beträgt jährlich etwa 0,2 Mio. Tonnen (VDZ, 2014). In der Zwischenzeit hat sich das Dünnbettmörtel-Mauerwerk in der Praxis zunehmend bewährt. In Bezug auf die Verarbeitung von Plansteinen wurden bis in das Jahr 1998 ausschließlich Dünnbettmörtel eingesetzt, die in ihrer Zusammensetzung der DIN 1053-1 entsprachen. Laut dieser Norm ist die Lagerfugendicke auf eine Stärke von 1 bis 3 mm festgelegt. Im Falle von schweren Mauersteinen oder durch Inhomogenitäten in der Lagerfläche, konnte die Verarbeitung von Dünnbettmörteln in der Praxis dazu führen, dass die Höhe der Lagerfugen im fertigen Mauerwerk teilweise unter 1 mm betrug (seitliches „Herausdrücken“ des Dünnbett-Frischmörtels). Von der Mörtelindustrie wurde daher ein Dünnbettmörtel mit „Stützkorn“ entwickelt, welcher bei allen Mauersteinarten eine Lagerfugenhöhe von etwa 2 mm gewährleistet (Kasten, 2001; Simon, et al., 2006). In weiteren Entwicklungen (Groppweis, et al., 2005) wird eine Planziegel-deckelnde Dünnbettmörtel-Auftragsschicht sowie von (Wachter, et al., 1997) ein Verfahren zur Erstellung eines Mauerwerks aus Planziegeln und die Zusammensetzung eines Mörtels beschrieben.

Darüber hinaus wird ein Trockenmörtel zur Herstellung von Frischmörtel beschrieben, der zur deckelnden Dünnbettvermörtelung von Hochlochplanziegeln (Groppweis, et al., 2008) eingesetzt wird sowie ein Dünnbettmörtel und dessen Verwendung (Zeh, et al., 2011 & 2012) beschrieben. Der Begriff „deckelnd“ bedeutet, dass der Dünnbettmörtel mit einem Mörtelschlitten als geschlossene Mörtelschicht („Deckel“) aufgetragen wird (Bild 1). Der „Mörteldeckel“ verbleibt dabei in ausreichender Schichtstärke auch nach dem Aufsetzen der Planziegel (Schubert, et al., 2006). Von (Thamboo, et al., 2016) wurde eine Vergleichsstudie bezüglich dem Druckfestigkeitsverhalten von Dünnbettmörtel-Mauerwerk und herkömmlichem Mauerwerk erstellt. Dieser kann entnommen werden, dass Dünnbettmörtel-Mauerwerk aufgrund des geringeren Verhältnisses von Fugenhöhe zu Steinhöhe, eine um etwa 6 % höhere Druckfestigkeit als herkömmliches Mauerwerk mit einer Dickbettfuge von 10 bis 12 mm bei gleicher Steinhöhe aufweist. Neben der Einführung des Dünnbettmörtel-Verfahrens wurde außerdem eine neuartige Mauerwerkskonstruktion entwickelt, die auf der Verklebung von Planziegeln mit einem Einkomponenten-Polyurethankleber basiert (Jäger, et al., 2011). Der Polyurethanschäum wird dabei direkt auf die Lagerfugen der Planziegel appliziert und stellt nach der Erhärtung eine dauerhafte und feste Verbindung her. Im Vergleich zu Dünnbettmörtel-Fugen können dadurch, wegen der Schaumstruktur des Klebers, niedrigere Wärmeleitfähigkeiten erzielt werden. Im Falle der Fugen-Druckfestigkeit jedoch, liegt diese deutlich unter dem Wert einer Dünnbettmörtel-Fuge. Darüber hinaus können Polyurethane Allergien beim Menschen auslösen und stehen sogar im Verdacht kanzerogen zu sein. Außerdem sind sie brennbar.

Eine aktuelle Entwicklung im Bereich der Dünnbettmörtel wird von (Brameshuber, et al., 2014) beschrieben. Dabei handelt es sich um ein neuartiges Mörtelsystem - das sog. „Mörtelband“ oder auch als „Mörtelpad“ bezeichnet, welches im Jahr 2015 auf dem Markt eingeführt wurde (Ziegelindustrie International, 2016). Dieses Produkt (Bild 2) wird im trockenen Zustand auf die Lagerfugenflächen von Plansteinen aufgelegt und im Anschluss mit einer festgelegten Menge Wasser aktiviert. Die Mörtelpads bestehen aus einem Gewebe aus Glasfasern und Trockenmörtel, welches durch einen wasserlöslichen Kleber zusammengehalten wird (Scharfe, et al., 2015). Darüber hinaus erfüllen die Mörtelpads laut Herstellerangabe (Franken Maxit, 2015) die Druckfestigkeitsklasse M 10 und zeigen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K).



Bild 2: Im Jahr 2015 wurde das Mörtelpad von der Firma Franken Maxit dem Baustoffmarkt zur Verfügung gestellt (© Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co., 2016)

Teilaspekte der wärmetechnischen Optimierung zementgebundener Systeme wurden bereits in früheren Arbeiten untersucht. Dabei handelt es sich um modifizierte Leichtbetone (Al-Sibahy, et al., 2012a & 2012b; Chen, et al., 2013; Lim, et al., 2013; Oktay, et al., 2015; Sengul, et al., 2011; Zhang, et al., 2015), Normalbetone (Demirboğa, 2007; Demirboğa, et al., 2005; Gao, et al., 2014a; Nguyen, et al., 2014; Uysal, et al., 2004; Wongkeo, et al., 2012), Zement-Mischungen (Narattha, et al., 2015; Won, et al., 2011; Wu, et al., 2015) sowie andere Mörtel-Produkte (Brás, et al., 2013; Corinaldesi, et al., 2011; Koksal, et al., 2015; Lertwattanaruk, et al., 2012; Wang, et al., 2012). In den Arbeiten wird allgemein beschrieben, wie sich unterschiedliche Zusatzstoffe auf werkstofftechnische Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, Druckfestigkeit, Rohdichte, etc. auswirken.

Aus der Literaturrecherche kann zusammengefasst werden, dass die Entwicklungen im Bereich der Dünnbettmörtel in den letzten Jahrzehnten primär die Verbesserung der Druckfestigkeiten und weniger die Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften zum Ziel hatten. Die hier vorgestellten Ergebnisse zu korrelierenden Werkstoffeigenschaften sind in dieser Art neu. Die Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der wärmetechnischen Optimierung von Dünnbettmörtel, unter Einhaltung der Druckfestigkeitsklasse M 10. Nach (Schmidt, et al., 2018b) ist es möglich, die Wärmeleitfähigkeit von Dünnbettmörtel um 19 % zu mindern. Gleichzeitig erfolgt eine Anhebung der Druckfestigkeit um fast 16 %. In weiteren Untersuchungen (Schmidt, et al., 2018c) konnte die Wärmeleitfähigkeit um fast 29 % abgesenkt werden. Der so modifizierte Dünnbettmörtel erfüllt zudem die Druckfestigkeitsklasse M 10.

1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit bestand darin, einen Dünnbettmörtel zu entwickeln, der sich durch eine verminderte Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Druckfestigkeit auszeichnet. Als Ausgangsbasis fungierte ein typischer Dünnbettmörtel mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Um die Wärmeleitfähigkeit abzusenken, sollten dem Mörtelsystem innovative pulverförmige Zusatzstoffe sowie faserförmige Zusatzstoffe zugemischt und deren Einflüsse auf die werkstofftechnischen Eigenschaften des Dünnbettmörtels geprüft werden. Die Herstellung der Dünnbettmörtel erfolgte entsprechend den Herstellerangaben jeweils unter gleichen Versuchsbedingungen. Bei verschiedenen Versuchsreihen wurde eine Variation der Wasser-Mörtel-Verhältnisse (w/m-Verhältnisse) durchgeführt. Darüber hinaus sollte der Einfluss der Porengröße, Porengrößenverteilung, des Gesamtporenvolumens bzw. der Porosität auf die Werkstoffeigenschaften geprüft werden.

In weiteren Untersuchungen sollten, neben der Bestimmung der Hydratationswärme mittels isothermer Wärmeflusskalorimetrie, zusätzlich das Erstarrungsverhalten mittels Vicat-Methode erfasst sowie thermogravimetrische Analysen zur Charakterisierung des Abbindeverhaltens erfolgen. In diesem Zusammenhang waren außerdem chemische und mineralogische Analysen über den gesamten Zeitraum der Mörtelerhärtung durchzuführen. Von großem Interesse sind hierbei festigkeitserhöhende Reaktionen zwischen Zusatzstoffen und dem Zementklinker.

Während bei den Vorversuchen eine teilweise Substitution der fertigen Ausgangsmischung durch Zusatzstoff-Dosierung angemessen erschien, sollte bei den weiterführenden Versuchsansätzen die Stoffraumrechnung eingesetzt werden. Gleichzeitig sollte berücksichtigt werden, dass bei allen Dünnbettmörtel-Mischungen stets die „deckelnde“ Wirkung auf der Mauerkrone aufrecht erhalten bleibt.

Die Untersuchungen schließen die Aufklärung der mineralogischen Mechanismen und die Entwicklung einer zugehörigen Theorie zur Erklärung der werkstofftechnischen Effekte ein. Die Allgemeingültigkeit des erarbeiteten Effekts soll außerdem an einer weiteren Mörtelsorte auf Zementbasis, einem Sockelputz für den Außenbereich, überprüft werden. Dadurch soll das Gesamtsystem einer tragenden Hauswand, bestehend aus monolithischem Wandbaustoff, Dünnbettmörtel sowie Innen- und Außenputz insbesondere wärmetechnisch weiterentwickelt werden. Die experimentell erarbeiteten Ergebnisse sind zusätzlich mittels FEM-Simulationen an Dünnbettmörtel/Mauerziegel-Systemen zu verifizieren.

2 Stand der Technik

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über Zusammensetzung, Arten, Herstellungsverfahren sowie Anwendungsmöglichkeiten von Mörteln. Außerdem wird auf das Bindemittel Zement eingegangen. Darüber hinaus werden die Wärmeübertragungs-Mechanismen in der Dünnbettmörtel-Fuge genauer betrachtet.

2.1 Zusammensetzung von Mörtel

Nach (Klausen, et al., 2013b; Neroth, et al., 2011a; VDZ, 2008a) sind Mörtel mineralisch-gebundene Gemische aus einem Bindemittel, Gesteinskörnungen und Zugabewasser (Anmachwasser); gegebenenfalls unter Zugabe von Zusatzstoffen und/oder Zusatzmitteln. Sie enthalten somit die gleichen Ausgangsstoffe wie Beton. Um beide Werkstoffarten voneinander abgrenzen zu können, wird oft das Größtkorn der Gesteinskörnungen herangezogen: bis 4 mm Größtkorn wird das Gemisch als Mörtel, bis 8 mm Größtkorn und darüber als Beton bezeichnet. Im Allgemeinen kennzeichnet der Begriff Mörtel einen Werkstoff, welcher in dünnen Schichten bzw. kleineren Teilbereichen eingesetzt wird. Er findet Verwendung als Mauer-, Putz-, Estrich-, Einpress- oder Instandsetzungsmörtel.

Nach (VDZ, 2008b) kann der Verbundwerkstoff Beton/Mörtel als ein 5-Stoff-System aus den Ausgangsstoffen Gesteinskörnungen, Bindemittel, Wasser sowie Zusätzen (Zusatzstoffe und Zusatzmittel) bezeichnet werden.

Die Gesteinskörnungen z. B. aus Quarzsand/-mehl bilden das mineralische bzw. tragende Gerüst des Mörtels. Ihre Aufgabe ist es zudem den Mörtel porös zu machen und die Schwindung beim Abbinden zu mindern („Abmagerung“). Um Eigenschaften wie die Wärmedämmung zu verbessern, können dem Mörtel außerdem Leichtzuschläge beigemischt werden.

Zu den wichtigsten Bindemitteln im Mörtel gehören Zement, Kalkhydrat und Gips. Mit Wasser angemacht, umhüllen diese als Leim die Quarzsandkörner und füllen Zwischenräume zwischen den umhüllten Sandkörnern aus. Beim Abbindevorgang kommt es zum Schrumpfen des Bindemittels. Die dabei entstehenden Poren (Schrumpfporen) sowie die durch das Verdunsten des Überschusswassers entstehenden Hohlräume tragen wesentlich zur Porosität des Mörtels bei.

Das Zugabewasser (Mörtelwasser) bildet mit dem Bindemittel und den mehlfinen Bestandteilen den „Leim“, welcher dem Mörtel die erforderliche Konsistenz und nach dem Erhärten das festigkeitsbildende Gefüge verleiht sowie den Verbund mit anderen Bauteilen (z. B. Plansteinen) ermöglicht.

Zusätze, d. h. Zusatzstoffe und Zusatzmittel können dem Mörtel ähnlich wie dem Beton zugegeben werden. Sie dürfen jedoch keinen negativen Einfluss auf den Mörtel ausüben; bspw. das Erhärten des Bindemittels oder die Festigkeit und Beständigkeit nicht negativ beeinträchtigen.

Zusatzstoffe sind fein verteilte Zusätze wie z. B. Kalkgesteine, Trass, Silikastaub (Kieselsäure, Steinkohle-Flugaschen) oder auch Glasfasern, welche die Mörtel-eigenschaften beeinflussen und im Gegensatz zu Zusatzmitteln in größeren Mengen zugegeben werden dürfen.

Zusatzmittel werden in geringeren Mengen zugegeben und verändern die Mörtel-eigenschaften durch chemische und/oder physikalische Wirkung.

2.2 Arten von Mörtel

Im Hinblick auf Variationsmöglichkeiten in der Zusammensetzung sowie der Anwendungsbreite von Mörteln kann festgestellt werden, dass diese größer ist als bei Betonen, weil das Festigkeitskriterium nicht immer ausschlaggebend ist. In Abhängigkeit vom Verwendungszweck werden an Mörtel unterschiedliche Anforderungen gestellt, weshalb es keinen „Universalmörtel“ gibt, der überall verwendet werden kann, sondern eine Reihe von Mörtelarten für unterschiedlichste Beanspruchungen. Die Mörtel unterscheiden sich daher nach Art der Anwendung, Verarbeitungsart, Konsistenz, Zusammensetzung, Herstellart sowie den physikalischen Eigenschaften (Tabelle 1).

Tabelle 1: Beispiele für Mörtelarten (VDZ, 2008a)

Beurteilungskriterien	Bezeichnung
Anwendungsbereich	Mauer-, Putz-, Fugen-, Fliesen-, <i>Dünnbett</i> -, Estrich-, Auskleidungsmörtel (z. B. für Trinkwasserrohre)
Verarbeitungsart	Spritz-, Spachtel-, Einpressmörtel
Konsistenz	Erdfeucht, plastisch, fließfähig
Zusammensetzung	Zement-, Kalkzementmörtel
Herstellart	Baustellen-, Werk-Frisch-, Werk-Trockenmörtel
Physikalische Eigenschaften	Normal-, Leicht-, Wärmedämm-Mörtel bzw. -Putz

2.3 Herstellung von Mörtel

Mörtel kann sowohl direkt auf der Baustelle, als auch im Mörtelwerk hergestellt werden. Heutzutage wird überwiegend Werkmörtel eingesetzt; der Anteil an Baustellenmörtel ist sehr gering geworden. Bei einem Werkmörtel handelt es sich um einen im Werk gemischten Mörtel mit bekannter Rezeptur. Dieser wird in den Formen Werk-Trockenmörtel (z. B. Dünnbettmörtel), Werk-Vormörtel, Werk-Frischmörtel und als Mehrkammer-Silomörtel geliefert. Mörtel müssen wie Beton unter Beachtung der geltenden Normanforderungen zusammengesetzt sein. Nach dem Herstellungskonzept wird hier zwischen „Mörtel nach Eignungsprüfung“ und „Rezeptmörtel“ differenziert. Werkmörtel werden immer nach einem Eignungsprüfungskonzept hergestellt. Dies bedeutet, dass der Hersteller die Zusammensetzung und das Herstellungsverfahren so festlegt, dass bestimmte Eigenschaften erreicht werden müssen. Diese werden dann im Rahmen einer Eignungsprüfung verifiziert.

Bei Baustellenmörteln hingegen erfolgt die Herstellung meist als Rezeptmörtel, wobei bestimmte vorgegebene Mischungsverhältnisse (Rezepte) einzuhalten sind. Das Anmischen von Mörteln wird mit einem Rührgerät (Quirl) oder Mischer durchgeführt. Die Verarbeitung reicht vom Handauftrag mit Spachtel oder Maurerkelle bzw. Mörtelschlitten, bis zur Dichtstromförderung eines pumpfähigen Mörtels im Druckschlauch (Neroth, et al., 2011a; VDZ, 2008a). Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit hergestellten Dünnbettmörtel-Mischungen erfolgten gemäß Stoffraumrechnung. In Arbeiten u. a. von (Dawood, et al., 2012; Dinakar, et al., 2013; Kou, et al., 2012; Mefteh, et al., 2013; Sengul, et al., 2011; Su, et al., 2001) konnten Betonrezepturen erfolgreich mit der Stoffraumrechnung hergestellt werden.

2.4 Mauermörtel

Bei Mauermörtel handelt es sich um ein Gemisch aus einem oder mehreren anorganischen Bindemitteln (Zement nach DIN EN 197-1, Baukalk nach DIN EN 459-1, oder Putz- und Mauerbinder (PM) nach DIN EN 413-1), Gesteinskörnungen/Sand (mineralischen Ursprungs, gemischtkörnig) nach DIN EN 13139/13055-1, Wasser nach DIN EN 1008 und ggf. Zusatzstoffen wie Trass nach DIN 51043, Gesteismehl nach DIN EN 12620, Flugasche nach DIN EN 450-1, Pigmente nach DIN EN 12878, etc. sowie Zusatzmitteln nach DIN EN 934-1 und -3. Mauermörtel finden für Lager-, Stoß- und Längsfugen, Fugenglattstrich und nachträgliches Verfugen Verwendung (Neroth, et al., 2011a).

2.4.1 Arten von Mauermörtel

Nach DIN V 18580 bzw. DIN EN 998-2 werden je nach Anwendungsart drei (Mauer-) Mörtelarten unterschieden:

- Normalmauermörtel (NM)
- Leichtmauermörtel (LM)
- Dünnbettmörtel (DM)

Normalmauermörtel werden nach steigender Mindestdruckfestigkeit in die Mörtelgruppen I, II, IIa, III und IIIa eingeteilt (Tabelle 2.1 und 2.2). Gemäß DIN 1053 beträgt bei der Verwendung von Normalmauermörtel die Solldicke der Lagerfuge 12 mm. Oftmals wird hier die Mörtelgruppe IIa eingesetzt. In der Regel enthält diese ein hydraulisches Bindemittel wie Zement, hydraulischen Kalk oder PM-Binder sowie Sand in einem Gewichtsverhältnis von etwa 1 zu 3.

Leichtmauermörtel verbessern die Wärmedämmeigenschaften von Mauerwerk und werden daher vor allem in Kombination mit wärmedämmenden Steinen eingesetzt. Hierfür wird nach dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_R in die Gruppen LM 21 und LM 36 ($\lambda_R = 0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und $\lambda_R = 0,36 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) eingeteilt. Wie bei Normalmauermörtel beträgt die Solldicke der Lagerfuge 12 mm.

Dünnbettmörtel werden für die Vermauerung von Mauersteinen mit sehr geringen Maßabweichungen in der Steinhöhe verwendet. Das Größtkorn der im Mörtel enthaltenen Gesteinskörnungen darf höchstens 1,0 mm betragen; die Dicke der vermörtelten Fugen beträgt lediglich 1 bis 3 mm. Dünnbettmörtel bestehen aus feinen mineralischen Gesteinskörnungen, Zement nach DIN EN 197-1, eventuell auch anorganischen Füllstoffen sowie geringen Anteilen an organischen Zusätzen (plastifizierende und verzögernde Wirkung, verbessertes Wasserrückhaltevermögen). Die organischen Bestandteile dürfen einen Anteil von 2 Ma.-% nicht überschreiten.

Aufgrund des unterschiedlichen Saugverhaltens der Mauersteine muss die Mörtelsorte auf die Mauersteine abgestimmt sein.

2.4.2 Anforderungen an Mauermörtel

Mauermörtel wird zur Herstellung von Mauerwerk verwendet. Er erfüllt dabei folgende Aufgaben:

- Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung, so dass Druck-, Zug-, Scher- und Biegebeanspruchungen aufgenommen werden können und dadurch ein zusammenhängender Baustoff, das „Mauerwerk“ entsteht
- Vollfugige Verfüllung der Zwischenräume zwischen den Mauersteinen, um eine Druckausgleichsschicht zur gleichmäßigen Kraftübertragung und den Feuchtigkeits-, Wärme-, Schall- und Brandschutz zu gewährleisten
- Ausgleich von Maßabweichungen der Mauersteine

Die für die sachgerechte Planung, Bemessung und Ausführung von Mauerwerk geltende Normenreihe DIN 1053 differenziert je nach Anwendungsgebiet zwischen Normal-, Leicht- und Dünnbettmörtel (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Zuordnung der nach DIN 1053 geforderten Mörtelgruppen zu den Mörtel-eigenschaften nach DIN EN 998-2 entsprechend der deutschen Anwendungsnorm DIN V 20000-412 (VDZ, 2008a)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Erforderliche Mörtel-eigenschaften nach DIN EN 998-2								
Mörtelgruppe nach DIN 1053	Druckfestigkeitsklasse	Trockenroh-dichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Verbundfestigkeit ¹⁾ [MPa]	Chloridgehalt [Ma.-%]	Verarbeitbarkeitszeit [h]	Korrigierbarkeitszeit [min]	Brandverhaltensklasse
Normalmauermörtel								
I	M 2,5	≥ 1500	k. A.	k. A.	≤ 0,1	k. A.	k. A.	A 1
II	M 5			≥ 0,04				
IIa	M 10			≥ 0,08				
III	M 15			≥ 0,10				
IIIa	M 30			≥ 0,12				
Leichtmauermörtel								
LM 21	M 10	≤ 700	≤ 0,18	≥ 0,08	≤ 0,1	k. A.	A 1	
LM 36	M 10	> 700 und ≤ 1000	≤ 0,27	≥ 0,08				
Dünnbettmörtel²⁾								
DM	M 15	≥ 1300	k. A.	≥ 0,20	≤ 0,1	≥ 4	≥ 7	A 1

k. A.: keine Anforderung

¹⁾ Der Nachweis muss unter Verwendung von Referenzsteinen erfolgen. Die maßgebende Verbundfestigkeit ergibt sich aus dem nach DIN EN 1052-3 ermittelten Wert der charakteristischen Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit) multipliziert mit dem Prüffaktor 1,2.

²⁾ Nur mit Gesteinskörnung bis zu einem Größtkorn von 1,0 mm zulässig.

Die Anwendung der drei Mauermörtelarten nach Eignungsprüfung gemäß DIN EN 998-2 für Mauerwerk nach DIN 1053-1 und -3 bzw. -4, ist in DIN V 20000-412 geregelt. Diesbezüglich werden der jeweiligen Mörtelgruppe nach DIN 1053 die notwendigen Mörtel Eigenschaften gemäß DIN EN 998-2 zugeordnet.

Wenn Mauermörtel außerdem die Anforderungen der deutschen Zusatznorm DIN V 18580 erfüllen (Tabelle 2.2), können diese bei gleicher Festigkeit in höheren Mörtelgruppen verwendet werden als in der Norm DIN EN 998-2. Mauermörtel die sowohl der europäischen Norm, als auch der deutschen Zusatznorm entsprechen, sind mit dem europäischen CE-Zeichen und dem deutschen Ü-Zeichen markiert (VDZ, 2008a). Die Zuordnung der Druckfestigkeitsklassen (Tabelle 2.1; Spalte 2) gilt nicht für Mauermörtel, die zusätzlich DIN V 18580 entsprechen und mit CE und Ü gekennzeichnet sind. Für solche Mörtel gilt die Zuordnung nach Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Zusätzliche Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeit von Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften nach DIN V 18580 (VDZ, 2008a)

1	2	3	4	5
Mörtel- gruppe nach DIN 1053	Druckfestig- keitsklasse nach DIN EN 998-2	Fugendruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen ^{3), 4)} [MPa]		
		Verfahren I	Verfahren II	Verfahren III
Normalmauermörtel				
I	M 1	-	-	-
II	M 2,5	1,25	2,5	1,75
IIa	M 5	2,5	5,0	3,5
III	M 10	5,0	10,0	7,0
IIIa	M 20	10,0	20,0	14,0
Leichtmauermörtel				
LM 21	M 5	2,5	5,0	3,5
LM 36	M 5	2,5	5,0	3,5
Dünnbettmörtel				
DM	M 10	-	-	-

M 1 bis M 20: Druckfestigkeit; der Zahlenwert gibt die Mindestdruckfestigkeit in [MPa] an.

³⁾ Die Prüfung erfolgt nach einem in DIN 18555-9 beschriebenen Verfahren. Die Anforderungen gelten als erfüllt, wenn der Nachweis nach einem der drei genannten Verfahren erfolgt ist.

⁴⁾ Die Prüfung der Fugendruckfestigkeit muss mit Referenzsteinen erfolgen.

Im Allgemeinen müssen alle Arten von Mauermörtel gut verarbeitbar sein, d. h. eine verarbeitungsgerechte Konsistenz aufweisen. Luftporenbildner dürfen nur in einer solchen Menge zugeführt werden, so dass sie die Trockenrohichte des Mörtels um maximal 300 kg/m³ vermindern.

Weitere Informationen zu Mörteln bzw. Mauermörteln enthalten die Lehrbücher von (Klausen, et al., 2013c; Neroth, et al., 2011a) bzw. das Fachbuch von (VDZ, 2008). Ausführliche Informationen zu Zusatzstoffen sind in einem Sachstandsbericht von (Dt. Bauchemie, 2003) aufgeführt.

2.5 Zement

Nach DIN EN 197-1 ist Zement (CEM-Zement genannt) als ein hydraulisches Bindemittel definiert, d. h. ein fein gemahlener anorganischer Stoff, der mit Wasser gemischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.

2.5.1 Normung und Nomenklatur

In der Norm sind die Zement-Hauptbestandteile als Portlandzementklinker (K) und mögliche Zumahlstoffe: Hüttensand (S, granuliert Hochofenschlacke), natürliche und getemperte, industrielle Puzzolane (P, Q), kieselsäure- und kalkreiche Flugaschen (V/W), gebrannter Schiefer (T), Kalkstein (L/LL), Silikastaub (D) und Nebenbestandteile Calciumsulfat (Gips, Anhydrit) zur Regelung des Erstarrungsverhaltens sowie (Zement-)Zusätze beschrieben und festgelegt. Hinsichtlich der Zusammensetzung und Bezeichnung gibt es insgesamt 27 europäische Normalzemente, welche in fünf Hauptzementarten unterteilt sind. Darüber hinaus erfolgt eine Einstufung in die Festigkeitsklassen 32,5 N/R, 42,5 N/R und 53,5 N/R. In der Norm wird außerdem auf die Prüfverfahren für Normalzement nach DIN EN 196/1-10 verwiesen.

Tabelle 3: Zemente nach DIN EN 197-1

Bezeichnung	Zumahlstoff	Zementart	Klinkeranteil [Ma.-%]
Portlandzement	-	CEM I	95 - 100
Portlandkompositzement	S, D, P, Q, V, W, T, L/LL	CEM II/A CEM II/B	80 - 94*) 65 - 79
Hochofenzement	S	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35 - 64 20 - 34 5 - 19
Puzzolanzement	D, Q, V, W	CEM IV/A CEM IV/B	65 - 89 45 - 64
Kompositzement	S, P, Q, V	CEM V/A CEM V/B	40 - 64 20 - 38

*)Ausnahme Silikastaub-Zement mit 90 bis 94 Ma.-% Klinkeranteil.

In der Zementchemie ist es zur Vermeidung langer und umständlicher Formeln üblich eine eigene Nomenklatur für oxidische Verbindungen zu verwenden. Diese werden mit dem ersten Buchstaben des Kations bezeichnet (Tabelle 4) (Benedix, 2006).

Tabelle 4: Kurzschreibweise oxidischer Verbindungen

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	FeO	H ₂ O	CO ₂	SO ₃
C	S	A	F	N	K	L	M	P	T	f	H	c	s

2.5.2 Zementherstellung

Die Herstellung von Zementklinker zählt weltweit zu den bedeutenden industriellen Produktionsprozessen (VDZ, 2008b). Als Ausgangsmaterialien werden Rohstoffe verwendet, welche die Hauptbestandteile des Zements, nämlich Calciumoxid, Siliziumdioxid, Aluminiumoxid (Tonerde) und Eisenoxid, enthalten. In der Regel sind dies Kalkstein sowie Ton- bzw. Kalkmergel. Als weitere Kalk- bzw. Tonkomponente kommt auch Kreide bzw. Tonschiefer zum Einsatz. Die Rohstoffgewinnung erfolgt in Steinbrüchen durch Bohren und Sprengen mit einer darauffolgenden Zerkleinerung (Brechen und Mahlen) zu Rohmehl sowie Homogenisierung des Materials (75 bis 80 Ma.-% Kalkstein und 20 bis 25 Ma.-% Ton). Zum Teil werden Korrekturkomponenten wie Quarzsand oder Eisenerz zugesetzt, um die erforderliche chemische Zusammensetzung des Rohmehls einzustellen.

In weiteren Verfahrensschritten wird das getrocknete Rohmehl zunächst in einen sog. Zyklonvorwärmer („Schwebegas-Wärmetauscher“) aufgegeben. Dieser ist aus mehreren Stufen aufgebaut und dient der Vorwärmung des Rohmehls sowie der teilweisen Entsäuerung des Kalksteins. Die restliche Entsäuerung findet im (Vor-)Calcinator („Brennkammer“) statt, welcher zwischen Zyklonvorwärmer und Drehrohrofen angeordnet ist. Das fast vollständig entsäuerte Material gelangt im Anschluss mit einer Temperatur zwischen etwa 800 bis 1000 °C in den Drehrohrofen. Durch dessen Neigung und die Drehrotation (Entstehung von Granalien) wandert das Brenngut vom Ofeneinlauf zum Ofenauslauf. In der heißesten Sinterzone herrschen Materialtemperaturen von etwa 1450 °C und ein Schmelzanteil von etwa 25 %. Hier kommt es zur Bildung der Hochtemperatur-Modifikationen der silikatischen Klinkerphasen. Nach dem Sintervorgang findet eine schnelle und gezielte Klinkerabkühlung auf einem Rostkühler statt. Dabei entstehen durch Kristallisation der Schmelze die aluminatischen und ferritischen Klinkerphasen. Der Zementklinker verlässt den Rostkühler mit einer Temperatur zwischen etwa 80 bis 200 °C und wird in Silos und Hal-

len gelagert. In einem nächsten Schritt findet das Feinmahlen des Klinkers entweder alleine oder mit weiteren Hauptbestandteilen statt. Hierfür wird dem Mahlgut ein Sulfatträger (Gips oder Anhydrit) zur Abbindesteuerung zugesetzt. Die gemeinsame Vermahlung der Bestandteile erfolgt in Kugel-, Gutbett- oder Vertikal-Walzenmühlen. Das fertige Zement-Produkt wird meistens in Silos gelagert, von wo aus es als Sack- oder Siloware zum Versand/Verbraucher weitergeleitet wird. Moderne Zementwerke mit Vorcalciniertechnik produzieren heutzutage 8000 bis 12000 t Zementklinker am Tag.

Zur Beurteilung der Rohstoff- und Klinkerzusammensetzung wird in der Praxis im Allgemeinen die Berechnung des Kalkstandards (KSt) sowie des Silikat- (SM) und Tonerdemoduls (TM) herangezogen. Der Kalkstandard technischer Klinker liegt i. d. R. zwischen 90 und 102 % und sollte entsprechend hoch sein um die erwünschten kalkreichen Verbindungen Tricalciumsilikat und -aluminat sowie Calciumaluminatferrit bilden zu können. Bild 3 zeigt den Temperaturverlauf sowie die Zementklinkerphasen-Bildung in einem Drehrohrföfen mit Vorcalciniertechnik.

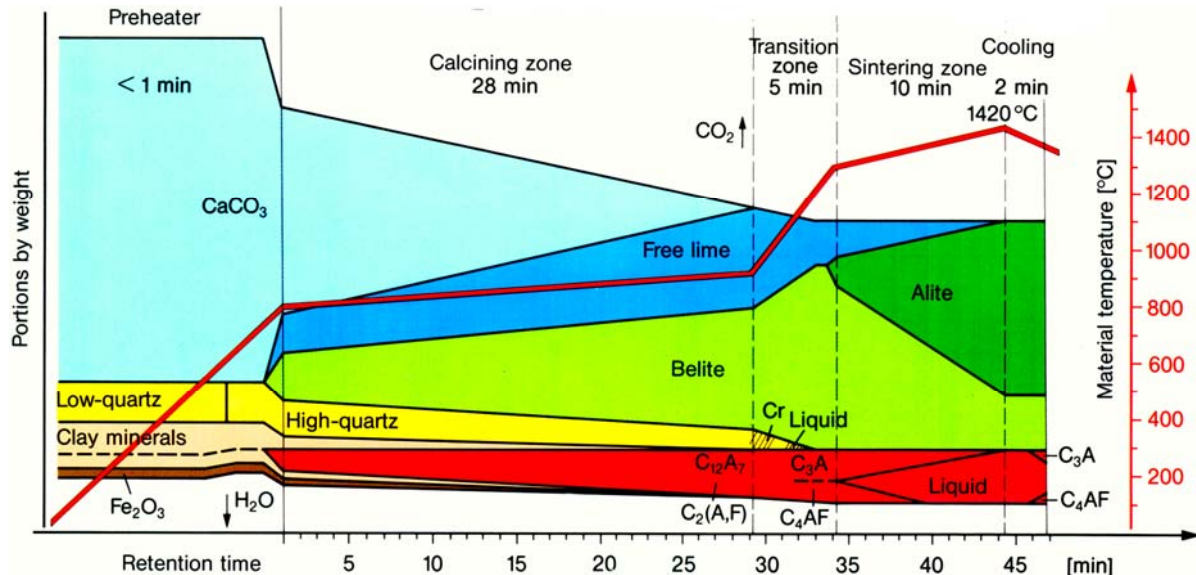


Bild 3: Reaktionsablauf in einem Drehrohrföfen mit Vorcalciniertechnik nach (Wolter, 1985)

Weiterführende Informationen hinsichtlich der Zementherstellung sind in den Lehrbüchern von (Locher, 2000e) und (Stark, et al., 2000d) beschrieben.

2.5.3 Zusammensetzung und Eigenschaften von Zement

Nach DIN 197-1 ist Portlandzementklinker der Hauptbestandteil von Portland- und Portlandkomposit-Zementen. Dieser besteht aus den vier Hauptklinkerphasen Alit C_3S , Belit C_2S , Tricalciumaluminat C_3A und Tetracalciumaluminatferrit C_4AF . Neben diesen können Freikalk (CaO_{frei}), Periklas (MgO_{frei}), Glasphase und metastabile/intermediäre Phasen als weitere Klinkerbestandteile vorhanden sein. Für alle Zemente ist außerdem die Zugabe von bis zu 5 Ma.-% Nebenbestandteilen zulässig (z. B. Kalkstein, Rohmehl oder Staub aus Elektrofiltern als sog. Füller). Abgesehen davon muss dem Zementklinker, zur Regulierung der Verarbeitbarkeit des Zementleims, Calciumsulfat als Erstarrungsregler zugegeben werden (Stark, et al., 2000e). Tabelle 5 zeigt die Zusammensetzung von Zementklinker und Sulfatträgern.

Tabelle 5: Bezeichnung von Klinkermineralien und Zementbestandteilen. Anteile der Haupt- und Nebenklinkerphasen sowie Sulfatträger nach (Locher, 2000e; Stark, et al., 2000e; Taylor, 1990d)

Reines Mineral	Chemische Formel	Kurzschreibweise	Klinkermineral	Anteil im Klinker [Ma.-%]
Hauptklinkerphasen				
Tricalciumsilikat	Ca_3SiO_5	C_3S	Alit	40 - 80
Dicalciumsilikat	Ca_2SiO_4	C_2S	Belit	2 - 30
Tricalciumaluminat	$Ca_3Al_2O_6$	C_3A	Aluminat(-Phase)	3 - 15
Calciumaluminatferrit (Brownmillerit)	$Ca_2(Al,Fe)_2O_5$	C_4AF	Aluminatferrit(-Phase)	4 - 15
Nebenklinkerphasen				
Calciumoxid (gebrannter Kalk)	CaO	C	Freikalk	< 2
β -Arcanit	K_2SO_4	Ks		< 2
Periklas	MgO	M		< 2
<i>evtl. weitere Alkalisulfate, Spurrit, amorphe Anteile</i>				< 1
Sulfatträger				
Anhydrit	$CaSO_4$	Cs		nicht enthalten
Bassanit	$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$	$CsH_{0,5}$		
Gips	$CaSO_4 \cdot 2 H_2O$	CsH_2		

2.5.4 Hauptklinkerphasen des Portlandzements

Die kristallinen Hauptphasen des Zementklinkers sind als Alit, Belit, Calciumaluminat („Aluminat“) und Calciumaluminatferrit („Aluminatferrit“) beschrieben. Die Zement-eigenschaften hängen im Wesentlichen vom Zusammenwirken dieser vier Phasen ab. Im Klinker liegen zudem keine reinen Phasen und keine Gleichgewichtszustände vor. Man geht von einem „Multikomponentensystem mit Mischkristallbildung im Ungleichgewichtszustand“ aus (Tabelle 6) (Kurdowski, 2014a).

Tabelle 6: Fremdioneneinbau in die Hauptklinkerphasen

Klinkerphase	Fremdionen
Alit	Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+
Belit	Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+
Aluminat	Si^{4+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Ti^{4+}
Aluminatferrit	Si^{4+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Ti^{4+}

2.5.4.1 Tricalciumsilikat / Alit

Das Tricalciumsilikat ist die Hauptkomponente der Zementklinkerphase Alit und besteht aus 73,7 Ma.-% CaO und 26,3 Ma.-% SiO₂. Es kristallisiert aus Schmelzen zwischen 69,5 und 71,5 % CaO als Primärphase. C₃S erhärtet unter Wasserzugabe sehr schnell, die dabei entstehenden Hydratphasen (Calciumsilikathydrate, kurz: C-S-H-Phasen) erreichen hohe Festigkeiten. Alit ist der Hauptträger der Festigkeit im Zement. Die Herstellung von Portlandzementklinker zielt daher auf möglichst hohe Alitgehalte ab. C₃S bildet sich bei der Sinterung im Drehrohrofen erst ab etwa 1250 °C durch die Reaktion von C₂S mit C. Das reine C₃S durchläuft zwischen Raumtemperatur (RT) und 1100 °C eine Reihe von displaziven Phasenübergängen. Im metastabilen Bereich (< 1264 °C) sind davon sieben Modifikationen bekannt (Bild 4). Bei RT liegt die stabile T₁-Struktur vor.

Unterhalb von 1250 °C zerfällt das C₃S zu α-C₂S und C, allerdings nur bei langsamem Abkühlen oder sehr langem Tempern. Die maximale Zerfallsgeschwindigkeit liegt bei einer Temperatur von etwa 1175 °C. Mikroskopisch zeigt sich der Zerfall in „korrodierten“ Randzonen. Er findet jedoch nur bis etwa 700 °C mit erkennbarer Geschwindigkeit statt. Durch den Einbau bzw. die Substitution von Ca²⁺ und Si⁴⁺ durch Fremdionen (Tabelle 6) gelingt es, höher-symmetrische Modifikationen (meist M₁ oder M₃, seltener R) bei RT zu stabilisieren; die hydraulische Aktivität der polymorphen Formen ist dabei jedoch weitestgehend gleichbleibend. Zusätzlich erhöht sich

die Festigkeit des Zements, da ein Einbau von Fremdionen das C_3S gegen Zerfall stabilisiert (Stark, et al., 2000e).

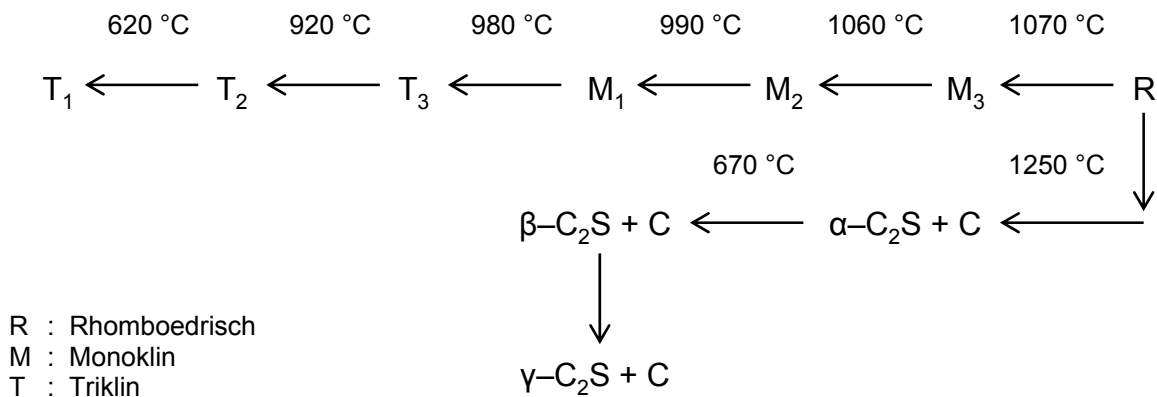


Bild 4: Polymorphie des reinen C_3S nach (Stark, et al., 2000e; Taylor, 1990d)

(Mota, et al., 2015) berichten über den Einfluss von Alkalien und Sulfaten, einzeln und in Kombination, auf die Hydratationskinetik sowie mikrostrukturelle Entwicklung des Alits. In allen Fällen konnte eine deutliche Beschleunigung der Hydratation sowie Unterschiede in der Morphologie der C-S-H-Phasen nachgewiesen werden. Die Zugabe bzw. der Einbau von Alkalien und Sulfaten in Kombination resultiert dabei in einem festigkeitssteigernden Effekt. (Li, et al., 2014) beschreiben ebenfalls den Fremdioneneinbau und untersuchten die Wirkungsweise von SO_3 und MgO auf den Polymorphismus des Alits. In aktuellen Arbeiten von (Bergold, et al., 2016) wurde die Wirkungsweise unterschiedlicher Sulfatzugaben auf einen Portlandzement mittels XRD-Analyse und isothermer Wärmeflusskalorimetrie untersucht, wobei die Beobachtung der Überlagerung aluminatischer und silikatischer Reaktionen galt. Die Zugabe von Sulfat bewirkt eine Beschleunigung der frühen Alit-Hydratation, welche auf den sog. „Seeding-Effekt“ zurückzuführen ist. Hierbei kommt es zu einem direkten Ettringit- bzw. C-S-H-Phasen-Wachstum. Nach (Sobolkina, et al., 2016) ist es außerdem möglich, die frühe Alit-Hydratation durch Zugabe von mesoporösem Kohlenstoff zu beschleunigen. Bild 5 zeigt eine mikroskopische Aufnahme von Alitkristallen (Anschliff) als große pseudo-hexagonale Kristalle mit einem Kristall-Durchmesser zwischen 50 und 80 μm .

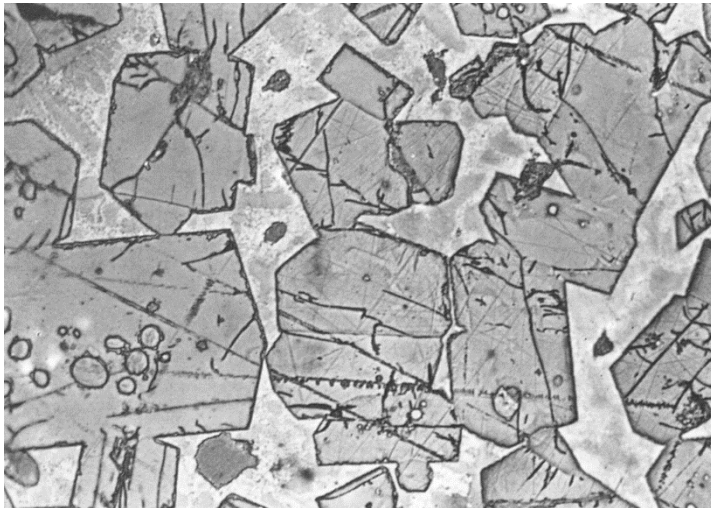


Bild 5: Idiomorphe Alitkristalle (Anschliff) (Wenda, 2005a)

Von (Pöllmann, 2001) wird ebenfalls über die Möglichkeit des Einbaus von Fremdionen berichtet. Weitere Informationen bezüglich des Tricalciumsilikats und dessen Fremdionen-Einbau enthält außerdem das Lehrbuch von (Kurdowski, 2014a).

2.5.4.2 Dicalciumsilikat / Belit

Das Dicalciumsilikat ist die Hauptkomponente der Zementklinkerphase Belit und besteht aus 65,1 Ma.-% CaO und 34,9 Ma.-% SiO₂. Es verfügt über die gleichen Eigenschaften wie Alit, reagiert mit Wasser jedoch wesentlich langsamer. Nach längerer Zeit (> 1 Jahr) erreichen die aus Belit gebildeten C-S-H-Phasen jedoch gleiche bis sogar höhere Festigkeiten. Die Bildung des C₂S findet im Zementklinker bereits bei etwa 650 °C statt. Hierbei kristallisiert fast immer die metastabile β-Form des C₂S aus (seltener die metastabile α- bzw. α_L-Phase). Das Dicalciumsilikat kommt im Bereich zwischen RT und 1500 °C in fünf Modifikationen vor (Bild 6).

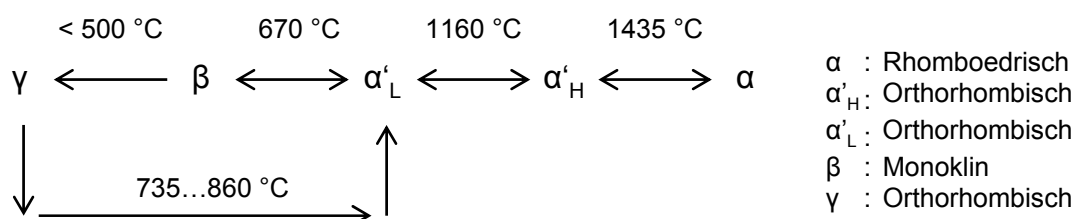


Bild 6: Polymorphie des C₂S nach (Stark, et al., 2000e; Taylor, 1990d)

Die Umwandlungen von β- zu γ-C₂S während der Abkühlung sowie von γ- zu α_L während des Aufheizens sind irreversibel. Der Modifikationswandel von β- zu γ-C₂S ist dabei mit einer Volumenausdehnung verbunden, welche das sog. „Zerrieseln“ und

den Zerfall („Dusting“) des C_2S bewirkt. Darüber hinaus ist γ - C_2S nicht hydraulisch. Ähnlich dem Alit können nach (Pöllmann, 2001) auch im Belit Fremdionen eingebaut werden (Bor, Phosphor, Magnesium, Alkalien, Barium, bevorzugt Strontium). Diese setzen die Umwandlungstemperatur herab und stabilisieren die Hochtemperatur-Modifikationen des Dicalciumsilikats bis zur Raumtemperatur (RT).

Nach (Pöhler, 2016) können Fremdionen u. a. Fe^{3+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ und K^+ in unterschiedlichen Konzentrationen in die Struktur des C_2S eingebaut werden, um verschiedene Modifikationen des C_2S zu stabilisieren. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei auf der Umsetzung hydraulisch reaktiver Phasen, die einen geringen Anteil an CaO enthalten und bei niedrigen Temperaturen hergestellt werden können. Hierbei konnte Na^+ , K^+ , Sr^{2+} , Ba^{2+} und Al^{3+} erfolgreich eingebaut und somit die hydraulischen Eigenschaften des Bindemittels verbessert werden. Bild 7 zeigt mikroskopische Aufnahmen des Dicalciumsilikats.

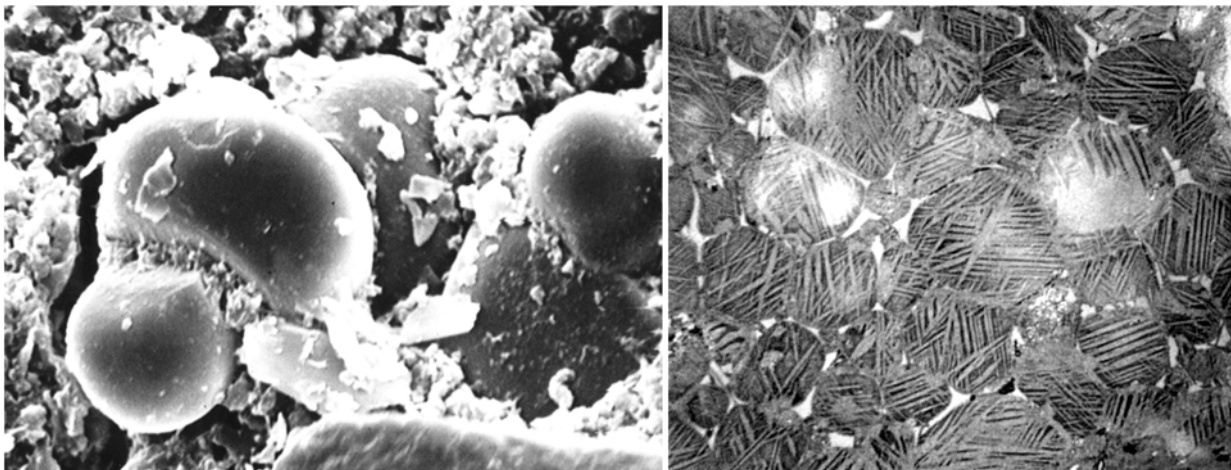


Bild 7: Belitkristalle (REM-Aufnahme) als gerundete Körner, Korn-Durchmesser zwischen 20 und 40 µm (links) (Wenda, 2005a); typischer Belit in gekreuzter Zwillings-Lamellenstruktur (H_2O -Ätzung) (rechts) (Woermann, 1965)

2.5.4.3 Tricalciumaluminat

Das Tricalciumaluminat ist die Hauptkomponente der (Portland-)Zementklinkerphase Aluminat und besteht in reiner Form aus 62,3 Ma.-% CaO und 37,7 Ma.-% Al_2O_3 . Es ist das Primärkristallisat im Bereich von 42,8 und 49,5 % Al_2O_3 und tritt nur in Portlandzementen auf. Es hat meist kubische oder orthorhombische (selten monokline) Struktur und zeigt keine Polymorphie. Die Reaktion mit Wasser ist sehr schnell, woraus eine entsprechend schnelle Erstarrung und große Hydratationswärme resultiert. C_3A reagiert mit Sulfat beim Abbinden des Zements, wodurch die Ettringit-Bildung

sowie die Verarbeitung des Zementleims ermöglicht werden. Der Fremdionen-Einbau von Na_2O und dessen Gehalt nehmen Einfluss auf die Polymorphie des C_3A (Tabelle 7). Dieser ist von praktischer Bedeutung, da mit zunehmendem Na^+ -Gehalt und abnehmender Symmetrie im Kristallsystem, die Reaktivität der Phase abnimmt (Wistuba, 2008).

Tabelle 7: Einfluss des Na_2O -Gehaltes auf die Polymorphie des C_3A

Gehalt an Na_2O [Ma.-%]	Symmetrie
0,0 - 1,9	Kubisch
1,9 - 3,7	Kubisch + orthorhombisch
3,7 - 4,6	Orthorhombisch
4,6 - 5,9	Monoklin

Der C_3A -Gehalt im Klinker beeinflusst sowohl die Festigkeit, als auch den Wasseranspruch des Zements. Ein hoher Klinker-Gehalt an C_3A hat einen positiven Effekt auf die Frühfestigkeit, jedoch einen negativen Effekt auf die Endfestigkeit sowie die Sulfatbeständigkeit des Zementsteins (Stark, et al., 2000e). Aluminate und Ferrite werden häufig als sog. Grundmasse („Interstitial material“) bezeichnet. Die Kristalle sind dabei kleiner $1\ \mu\text{m}$ und unter dem Mikroskop nur als Matrix zu erkennen (Bild 8).

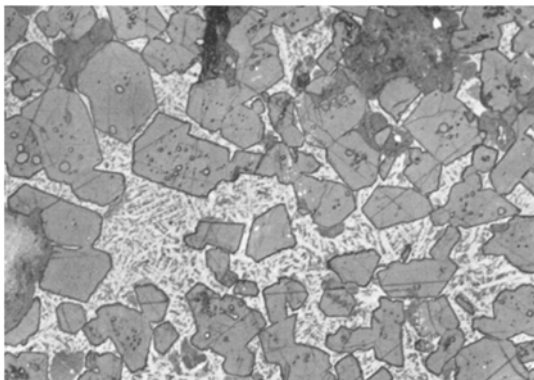


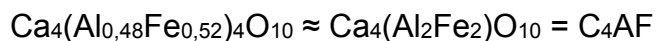
Bild 8: Alit mit Belitkernen in differenzierter Grundmasse (weiß: Ferrit, grau: Aluminat) (Wenda, 2005a)

Von (Yu, et al., 2012) wurde die Entstehung von Calciumaluminaten im System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ unter Einfluss von Na_2O untersucht. Aus der ansteigenden Zugabe von Na_2O resultieren dabei eine Erhöhung des Phasenanteils sowie eine Abnahme der Sintertemperatur des 12/7-Calciumaluminats (Mayenit) um $30\ ^\circ\text{C}$. Darüber hinaus bewirkt das Natriumoxid eine deutliche Verbesserung der Auslaugung von Alumini-

umoxid. In aktuellen Untersuchungen von (Tian, et al., 2015) wird ebenfalls über den Fremdionen-Einbau von Na₂O berichtet. Dieser hat, im Falle eines ansteigenden Na₂O-Gehalts von 0 auf 4,26 Ma.-%, eine Verbesserung der chemischen Aktivität des C₁₂A₇ sowie der Auslaugung des Aluminiumoxids im Zementklinker um 150 % zur Folge.

2.5.4.4 Tetracalciumaluminatferrit

Die Ferritphase hat keine feste chemische Zusammensetzung, sondern bildet innerhalb der Mischkristallreihe zwischen der Verbindung C₂F und dem hypothetischen C₂A (nur bei sehr hohem Druck stabil) Mischkristalle mit variablen Verhältnissen aus Al₂O₃ und Fe₂O₃. Sie befindet sich im Dreistoffsystem CaO-Al₂O₃-Fe₂O₃ und besteht aus etwa 46,2 % CaO, 21,0 % Al₂O₃ und 32,8 % Fe₂O₃. In Zementklinkern wird das Tetracalciumaluminat C₄AF auch als *Brownmillerit* bezeichnet (Taylor, 1990c):



Brownmillerit kristallisiert beim Abkühlen des Klinkers aus der Schmelze orthorhombisch und verfügt über keine Polymorphie. Er ist Bestandteil der Zwischenphase. Fremdionen-Einbau erfolgt primär durch Mg²⁺ mit maximal 1,5 bis 2,0 Ma.-% (oberhalb der Periklas-Bildung). Die Hydratation ist mit der des C₃A vergleichbar und muss in Zementklinkern ebenfalls durch Sulfat-Zugabe verzögert werden. Im Klinker lässt sich die Phase als feinstkörnig, xenomorph und mit der Aluminatphase verwachsen beschreiben. Im reinen Zustand hat sie eine gelb-braune Farbe; durch den Einbau von MgO kommt es zur Farbänderung nach grau-grün (typische Farbe des Portlandzements). Von (Stark, et al., 2000b; Taylor, 1990a) werden unterschiedliche Hydratationsmodelle beschrieben.

(Ectors, et al., 2013) berichten über die C₄AF-Hydratation in Portlandzement mit niedrigem Sulfatgehalt. Die Untersuchungen zeigen eine rapide und ungehinderte C₄AF-Auflösung nachdem sich das Sulfat in der Porenlösung abgebaut hat. Dies hat eine Übersättigung der Lösung zur Folge und führt zur Phasen-Bildung von Sulfat-AFm-16 (C₄A\$H₁₆). Aktuelle Untersuchungen von (Hertel, et al., 2016) berichten außerdem über die Hydratationskinetik der Ferritphase in Abhängigkeit von der Ca-Hydratation.

2.5.5 Calciumsulfat

Zur Abbindesteuerung enthält der Zementklinker Calciumsulfate. Nach DIN EN 197-1 ist die Zugabemenge dabei durch den Gesamt-SO₃-Gehalt des Zements beschränkt ($\leq 3,5$ bis $4,5$ Ma.-%). Calciumsulfat kann Gips, Halbhydrat, Anhydrit oder eine Mischung davon sein. Tabelle 8 zeigt die Phasen des Systems CaSO₄-H₂O und deren Eigenschaften.

Tabelle 8: Phasen des Systems CaSO₄-H₂O mit Eigenschaften (Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013)

Bezeichnung	Calciumsulfat-Dihydrat	Calciumsulfat-Halbhydrat	Calciumsulfat (III)	Calciumsulfat (II)
Chemische Formel der Phase	CaSO ₄ • 2 H ₂ O	CaSO ₄ • ½ H ₂ O	CaSO ₄ (III)	CaSO ₄ (II)
Zementschreibweise	CsH ₂	CsH _{0,5}	Cs	Cs
Mineralname	Gips	Bassanit	Anhydrit III	Anhydrit II
Formen		α-Halbhydrat β-Halbhydrat	α-Anhydrit III β-Anhydrit III	Schwerlöslich, unlöslich und Estrichgips
Kristallsystem/ Raumgruppe	Monoklin- prismatisch	Monoklin- prismatisch	Orthorhombisch	Orthorhombisch
Dichte [g/cm ³]	2,31	α: 2,76 β: 2,62	2,58	2,93 - 2,97
Kristallwasser [Ma.-%]	20,92	6,21	0	0
Löslichkeit in H ₂ O bei 20 °C [gCaSO ₄ /l]	2,05	α: 6,7 β: 8,8	α: 6,7 β: 8,8	2,7
Stabilität	< 40 °C	Metastabil	Metastabil	40 - 1180 °C

Neben dem Calciumsulfat-Dihydrat, dem -Halbhydrat, dem Anhydrit III bzw. Anhydrit II, gibt es als fünfte Phase den Anhydrit I. Bei der Zugabe von Sulfat zum Zementklinker kommt es sofort nach der Wasserzugabe zur Bildung von Ettringit (C₃A • 3 Cs • H₃₂). Dieses bildet sich unmittelbar auf der Oberfläche der C₃A-Körner (Hüllenbildung um C₃A-Körner). Die beiden Ausgangsstoffe Tricalciumaluminat und Sulfatträger nehmen daher besonderen Einfluss auf die Eigenschaften des Zements. Ein passender Abbindeeregler wird dem Zement bei der Mahlung in der Kugelmühle oder im Anschluss zugegeben. Hierbei kommt es zur vollständigen bzw. teilweisen Entwässerung des Gipses (Halbhydrat). Für jeden Zement gibt es je nach Anwendung bzw. entsprechend seiner Zusammensetzung (speziell C₃A-Gehalt) einen optimalen SO₃-Gehalt (Stark, et al., 2000a).

2.5.6 Zumahlstoffe

Neben dem Zementklinker kommen für die Zementherstellung der CEM II-V-Zementarten verschiedene Zumahlstoffe zum Einsatz, welche die Zementeigenschaften gezielt beeinflussen. Es wird hierfür in latent-hydraulische, puzzolanische und inerte Stoffe unterteilt (Stark, et al., 2000a). Zugabemengen sowie bestimmte Charakteristika diverser Zumahlstoffe für Zement sind in der Norm DIN 197-1 festgelegt.

2.5.6.1 Latent-hydraulische Zumahlstoffe

Hüttensand (d. h. zerkleinerte, glasig-erstarnte Hochofenschlacke, kurz: HOS) ist der wichtigste latent-hydraulische Zumahlstoff. HOS ist eine Kalk-Tonerde-Silikat-Schmelze, die hauptsächlich CaO , SiO_2 und Al_2O_3 enthält. Hüttensand erhärtet unter alkalischer Anregung (Portlandzementklinker) hydraulisch. Nach (Binici, et al., 2007) wurde diesbezüglich der Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Eigenschaften u. a. Druckfestigkeiten von Zement-Mischungen nach Zugabe variierender Mengen an Hochofenschlacke und eines natürlichen Puzzolans untersucht. In Abhängigkeit der gewählten Mahltechnik war es möglich, die Druckfestigkeiten gezielt zu erhöhen. (Demirboğa, 2007) und (Demirboğa, et al., 2005) zeigen, dass die Zugabe bzw. Substitution von u. a. 15 Ma.-% Hochofenschlacke solitär und in Kombination mit anderen Stoffen, eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit sowie eine Erhöhung der Druckfestigkeit von Beton zur Folge hat.

2.5.6.2 Inerte Zumahlstoffe

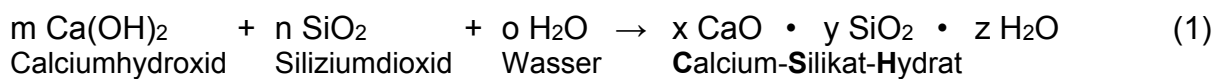
Inerte Zumahlstoffe wie Kalksteinmehl oder Kreide reagieren bei der Zementhydratation nicht oder nur bedingt mit den Zementbestandteilen. Sie haben daher als sog. „Füller“ die Aufgabe Zwischenräume in der Packung der Zementpartikel aufzufüllen. In diesem Zusammenhang ist vor allem der Kalkstein von Interesse, da er leichter mahlbar ist als der Klinker und dadurch eine breite Korngrößenverteilung liefert. Beim gemeinsamen Mahlen reichert er sich in den feineren Kornklassen an und vermindert somit das Lückenvolumen zwischen den Klinkerpartikeln (Locher, 2000c). Nach DIN EN 197 können im Portland-Kalksteinzement Anteile von 6 bis 35 Ma.-% verwendet werden. Als Füller kommen die Gesteinsmehle in Betracht, die der DIN 4226 entsprechen. Nach (Celik, et al., 2015) wurden verschiedene Mengenanteile an Portlandzement sowie Plastifizierungsmittel eines selbstverdichtenden Betons durch Kalkstein-Pulver und Flugasche substituiert und anschließend die Druckfestigkeiten

nach unterschiedlicher Alterung getestet. Aufgrund der feinen Zumahlstoffe resultieren eine höhere Packungsdichte und dadurch eine teilweise Erhöhung der Festigkeiten. Darüber hinaus verbesserte sich die Sulfatbeständigkeit des Betons. (Ghrici, et al., 2007) und (Mun, et al., 2007) berichten ebenfalls über den Einsatz von feinaufgemahlenem Kalksteinmehl als „Füller-Material“.

2.5.6.3 Puzzolanische Zumahlstoffe

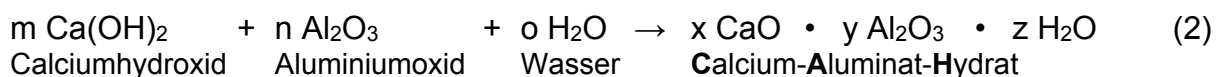
Puzzolane (Silikastaub, Flugasche, Trass, gebrannter Schiefer (sauer)) haben im Vergleich zu Hüttensanden (basisch) keine unmittelbar hydraulischen Eigenschaften (Kalkmangel). Hierzu zählen alle natürlichen und künstlichen silikatischen Stoffe, die als wesentliches Merkmal reaktionsfähige Kieselsäure enthalten. Dadurch sind sie in der Lage, mit dem bei der Hydratation der Klinkerkomponenten frei werdenden und in Lösung gehenden Calciumhydroxid, festigkeitsbildende Calciumsilikathydrate zu bilden (Formel 1):

Bildung von Calciumsilikathydrat:



Darüber hinaus enthalten Puzzolane meist auch reaktionsfähiges Aluminiumoxid, welches mit dem Calciumhydroxid Calciumaluminathydrate bilden kann (Formel 2):

Bildung von Calciumaluminathydrat:



In Arbeiten von (Abd Elaty, et al., 2014; Nochaiya, et al., 2010; Oertel, et al., 2014b; Senff, et al., 2010) wird ausführlich über die (druck-)festigkeitssteigernde Reaktivität (Puzzolanität) sowie den „Füller-Effekt“ unterschiedlich feiner Silikatstäube berichtet.

2.5.7 Zementhydratation

Als Hydratation wird die Gesamtheit der Vorgänge bei der Reaktion des Zements oder einer der Hauptkomponenten des Zements mit Wasser bezeichnet. Hierbei kommt es zu chemischen Umsetzungen (Hydrolyse, Hydratation) sowie zu Lösungs-, Kristallisations- (Entstehung von Hydratphasen) und Diffusionsvorgängen. Das Gemisch aus Zement und Wasser im flüssigen oder plastischen Zustand wird dabei als

Zementleim („cement paste“) bezeichnet. Nach der Erstarrung geht der Zementleim in Zementstein („cement rock“) über. Der Zementleim kann mit rheologischen (Viskosität/Konsistenz), der Zementstein mit mechanischen Kenngrößen (E-Modul, Dreipunkt-Biegezug- und Druckfestigkeit, etc.) beschrieben werden. Die Verfestigung des Zements ist ein fließender Übergang vom Erstarren („setting“) zum Erhärten („hardening“). Die Erhärtung dauert Monate/Jahre und bildet unter Abnahme der Porosität einen Festkörper mit mechanischen Eigenschaften (Aufbau der Festigkeit) (Locher, 2000a).

(Joseph, et al., 2014) untersuchten das Abbindeverhalten von Beton nach Zugaben von Stärke mit Hilfe eines Vicat-Gerätes. Nach (Sadok, et al., 2016) wurde der zusätzlich notwendige Wasserbedarf feiner Gesteinskörnungen ($\leq 63 \mu\text{m}$) von Beton durch Konsistenzprüfungen mittels der Vicat-Methode ermittelt. In Arbeiten von (Sleiman, et al., 2010) wird ausführlich über die Anwendungsbreite der Vicat-Methode an Zementleim berichtet. In weiteren Untersuchungen nach (Ylmén, et al., 2009) wurde die frühe Hydratation bzw. das Abbindeverhalten von Portlandzement u. a. nach Vicat bestimmt.

Der mittels Ultraschall ermittelte dynamische E-Modul ist eine gängige Methode im Bereich der Forschung und Entwicklung zur Untersuchung von Bindebaustoffen (UltraTest GmbH, 2015). Nach (VDZ, 2008c) nimmt der E-Modul von Normalbeton mit der Festigkeit der Matrix, abnehmendem Matrixvolumen sowie dem E-Modul der Gesteinskörnungen zu. Er kann aus den E-Moduln und Volumenanteilen von Matrix sowie Gesteinskörnungen anhand von Modellen abgeschätzt bzw. rechnerisch ermittelt werden. Im Falle von Leichtbeton oder Mörteln muss der Einfluss der Rohdichte ρ auf den E-Modul zusätzlich rechnerisch berücksichtigt werden. Nach (Bogas J. A., et al., 2014) wurde der dynamische E-Modul modifizierter Normal- und Leichtbetone nach Zugaben von expandiertem Ton und Nanosilika untersucht. In den Untersuchungen wird über den Einfluss von Feuchte-Lagerung, Zementanteil, Art und Volumen der Gesteinskörnungen sowie der partiellen Substitution von Siebfractionen durch Zusatzstoffe auf den E-Modul berichtet.

Die Hydratation von Portlandzement kann mit unterschiedlichen Messmethoden wie der isothermen (und quasiadiabaten) Wärmeflusskalorimetrie (Kap. 2.5.7.3), REM- und Kryo-REM, XRD und XRF sowie der Messung der Oberfläche (BET, BLAINE)

ausgewertet werden (Brouwer, 2003; Fylak, 2011; Stark, et al., 2000b). Von (Abd Elaty, et al., 2014; Hossain, et al., 2007; Mosquera, et al., 2006; Oertel, et al., 2014a; Oertel, et al., 2014b; Schöler, et al., 2015; Turanli, et al., 2005; Wongkeo, et al., 2012) wurden puzzolanische Reaktionen spezieller Zusatzstoffe auf zementbasierte Systeme mittels XRD-Analysen nachgewiesen.

2.5.7.1 Hauptreaktionen

Aufgrund des großen Anteils von Calciumsilikaten im Zement (> 70 Ma.-%) ist deren Hydratation sowie die dabei entstehenden Calciumsilikathydrate (C-S-H-Phasen) und deren Eigenschaften von entscheidender Relevanz. Calciumsilikathydrate sind ärmer an CaO als die Calciumsilikate, weshalb sich bei der Hydratation des Portlandzements zusätzlich Calciumhydroxid (CH) bildet. Da Zement außerdem Aluminium- und Eisenoxid sowie Sulfat enthält, kommt es zur Bildung von Calciumaluminathydraten (C-A-H) und Calciumaluminatferrithydraten bzw. sulfathaltigen Verbindungen. Die beschriebenen Klinkerphasen (Kap. 2.5.3, Tab. 5) unterscheiden sich zum einen in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit, zum anderen in ihrem Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Zementsteins. Die Formeln 3 und 4 zeigen schematisch die unterschiedlichen Reaktionen der Calciumsilikate mit Wasser (Stark, et al., 2000b):

Schnelle Reaktion:

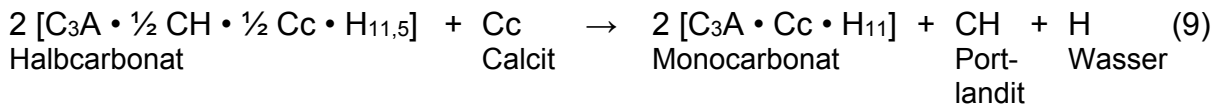


Langsame Reaktion:



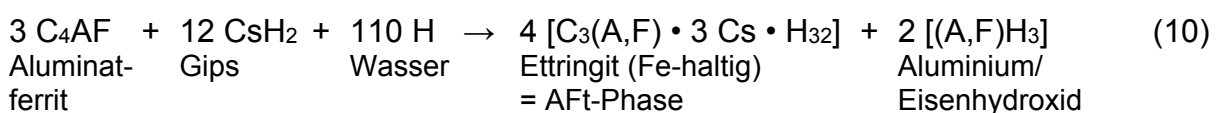
Aus den Formeln 3 und 4 lässt sich erkennen, dass der Alit größere Mengen an Portlandit bildet als der Belit.

Auch bei den aluminatischen Phasen gibt es eine Unterscheidung hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeiten. C₃A und C₄AF steuern das Abbinden des Zements. Das C₃A ist dabei das reaktivste Klinkermaterial und bestimmt, in Abhängigkeit vom Sulfatangebot sowie von Kohlenstoffdioxid CO₂, im Wesentlichen das Frühstadium der Hydratation. Ist wenig bis kein *Sulfat* (und CO₂) anwesend, kommt es zur spontanen Entstehung laminarer Calciumaluminathydrate (z. B. C₄AH₁₉) und später zur

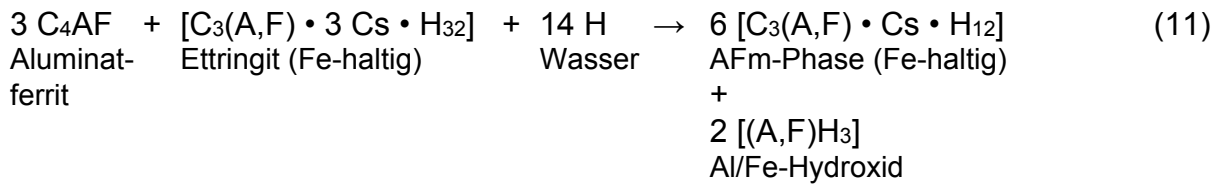
und Monocarbonat

In Arbeiten von (Bizzozero, et al., 2015; Martin, et al., 2015, Matschei, et al., 2007a & 2007b; Schöler, et al., 2015; Zajac, et al., 2014) wird im Allgemeinen über die Wirkungsweise von zugegebenem Kalksteinmehl (Carbonat) auf unterschiedliche Zementsysteme berichtet. Die Zugabe (in CEM I \leq 5 Ma.-%, CEM II \leq 35 Ma.-% nach DIN EN 197-1) führt zu einer Beschleunigung der Hydratation sowie zum sog. „Füller-Effekt“ des Kalksteins. Zudem wird der Zusammenhang von Calcium-Carbonat und Calcium-Sulfat beschrieben sowie die damit verbundene Auswirkung auf die Festigkeitsentwicklung. Nach (Bizzozero, et al., 2015) resultiert aus einem ansteigenden Gehalt an zugegebenem Kalkstein die Bildung von Ettringit und Halb- bzw. Monocarbonat. Nach (Schöler, et al., 2015) verhindert das Monocarbonat den Zerfall von Ettringit zu Monosulfat. Ist kein Carbonat anwesend, bildet sich bevorzugt Monosulfat. (Johannesson, et al., 2001) beschreiben einen Versuchsaufbau, mit welchem das Hydratationsverhalten von Portlandzement sowohl in Laborluft-Atmosphäre (CO₂-Einfluss), als auch unter CO₂-Ausschluss untersucht wurde.

Das C₄AF reagiert zu ähnlichen Verbindungen wie das C₃A, allerdings wesentlich langsamer und hat geringere Bedeutung. Es muss dafür ebenfalls mit einem Sulfat-träger verzögert werden. Aus einem entsprechend hohen Gehalt an Eisen in der Aluminat-Ferrit-Phase resultiert eine geringe Reaktionsgeschwindigkeit. Die Hydratation der Klinkerphase ergibt die gut kristallisierten Calciumaluminatferrithydrate. Diese werden in AFm (Al₂O₃-Fe₂O₃-mono) und AFt (Al₂O₃-Fe₂O₃-tri) sowie andere Phasen (z. B. Hydrogranat) eingeteilt. Ohne Zugabe eines Sulfat-trägers bilden sich AFm-Phasen, in denen Aluminium partiell durch Eisen ersetzt ist. Wird Sulfat angeboten entsteht Ettringit (Al gegen Fe substituiert); später bilden sich ebenfalls AFm- und teilweise auch AFt-Phasen (Formeln 10 und 11 bzw. Schritte 1 bis 2 nach (Stark, et al., 2000b)).

Schritt 1: Bildung der AFt-Phase

Schritt 2: Bildung der AFm-Phase



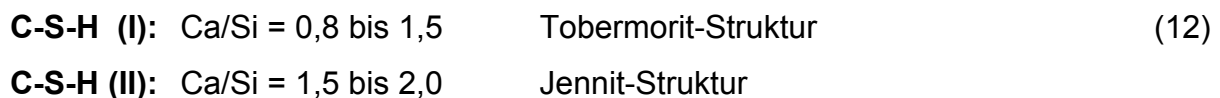
Von (Stark, et al., 2000b) wird ein weiteres Hydratationsmodell des C_4AF vorgestellt. Die langsame Hydratationsreaktion wird dabei auf eine Auslaugung des Aluminiums aus den C_4AF -Körnern zurückgeführt. Dieses reagiert mit dem Sulfatträger weiter zu Ettringit. In der Matrix bleiben Al-verarmte sowie Fe-angereicherte Körner bzw. Fe-Gele sichtbar. Zudem ist eine Bildung von sekundärem Gips möglich.

2.5.7.2 Hydratationsprodukte

Im Folgenden sind einige der wichtigsten Produkte der Zementhydratation genannt (Tabelle 9):

Calciumsilikathydrate / C-S-H-Phasen

Die Hydratation von Calciumsilikaten führt zur Entstehung der C-S-H-Phasen unterschiedlicher Stöchiometrie. Die Morphologie und Zusammensetzung ist dabei besonders von den Bildungsbedingungen und dem Bildungszeitpunkt abhängig. Es wird daher auf eine Koeffizientenangabe verzichtet, da diese nicht exakt möglich ist. C-S-H-Phasen werden i. d. R. nach ihrem molaren Ca/Si-Verhältnis (Taylor, 1990b) klassifiziert (Formel 12):



Die beiden Minerale Tobermorit und Jennit haben jeweils Schichtstruktur, in welchen Calcium-Lagen ($\text{Ca}(\text{OH})_6$ -Oktaeder) von linearen „Silikat-Dreier-Einfachketten“ in regelmäßiger Abfolge umgeben sind. Die Tetraeder aus $\text{Si}(\text{O},\text{OH})_4$ sind dabei so verknüpft, dass sich die Kettenabfolge nach jedem dritten Tetraeder wiederholt („Dreierketten“). Bei der 1,4 nm-Tobermorit-Struktur sind zwei Sauerstoff-Atome des nicht brückenbildenden Tetraeders ausschließlich über Ca-Ionen, bei der Jennit-Struktur hingegen nur ein Sauerstoff-Atom über Ca-Ionen und ein zweites über die Hydroxy-Gruppe verbunden. In den Calcium-Lagen sind die Ladungen mit OH^- ausgeglichen und die Protonen der Silanol-Gruppen durch Ca-Ionen substituiert.

Nach (Taylor, 1986) können die beiden Strukturen co-existieren, allerdings nur ungeordnet und bis zum Anmischen des Zementleims.

Von (Cong, et al., 1996; Diamond, 1976; Richardson, 2004a; Richardson, et al., 1992a & 1993a; Yu, et al., 1999) sind weitere Modelle beschrieben. Bezüglich des Wassergehalts in C-S-H-Phasen, wird nach (Taylor, 1990b) eine durchschnittliche Zusammensetzung von $1,7 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x \text{ H}_2\text{O}$ (mit $x = 1,3$ bis 4) angenommen. In aktuellen Arbeiten von (Königsberger, et al., 2016) wird, basierend auf dem Hydratationsmodell nach (Powers, 1958; Powers, et al., 1946) sowie Untersuchungen von (Muller, et al., 2013), die Massenverteilung von unterschiedlich gebundenem Wasser im Zementleim als Funktion des Hydratationsgrades (-fortschritts) und des Wasser-Zement-Wertes mithilfe der Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) dargestellt. Die Dichtigkeit des C-S-H-Gels ist dabei von dessen spezifischem „Ausfällungs-Bereich“ beeinflusst und durchläuft während der Hydratation drei unterschiedliche Stufen. Zunächst bilden sich an der Klinkeroberfläche feste C-S-H-Plättchen ohne Gel-Porosität aus. In der zweiten Stufe entsteht das C-S-H-Gel; das Volumen bzw. die Dichte des Gels steigt, wobei der „Ausfällungs-Bereich“ abnimmt. Die letzte Stufe beginnt dann, wenn das C-S-H-Gel die Kapillarporen vollständig aufgefüllt hat. Das Wasser ist hierbei zwischen den porösen C-S-H-Phasen unterschiedlich stark gebunden. Darüber hinaus wird bei den C-S-H-Phasen zusätzlich zwischen „outer (product)“ und „inner (product)“ unterschieden (Kurdowski, 2014b). Von (Kondo, et al., 1968) erfolgte die Aufteilung bzw. die Vergabe der Begriffe „inner“ und „outer“ C-S-H-Phasen. Das „inner product“ bildet sich auf den Alitkristallen bzw. auf den Oberflächen der Zementkörner, wohingegen das „outer product“ im Bereich zwischen den bereits hydratisierten Zementkörnern - vorher von Wassermolekülen eingenommen, gebildet wird. Die beiden C-S-H-Phasen-Typen haben unterschiedliche Morphologie. Die „inner“ C-S-H-Phasen bestehen aus Partikeln kleiner 10 nm; mit inneren Porendurchmessern kleiner 10 nm. Die „outer“ C-S-H-Phasen kristallisieren und wachsen als Agglomerate aus Fasern mit bis zu 100 nm Größe, mit dazwischen liegenden Kapillarporen. Einzelne Fasern sind etwa 10 nm lang und 5 nm breit.

In aktuellen Arbeiten von (Ullrich, 2015) wurde die Hydrothermalsynthese kristalliner und nanokristalliner Calciumsilikathydrate und dabei speziell die Bildung von Dicalciumsilikathydrat ($\alpha\text{-C}_2\text{SH}$) untersucht. Hierbei handelt es sich um Verbindungen, die als Zwischenprodukt bei der Herstellung eines neuartigen hydraulischen Bindemittels „Celiment“ entstehen. Die Bildung dieser Phasen erfolgt im Autoklaven bei 200°C .

Tabelle 9: Mögliche Hydratationsprodukte (u. a. wichtige AFt- und AFm-Phasen) von Portlandzement (Fylak, 2011)

Mineralname	Chemische Formel	Zementschreibweise	Abkürzung
Calciumsilikat-hydrat	$1,7 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 1,3 \dots 4 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_{1,7}\text{SH}_{1,3 \dots 4}$	C-S-H-Phasen
Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CH	CH
(Sulfat-) Ettringit	$[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot 24 \text{ H}_2\text{O}]$ $[3 \text{ SO}_4^{2-} \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{ Cs} \cdot \text{H}_{32}$	AFt-SO ₄
Carbonat-Ettringit	$[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot 24 \text{ H}_2\text{O}]$ $[3 \text{ CO}_3^{2-} \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{ Cc} \cdot \text{H}_{32}$	AFt-CO ₃
Thaumasit	$[\text{Ca}_6\text{Si}_2(\text{OH})_{12} \cdot 24 \text{ H}_2\text{O}]$ $[2 \text{ CO}_2^{2-} \cdot 2 \text{ SO}_4^{2-} \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_2\text{S} \cdot 2 \text{ Cc} \cdot 2 \text{ Cs} \cdot \text{H}_{32}$	-
Monosulfat	$[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]$ $[\frac{1}{2} \text{ SO}_4^{2-} \cdot 3 \dots 4 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Cs} \cdot \text{H}_{12 \dots 14}$	AFm-SO ₄
Monocarbonat	$[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]$ $[\frac{1}{2} \text{ CO}_3^{2-} \cdot 2,5 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Cc} \cdot \text{H}_{11}$	AFm-CO ₃
Mononitrat	$[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]$ $[\text{NO}_3 \cdot 1,5 \dots 2 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9 \dots 10 \text{ H}_2\text{O}$	-
Halbcarbonat	$[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]$ $[\frac{1}{2} \text{ OH} \cdot \frac{1}{4} \text{ CO}_3^{2-} \cdot 2,75 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot \frac{1}{2} \text{ CH} \cdot \frac{1}{2} \text{ Cs} \cdot \text{H}_{11,5}$	-
Monohydroxid	$[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6] [\text{OH} \cdot x \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CH} \cdot \text{H}_{12 \dots 18}$	TCAH, C ₄ AH _{13/19}
Monochlorid (Friedelsches Salz)	$[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6] [\text{Cl} \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}]$	$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_{10}$	-
Syngenit	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-	-
Hydrogranat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2[(\text{OH})_4]_3$	-	C ₃ AH ₆

Die Entstehung der C-S-H-Phasen erfolgt in Abhängigkeit von der Temperatur (Gallucci, et al., 2013). Von (Fonseca, et al., 2010; Rossen, et al., 2015; Scrivener, 1984; Scrivener, et al., 2007) werden die Morphologie und Unterschiede zwischen C-S-H-Phasen mittels Elektronenmikroskopie beschrieben. In Bild 9 ist die 1,4 nm-Tobermorit-Struktur grafisch dargestellt.

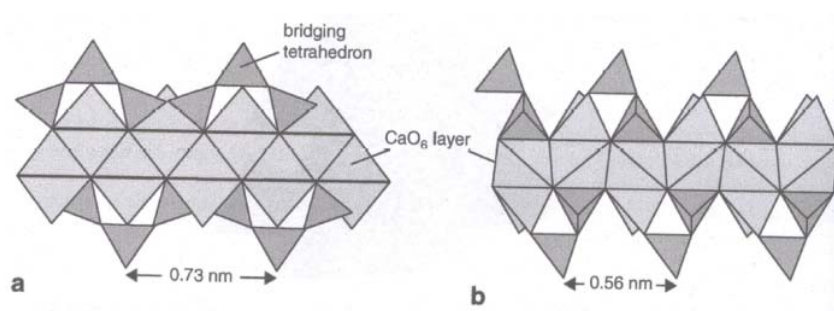


Bild 9: 1,4 nm-Tobermorit-Struktur: Projektionsebene (210) (links); Projektionsebene (010) (rechts). Die Calcium-Lagen sind in hellgrauer Farbe dargestellt (Chen, et al., 2004)

Die Formulierung „ $C_3S_2H_4$ “ gibt das ungefähre C/S-Verhältnis von 1,5 an und gilt als durchschnittliche Zusammensetzung (Foley, et al., 2012). Tatsächlich liegen jedoch nichtstöchiometrische Verbindungen $C_{3...3,4}S_2H_{0...3}$ mit variablem Wassergehalt vor.

Die C-S-H-Phasen sind die Hauptträger der Festigkeit des Zementsteins und die stabilsten Verbindungen unter den Hydratationsprodukten. Liegt eine starke CO_2 -Belastung vor, kann es nach der Carbonatisierung des Portlandzements auch zu einer Carbonatisierung der C-S-H-Phasen kommen, wobei sich diese in $CaCO_3$, Silikagel und Wasser zersetzen (Stark, et al., 2000b). Eine vollständige Carbonatisierung der Hydratphasen resultiert in einem massiven Festigkeitsverlust der Zementmatrix. Ferner kann, in Gegenwart von Sulfat und Carbonat, die Aufspaltung der C-S-H-Phasen zur Entstehung des Minerals „Thaumasit“ führen. Die C-S-H-Phasen nehmen mehr als die Hälfte des Volumens der Hydratphasen ein, bilden ein sehr dichtes Gefüge und sind für die wesentlichen Eigenschaften des Bindemittels (Erstarren, Festigkeitsentwicklung, Dauerhaftigkeit) verantwortlich. Je nach Hydratationszeitpunkt hat das sog. C-S-H-Gel unterschiedliche Morphologie. Es verfügt über geringe Teilchengrößen von 1 bis 10 nm (Zementklinker: 1 bis 10 μm) und hat eine spezifische Oberfläche von etwa 250 bis 300 m^2/g nach BET (Zement: etwa 0,4 m^2/g) (Stark, et al., 2000b). Von (Stemmermann, et al., 2010) wird die Bildung von C-S-H-Phasen bzw. die Hydratation von C_3S über Hydrolyse- und Kondensationsschritte beschrieben. Nach neuesten Arbeiten von (Tajuelo Rodriguez, et al., 2015) ist immer noch sehr wenig über die Morphologie der C-S-H-Phasen bzw. über den Zusammenhang zwischen Gestalt, chemischer Struktur und Zusammensetzung bekannt. In der Literatur wurden bereits zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten über verschiedene Struktur-Modelle diskutiert (Chen, et al., 2004; Garrault, et al., 2001; Grudemo, 1954; Jennings, 1986 & 1999; Kalousek, et al., 1958; Nonat, 2004; Nonat, et al., 1998; Richardson, 2004b & 2007 & 2014; Richardson, et al., 1992b & 1993b; Taylor, 1993; Taylor, et al., 2010). (Tajuelo Rodriguez, et al., 2015) beschreiben hierzu die Synthese von C-S-H-Phasen bei kontrollierten Zementleim-Konzentrationen mit und ohne den Einsatz von Beschleunigern. Aus den Untersuchungen ergab sich ein Zusammenhang zwischen dem Silikat-Anion und der Morphologie der C-S-H-Phasen in Abhängigkeit vom Ca/Si-Verhältnis bzw. der C_3S -Hydratation (CaO-Gehalt). Je nach Verhältnis bilden sich entweder folien- oder faserförmige Calciumsilikathydrate aus.

Portlandit

Bei der Zementhydratation entsteht Calciumhydroxid (Formel 3 und 4). Das Produkt wird, wie das seltene und natürlich-vorkommende Mineral, als Portlandit bezeichnet. Es besteht aus großen hexagonalen Plättchen (Bild 10.1) und ist mitverantwortlich für den hohen pH-Wert (13,1) des Zementleims sowie die Erhärtung des Zementsteins. Durch das Auffüllen von Porenraum leistet der Portlandit nur einen passiven Beitrag zur Festigkeitsbildung und wirkt gleichzeitig festigkeitsbegrenzend (Stark, et al., 2000b). Außerdem schützt er den Bewehrungsstahl im Beton vor Korrosion. Bild 10.1 zeigt die REM-Aufnahme eines Zementsteins (CEM I), in welcher Portlandit als kristalliner, plattenförmiger Kristall erkennbar ist (Schmidt, 2008). Darüber hinaus ist die Struktur von Portlandit grafisch dargestellt (Bild 10.2). Es liegt oktaedrische Koordination der Ca-Atome vor. Die Kristalle sind dabei aus in c-Richtung gestapelten Ca^{2+}/OH -Schichten aufgebaut und über schwache Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden. Das Calciumhydroxid weist eine vergleichsweise hohe Löslichkeit sowie Instabilität bei saurem Angriff auf. Beim Kontakt mit Luft (CO_2) kommt es zur diffusionsgesteuerten Carbonatisierung des Portlandits zu Calcit (Formel 13), wodurch eine Gefügeverdichtung resultiert und somit ein erneutes und schnelles Eindringen von CO_2 in die Mörtelmatrix unterbunden wird. Mit einer eingehenden Carbonatisierung sinkt der pH-Wert im Mörtel deutlich ab (von pH-Wert 10 bis 13 auf etwa pH-Wert 8) wobei die Passivierung des Bewehrungsstahls verloren geht (Locher, 2000f). Jedoch kann die Reaktion auch eine Erhöhung der Druckfestigkeit von bis zu 25 % bewirken (Stark, et al., 2000b).

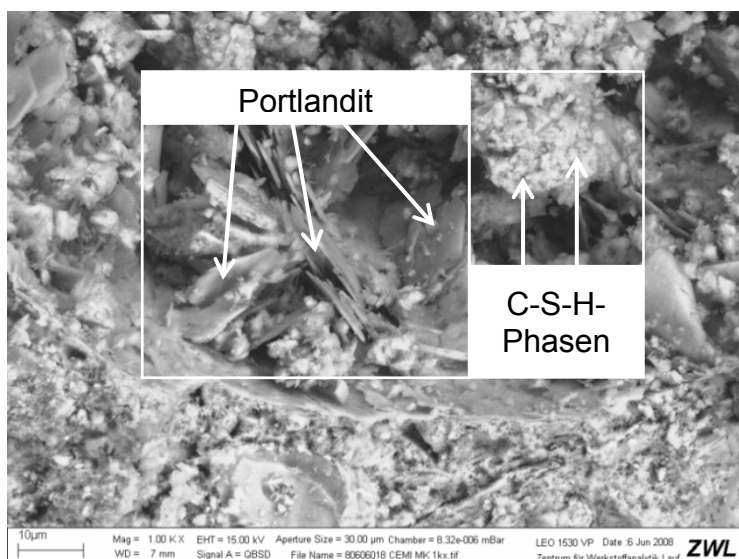


Bild 10.1: REM-Aufnahme von Portlandit und C-S-H-Phasen in Zementstein (CEM I)

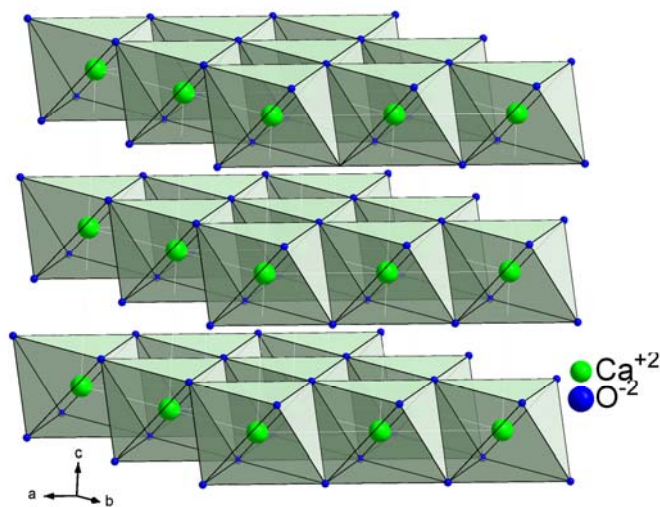
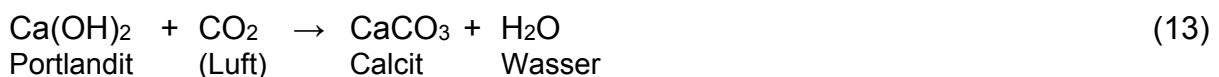


Bild 10.2: Struktur von Portlandit (Wenda, 2011b)

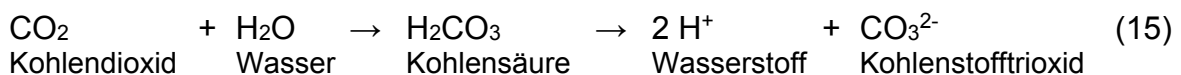
Carbonatisierung von Portlandit unter Anwesenheit von H₂O (vereinfachte Formel):

Nach (Stark, et al., 2013) wird der Carbonatisierungsvorgang als eine Reihe von Zwischenstufen unterschiedlicher Einflussgrößen beschrieben:

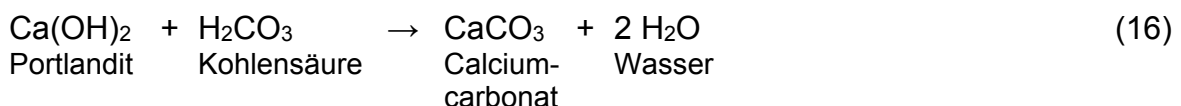
1. Diffusion von CO₂ durch die Kapillarporen des Mörtels sowie parallel dazu Dissoziation des kristallinen Ca(OH)₂ im Feuchtfilm an der Porenwandung (Formel 14):

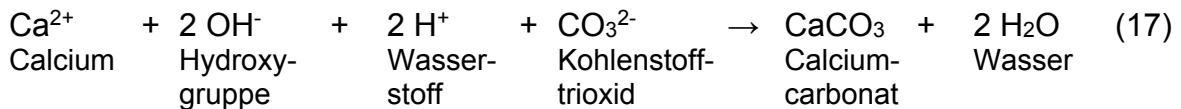


2. Reaktion bzw. Lösen des CO₂ im Feuchtfilm an der Porenwandung. Das gelöste CO₂ reagiert zu einem sehr geringen Teil mit Wasser zu Kohlensäure, die in Wasser zu Wasserstoff- und Carbonat-Ionen dissoziiert (Formel 15):

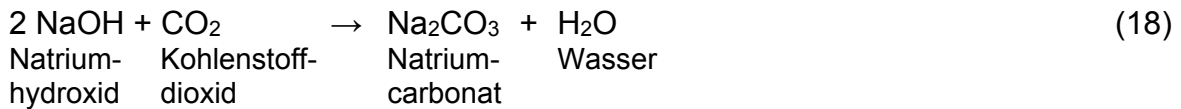


3. Neutralisation des Ca(OH)₂ durch H₂CO₃. Eigentliche Carbonatisierungsreaktionen (Formel 16 bis 20):

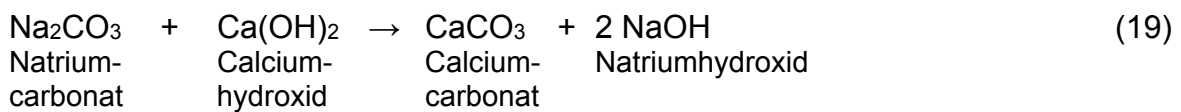




Parallele Carbonatisierung der Alkalihydroxide NaOH und KOH:

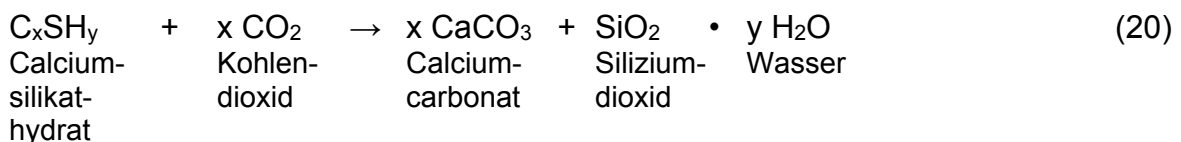


Die dabei entstehenden Alkalicarbonate reagieren umgehend mit dem gelösten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu Calciumcarbonat und Alkalihydroxid:



Das Verhalten von KOH ist dem von NaOH vergleichbar.

Die Alkalihydroxide carbonatisieren erst, wenn sich kein $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mehr in der Porenlösung befindet. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wird in der Porenlösung jedoch ständig nachgeliefert, da infolge der Carbonatisierung ein Mangel an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in der Porenlösung entsteht und dieser zu einer Dissoziation der festen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Kristalle (Portlandit) aus dem Zementstein führt. Neben den Alkali- und Erdalkalihydraten können auch die C-S-H-Phasen carbonatisieren:



Die Carbonatisierung des Betons/Mörtels wird darüber hinaus von einigen Faktoren beeinflusst (Stark, et al., 2013):

- CO_2 -Konzentration (etwa 800 mg/cm^3)
- Luftschadstoffe
- Feuchtigkeit und Temperatur
- w/z-Wert (w/m-Verhältnis)
- Zementsorte
- Nachbehandlung des Betons/Mörtels
- Gesteinskörnungen, Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Für eine stattfindende Carbonatisierung ist die Feuchtigkeit der notwendigste Faktor bzw. Reaktionspartner. Durchfeuchteter bzw. wassergesättigter Beton/Mörtel nimmt praktisch fast kein CO_2 auf; es findet keine Carbonatisierung statt. Die Diffusion im Gasraum ist etwa 10000-mal schneller als in Wasser; in wassergefüllten Poren findet daher eine extrem langsame Diffusion statt. In vollständig trockenem Zementstein findet ebenfalls keine Carbonatisierung statt, da ohne Feuchtigkeit die chemische Reaktion der Carbonatisierung nicht ablaufen kann. Der Diffusionskoeffizient von CO_2 beträgt:

- $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{g}$ im Gasraum
- 0,8 bis $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{g}$ in Wasser

Vor allem der w/z-Wert hat einen entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit und Tiefe der Carbonatisierung sowie Dauerhaftigkeit von Mörtel. Ein ansteigender w/z-Wert hat eine Erhöhung des Kapillarporenraumes und somit der Gasdurchlässigkeit des Mörtels zur Folge. Der Carbonatisierungsfortschritt ist außerdem vom Zementgehalt und der Zementart abhängig. Es gilt, je größer die Menge an gebildetem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, umso mehr CO_2 wird gebunden. Nach (Bier, 1988) entstehen bei der Carbonatisierung neue Phasen, die ein insgesamt größeres Volumen als die ursprünglichen Phasen einnehmen, wodurch die Porosität des Zementsteins in der carbonatisierten Zone verringert und der Diffusionswiderstand erhöht wird. Bei der Verwendung von Zementen mit hohem Klinkeranteil (CEM I) ist ein langsamerer Carbonatisierungsfortschritt zu beobachten. Darüber hinaus ist die Porenstruktur unterschiedlicher Zementmischungen bzw. abgebundener Zementsteine abhängig vom w/z-Wert, von der Zementart und der Aushärtungszeit. Für grobe Porenstrukturen und niedrige Portlandit-Gehalte nimmt die Carbonatisierungstiefe zu (Bier, 1986). Nach (Kidokoro, et al., 1984) haben Betone mit leichten Gesteinskörnungen im Vergleich zu normalen Gesteinskörnungen einen geringeren Widerstand gegenüber dem Eindringen von CO_2 und Luftfeuchtigkeit; der Carbonatisierungsfortschritt ist größer als bei „Normalbetonen“. Die Verwendung von Zusatzstoffen wirkt sich bei sachgerechter Herstellung und ausreichender Nachbehandlung („curing“) verzögernd auf die Carbonatisierung aus (Schießl, 1990). Eine puzzolanische Reaktion führt zu einer Verdichtung des Porengefüges und folglich zu einer Reduzierung der Durchlässigkeit des Mörtels gegenüber CO_2 und Feuchtigkeit. Nach (Stark, et al., 2013) kann die Carbonatisierung u. a. mit folgenden Verfahren beschrieben werden:

- Mikroskopie
- Röntgendiffraktometrie
- Differential-Thermoanalyse

(Cultrone, et al., 2005; Lanas, et al., 2003; Lawrence, et al., 2006) untersuchten die Carbonatisierung unterschiedlicher Mörtel mit Hilfe röntgenographischer und/oder thermogravimetrischer Analysen. Mit thermogravimetrischen Methoden können sowohl Zementpulver, als auch hydratisierter Zementstein bzw. Dünnbettmörtel untersucht werden. Aus dem in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragenen Masseverlust kann für unterschiedliche Temperaturen ein Zusammenhang zwischen den Hydratationsprodukten oder auch den verschiedenen Phasenbestandteilen des Mörtels erkannt werden. Von (Netzsch, 2016) wurden thermogravimetrische und kalorimetrische Analysen im Temperaturbereich von RT bis 1500 °C an einem Zementpulver durchgeführt. Im genannten Bereich konnten mehrere Masseverluststufen sowie endotherme und exotherme Peaks identifiziert werden. Dabei handelt es sich u. a. um einen Wasserverlust des Gipses bei niedrigen Temperaturen (< 200 °C) und des Ca(OH)_2 bei einer Temperatur von etwa 480 °C. Aus den Untersuchungen geht außerdem hervor, dass im Temperaturbereich von 300 bis 400 °C ein Verbrennen von organischen Bestandteilen stattgefunden hat. Bei einer Temperatur von etwa 800 °C kam es zur Decarbonatisierung des CaCO_3 , welches durch Carbonatisierung aus Calciumhydroxid entsteht. Nach (Schmidt, 2008) konnte durch thermogravimetrische Analysen an PZ-basierten Zementen im Temperaturbereich bis 400 °C ein kontinuierlicher Wasserverlust beobachtet werden. Ab einer Temperatur von etwa 440 °C spaltete Calciumhydroxid Wasser ab; dieser Prozess war bei 550 °C beendet. Ab etwa 700 °C begann die Decarbonatisierung. Von (Zhi, et al., 2016) wurden Untersuchungen mittels TG und DSC an einem modifizierten Dünnbettmörtel durchgeführt. Im Vordergrund der Messungen standen der Nachweis sowie die prozentuale Bestimmung des Ca(OH)_2 -Abbaus. Im Temperaturbereich von 420 bis 460 °C zeigten sich endotherme Peaks unterschiedlicher Höhe, die sich auf eine Zersetzung des Calciumhydroxids zurückführen lassen. Die Decarbonatisierung des CaCO_3 fand bei 737,9 °C statt. Nach (Manns, 1975; Scheydt, 2013) findet die Entwässerung des Portlandit im Temperaturbereich zwischen 400 bis 450 °C statt. Weitere Untersuchungen von u. a. (Di Bella, et al., 2015; Moropoulou, et al., 2004; Paya, et al., 2000) beschäftigen sich ebenfalls mit der thermogravimetrischen Analyse von Mörteln und

zeigen den Masse- bzw. Wasserverlust der Hydratationsprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur.

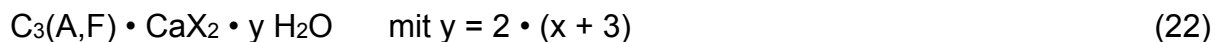
AFm-Phasen / Monophasen

Bei der Hydratation von C_3A und C_4AF aber auch beim „schnellen Erstarren“ von Portlandzement bilden sich sog. Monophasen. Es handelt sich dabei um Hydrate der allgemeinen Zusammensetzung (Formel 21) nach (Wenda, 1984):



mit $X = 1$ Formeleinheit eines einfach-geladenen Anions oder
 $\frac{1}{2}$ Formeleinheit eines zweifach-geladenen Anions

Das “mono” resultiert aus einer etwas anderen Schreibweise und bedeutet: eine Formeleinheit CaX_2 pro Formeleinheit $\text{C}_3(\text{A,F})$ (Formel 22):

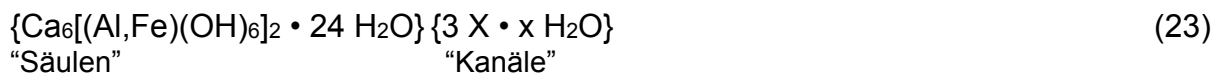


Monophasen haben charakteristische Schichtstruktur mit positiv geladenen Hauptschichten $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]$, in welchen oktaedrische Lücken geordnet von Ca^{2+} und $\text{Al}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ besetzt sind. Alle Verbindungen bilden (pseudo-)hexagonale, plättchenförmige Kristalle aus. AFm-Phasen verfügen über chemische Variabilität, indem der Einbau vieler verschiedener Anionen als „X“ möglich ist. In der Zementchemie ist dies OH^- , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} und NO_2^- . Zudem können die Phasen mehr als eine Anionenart enthalten und bilden untereinander Mischkristalle sowie intermediäre Verbindungen. Anstelle von Ca^{2+} , Al^{3+} oder Fe^{3+} ist auch der Einbau anderer Kationen möglich. (Pöllmann, 1984) und (Wenda, 1984) beschrieben seinerzeit die Möglichkeit der Mischkristallbildung sowie die Existenz verschiedener Hydratstufen. (Baquerizo, et al., 2015) berichten über die AFm-Phase und die Stabilität einzelner Hydratstufen (Halb- und Monocarbonat, Strätlingit (Gehlenit), Hydroxyl-AFm, Monosulfat) in Abhängigkeit von der Temperatur, dem Anionen-Typ sowie dem Wassergehalt (relative Luftfeuchtigkeit). Unter Carbonatausschluss ist das Halbcarbonat stabil; tendiert bei hohen Temperaturen und mit andauernder Trocknungszeit jedoch zum Zerfall zu carbonatisiertem Halbcarbonat sowie Hydrogranat und Portlandit. Von (Baquerizo, et al., 2014) wird zudem der Einfluss variierender Luftfeuchtigkeit und Temperatur auf

die Struktur sowie thermodynamischen Eigenschaften von Salzen und kristallinen Zementhydraten bei unterschiedlichen Hydratstufen beschrieben. Die Untersuchungen liefern neueste Erkenntnisse hinsichtlich der De- und Re-Hydratation des Monosulfats. Diese können auf andere Hydratstufen der AFm- sowie AFt-Phasen von u. a. Portlandzement übertragen werden.

AFt-Phasen / Ettringit

Die AFt-Phasen bzw. die gesamte AFt-Gruppe wird oft nach ihrem natürlich vorkommenden Vertreter dem Ettringit benannt. Es sind Phasen der allgemeinen Zusammensetzung (Formel 23) nach (Pöllmann, et al., 1989):



mit X = 1 Formeleinheit eines einfach-geladenen Anions oder
2 Formeleinheiten eines zweifach-geladenen Anions

Das „tri“ bezieht sich auf die alternative Schreibweise (Formel 24):



In der Zementhydratation ist der Sulfat-Ettringit der wichtigste Vertreter der AFt-Gruppe. Der Begriff „Ettringit“ steht dabei als Abkürzung für Sulfat-Ettringit oder Mischkristalle aus Sulfat-, Carbonat- und Hydroxid-Ettringit. Sulfat-Ettringite bilden fast immer einen nadeligen oder säuligen Habitus aus. AFt-Phasen bilden sich während der frühen Reaktionsphase (Formeln 6 bis 11), aber auch nach (Formel 21) sowie durch Sulfateinwirkung von außen („sulfate attack“). Nach der Wasserzugabe entstehen trigonale oder pseudotrigonale Nadeln oder Prismen auf den aluminatischen Klinkerkornoberflächen. Ihre Struktur besteht aus Säulen der Zusammensetzung $\{\text{Ca}_6[(\text{Al},\text{Fe})(\text{OH})_6]_2 \cdot 24 \text{H}_2\text{O}\}$ parallel der c-Achse angeordnet; in den Zwischenräumen werden die Anionen $\{3 \text{SO}_4^{2-} \cdot 0 \dots 6 \text{H}_2\text{O}\}$ eingelagert sowie weitere H_2O -Moleküle.

Nach (Pöllmann, 1989; Pöllmann, et al., 1989; Wenda, 1984) ist es wie bei den AFm-Phasen möglich, die Anionenplätze durch SO_4^{2-} , CrO_4^{2-} , CO_3^{2-} , NO_3^- , OH^- , $\text{B}(\text{OH})_4^-$ oder SO_3^{2-} zu besetzen. Das Al^{3+} der Säulen kann außerdem durch Fe^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{4+} oder auch Si^{4+} teilweise substituiert werden. In Bezug auf zementgebundene Systeme

me sind der Sulfat- und Carbonat-Ettringit sowie der Thaumasit (Tabelle 9) oder Hydroxid-Ettringit wichtige AFt-Phasen.

(Cuesta, et al., 2015) berichten über das Hydratationsverhalten von C_4AF in An- und Abwesenheit von Gips und Ye' elemit bei unterschiedlichen w/z-Werten. Die Untersuchungen zeigen, dass sich in der Mischung aus C_4AF , Gips und Ye' elemit sowohl AFt-, als auch AFm-Phasen bilden; Ye' elemit hemmt dabei die C_4AF -Hydratation. Aktuelle Arbeiten von (Zhou, et al., 2017) zeigen, dass ein niedriges Ca/Si-Verhältnis (3) einer Beton- oder Mörtelmischung, eine sechsmonatig andauernde Ettringit-Bildung bewirkt. Thaumasit hingegen bildet sich bei höheren Ca/Si-Verhältnissen (9) innerhalb von nur drei Tagen. Durch ein kontrolliert niedrig gehaltenes Ca/Si-Verhältnis ist es somit möglich, die Thaumasit-Bildung effektiv zu verhindern. In weiteren Untersuchungen von (Ramezaniapour, et al., 2012) wird ebenfalls über die Thaumasit-Bildung bzw. einen Sulfat-Angriff in unterschiedlichen Portlandzement-Mischungen bei 5 °C berichtet. Die Entstehung von Thaumasit hat dabei einen negativen Einfluss auf die Mikrostruktur der Zemente, welcher zu großflächigen Rissen in den untersuchten Mörtelproben führt. Nach (Shi, et al., 2016) nimmt die Wahl eines geeigneten Verflüssigers deutlichen Einfluss auf die Stabilität der Ettringit-Bildung bzw. Morphologie dieser Phase. Durch die Verwendung von Naphtalinsulfonat als Verflüssiger ist es möglich, eine stabile und kompakte Struktur von Ettringit-Kristallen zu erzielen.

2.5.7.3 Reaktionskinetik und Gefügeentwicklung im Zement

Die Hydratation von Portlandzement ist eine Folge von sich überlappenden und gegenseitig beeinflussenden, chemischen Reaktionen zwischen den Klinkerkomponenten, Zumahlstoffen, Sulfatträgern, Zugabewasser und ggf. Additiven. Nach (Locher, 2000b; Scrivener, 1984; Scrivener, et al., 2011; Stark, et al., 2000b) lässt sich die Hydratation des Portlandzements in vier bis fünf Reaktionsphasen aufteilen. Während der Portlandzement-Hydratation liegen zunächst unhydratisierte, polymineralische Zementkörner aus ineinander verwachsenen Klinkerphasen C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF vor. Nach etwa 10 Minuten reagiert C_3A teilweise mit Calcium-Sulfat in Lösung; es kommt zur Bildung von amorphem, aluminatreichem Gel in Form von kurznadeligem Ettringit an der Oberfläche des C_3A sowie in der Lösung. Nach 10 Stunden bilden sich „outer“ C-S-H-Phasen an den nadelförmigen AFt-Phasen (Ettringit) sowie

Portlandit; der Abstand zwischen Kornoberfläche und Hydrathülle beträgt ungefähr 1 μm . Nach wiederum 18 Stunden findet die zweite Phase der C_3A -Hydratation statt; die Ettringitnadeln wachsen weiter und „inner“ C-S-H-Phasen beginnen sich an der Innenseite der Ettringithülle zu bilden. Die Hydratation des C_3A ist fortschreitend, die Menge an Portlandit zunehmend. Nach etwa 48 Stunden reagiert das C_3A mit dem Ettringit beliebig zu hexagonalen Plättchen aus AFm-Phasen im Inneren der Hülle. Das andauernde Wachstum von „inner“ C-S-H-Phasen verhindert dabei eine räumliche Trennung des unhydratisierten Zementkorns von der Hydrathülle. Nach 14 Tagen hat sich ausreichend viel „inner“ C-S-H gebildet um den Raum zwischen dem Zementkorn und der Hydrathülle auszufüllen; die „outer“ C-S-H-Phasen haben bis dahin faserige Struktur entwickelt.

Für die Reaktionskinetik von Portlandzement (speziell die Dauer der Induktionsperiode) existiert nach wie vor kein vollständiges Modell, weshalb diese Thematik Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist. Neueste Entwicklungen werden u. a. von (Bellmann, et al., 2015; Juilland, et al., 2015; Scherer, et al., 2012; Scrivener, et al., 2015) beschrieben. (Bullard, et al., 2011; Fylak, 2011) berichten über das frühe Hydratationsverhalten von Portland- und Portlandkompositzementen. Von (Stark, 2011) wurden ausführliche Studien bezüglich des komplexen Hydratationsverhaltens angefertigt. (Thomas, et al., 2011) berichten über die Möglichkeiten der Modellierung und Simulation von Hydratationskinetik und Gefügeentwicklung. Die Hydratation von Portlandzement wird mit der Wärmeflusskalorimetrie gemessen und führt zur Einteilung der Reaktionsphasen in Start-, Induktions-, Beschleunigungs- und Abklingperiode (Locher, 2000a). Bei der isothermen Wärmeflusskalorimetrie handelt sich um eine etablierte Messmethode zur Untersuchung der Hydratationskinetik von Zement- bzw. Mörtelmischungen. Sie ist Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten. (Götz-Neunhoeffler, 2006; Kuzel, 1984) beschreiben den Aufbau, Einsatzmöglichkeiten sowie Weiterentwicklungen verschiedener Messsysteme. Die Probenpräparation hat hierbei entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse von kalorimetrischen Untersuchungen an Zement/Mörtel. Von (Götz-Neunhoeffler, 2006; Kuzel, 1984; Pöllmann, et al., 2017) werden grundsätzlich zwei Präparationsvarianten unterschieden und diskutiert. Dabei handelt es sich zum einen um die „Einspritz-Methode“, bei der das Zugabewasser mittels Spritze in die Tiegel zugegeben wird. Zum anderen kann die Präparation durch „Externes Anmischen“ erfolgen. Hierfür werden die entsprechenden Mörtel-Mischungen außerhalb der Tiegel vermischt, der Frischmörtel anschließend in

die Tiegel eingewogen und diese in das Kalorimeter eingebaut. Die Messung kann in diesem Fall erst nach einer systemabhängigen Präparationszeit von etwa zwei bis acht Minuten beginnen. Nach (Fylak, 2011) liefert die Einspritz-Methode weniger stabile Wiederholungsmessungen als das „Externe Anmischen“. Aufgrund der besseren Reproduzierbarkeit wurde daher, im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit, das „Externe Anmischen“ als Standardmethode gewählt. (Schöler, et al., 2016) berichten über die Hydratationskinetik und Entstehung von Porenlösung eines Portlandzements nach Substitution von Zementanteilen durch Zusatzstoffe. Die Zugaben bewirken sowohl eine Veränderung der Porenlösung, als auch des Wärmeflusses. In Untersuchungen von (Mostafa, et al., 2005) wurde die Hydratationskinetik der ersten 45 Stunden eines Portlandzements nach Zugabe von Kieselsäure mittels Wärmeflusskalorimetrie bestimmt. Puzzolanische Zusätze wie Kieselsäure bewirken dabei eine Abnahme des Wärmeflusses während der Hydratation des C_3S . Von (Frølich, et al., 2016) wird ein Zusammenhang der Hydratationswärme mit der Frühfestigkeit von Zement beschrieben. Aus den Untersuchungen geht eine starke Korrelation der Messwerte innerhalb der ersten 24 Stunden hervor. Dadurch kann die Messung des Wärmeflusses als eine Alternative zur Bestimmung der Frühfestigkeit von Zement herangezogen werden. Weitere Untersuchungen von (Fylak, 2011; Raab, 2010) beschäftigen sich ebenfalls mit der Hydratationskinetik von u. a. Portland- sowie Tonerdezementen. In aktuellen Arbeiten von (Kaden, et al., 2017) wird u. a. über die Qualitätskontrolle von Portlandzementen sowie Reaktionskinetik unterschiedlicher Zementarten und modifizierter Mörtel mittels Wärmeflusskalorimetrie berichtet. Im Falle der Zugabe von puzzolanischen Zuschlagstoffen im System erfolgt während der Abklingperiode die Umsetzung des reaktiven SiO_2 und $Ca(OH)_2$ zu C-S-H-Phasen (Kap. 2.5.7.1, Formeln 3 und 4).

2.5.8 Zementstein- und Mörtel Eigenschaften

Neben der Festigkeit und Dauerhaftigkeit zählen die Dichtigkeit sowie ein geringes Schwinden zu den wichtigsten Qualitätsmerkmalen von Beton/Mörtel. Die Beton-/Mörtel Eigenschaften sind insbesondere abhängig vom Zuschlag (porenfrei, fest) sowie der Verdichtung und den Eigenschaften des Zementsteins. Nach (Powers, 1947; Stark, et al., 2000f) setzt sich der Zementstein aus folgenden Bestandteilen zusammen:

2.5.8.1 Hydratationsprodukte

Hierbei handelt es sich um C-S-H-Phasen (kristallin bis kolloid), adsorptiv gebundenes Gelwasser in den Gelporen, Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie Calciumaluminat(ferrit)sulfathydrate (Ettringit und ggf. Monosulfat sowie AFm und AFt).

2.5.8.2 Unhydratisierter Zement

Unhydratisierter Zement oder auch nichtumgesetzter Zement sind Klinkerkörner im erhärteten Zement, die mit Wasser keine Reaktion eingegangen sind. Dies ist z. B. der Fall, wenn ein niedriger Wasser-Zement-Wert verwendet wurde. (Lv, et al., 2012) berichten über die selbstheilende Wirkungsweise von unhydratisierten Zementkörnern auf bereits vorhandene Risse im Zementstein anhand eines gerechneten Modells. Das Phänomen der „Selbstheilung“ kann vor allem in älteren Beton-/Mörtelstrukturen beobachtet werden, indem sich Hydratationsprodukte unter Anwesenheit von Regenwasser oder Kohlendioxid neu bilden und dadurch Mikrorisse auffüllen bzw. ausbessern.

2.5.8.3 Poren

Die Porosität im Zementstein umfasst alle Poren der Größe 1 nm bis größer 1 mm. Bei einem w/z-Wert von bspw. 0,5 beträgt das Porenvolumen etwa 46 %. Der Großteil der Poren im Zementstein ist allerdings kleiner 10 nm und daher praktisch undurchlässig, da das Wasser in den kleinen Poren, aufgrund von Adhäsionskräften wie ein Dichtungsmittel wirkt. Mit zunehmendem w/z-Wert entstehen mehr und größere Poren (Stark, et al., 2000c). Durch die Zugabe von Zusatzstoffen wie bspw. Silikastaub verändert sich die Porengrößenverteilung fortwährend. Bild 11 zeigt die unterschiedlich auftretenden Porenarten im Zementstein. Nach ISO 15901 (Teil 1 bis 3) sind die werkstofftechnischen Eigenschaften eines Feststoffs wie bspw. Festigkeit, Reaktivität, Permeabilität, etc. in erster Linie von dessen Porosität bzw. Porenstruktur beeinflusst. Für die Bestimmung wurden diesbezüglich bereits einige Messverfahren entwickelt (Bild 11). Aufgrund der Komplexität der meisten Feststoffe, ist hierfür oftmals eine Kombination mehrerer Verfahren notwendig.

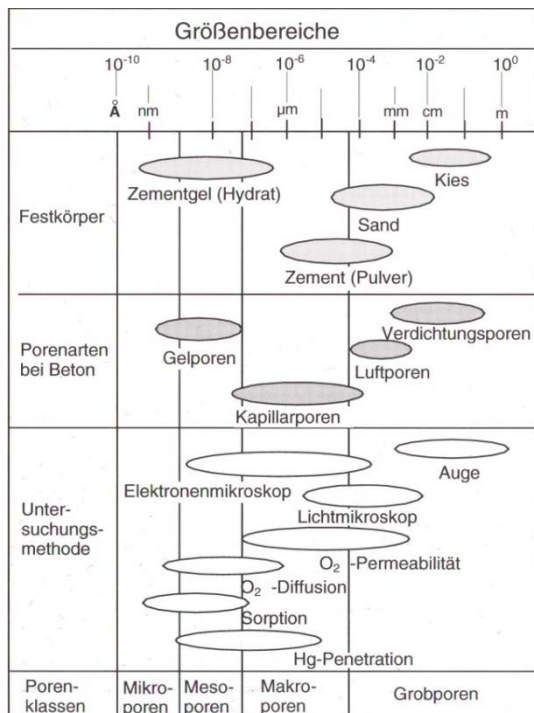


Bild 11: Poren-Größenbereiche von Feststoffen sowie Reichweite der Messverfahren nach (Romberg, 1978; Stark, et al., 2000f)

Die Auswahl einer geeigneten Methode ist dabei von der Anwendung des Feststoffs, seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie dem Porengrößenbereich abhängig. Die am häufigsten genutzten Untersuchungsmethoden sind:

- Hg-Penetration bzw. Quecksilberporosimetrie: die Poren werden dabei unter Druck mit Quecksilber gefüllt; geeignet für Materialien mit Porendurchmessern im Bereich 0,003 bis 400 μm. Von u. a. (Arandigoyen, et al., 2007; Arora, et al., 2016; Berodier, et al., 2015; Chen, et al., 2014; Gao, et al., 2014b; Gao, et al., 2016; Just, et al., 2009; Oltulu, et al., 2014; Uzal, et al., 2012; Yu, et al., 2013; Zeng, et al., 2012a & 2012b; Zhou, et al., 2010) wurde die Quecksilberporosimetrie zur Untersuchung der Porenstruktur zementgebundener Systeme erfolgreich angewandt.
- Meso- und Makroporenanalyse durch Gasadsorption: die Poren werden hierfür hinsichtlich der Adsorption eines Gases (Stickstoff) bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff charakterisiert; geeignet für Materialien mit Porendurchmesser von 0,002 bis 0,1 μm. In Untersuchungen von (Bazant, et al., 2012; Bažant, et al., 2012; Beaudoin J. J., 2002; Belie, et al., 2010; Espinosa, et al., 2006; Ferrari, et al., 2010; Garci Juenger M. C., et al., 2002; Kaufmann, 2010; Kaufmann, et al., 2009; Kupwade-Patil, et al., 2016; Schmidt, et al., 2009; Sugrañez, et al., 2013;

Thommes, et al., 2015) wurde die Stickstoff Adsorption zur Untersuchung der Mikrostruktur von u. a. Mörtel/Zement durchgeführt.

- Mikroporenanalyse durch Gasadsorption: die Poren werden durch Adsorption eines Gases (Stickstoff) bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff charakterisiert; die Methode eignet sich für Porendurchmesser von 0,4 bis 2,0 nm.

Es folgt eine Einteilung in Makro-, Meso- und Mikroporen (Tabelle 10):

Tabelle 10: Poren-Art und Porengrößenbereiche nach ISO 15901

Poren-Art	Porendurchmesser d_P [nm]
Makroporen	> 50
Mesoporen	2 - 50
Mikroporen	< 2

Nach Bild 11 bzw. (Romberg, 1978) werden Poren im Zementstein wie folgt unterteilt:

Verdichtungsporen

Verdichtungsporen sind als Poren größer 1 mm klassifiziert und entstehen durch eine unvollständige Verdichtung des Betons/Mörtels. Ihre Form lässt sich als unregelmäßig beschreiben.

Luftporen

Luftporen haben eine Größe von 1 μm bis 1 mm. Sie werden beim Anmachen des Betons/Mörtels eingebracht und können durch die anschließende Verdichtung nicht vollständig ausgetrieben werden. Bei den Luftporen handelt es sich um die im Zementstein vorkommenden größten Poren, die zum Teil mit dem bloßen Auge zu erkennen sind. Ihre Form lässt sich als kugelförmige Hohlräume beschreiben. Bei bestimmten Anwendungen wie bspw. zur Erhöhung des Frost-Tau-Widerstandes werden diese gezielt durch Luftporenbildner (LP-Mittel) eingebracht. Die auf diese Art erzeugten Poren liegen im Porengrößenbereich kleiner 300 μm .

Kapillarporen

Kapillarporen entstehen durch überschüssiges Wasser, welches dem Beton/Mörtel zur entsprechenden Verarbeitungskonsistenz zugegeben wird und nicht an der Hy-

dratation teilgenommen hat. Es wird dabei weder chemisch noch physikalisch gebunden. Bei der Erhärtung des Zementsystems bilden sich je nach Lagerungsart (in Wasser oder an Luft) leere, teils oder ganz mit Wasser gefüllte Poren der Größe zwischen 10 nm bis 100 µm. Ihre Form lässt sich ebenfalls als kugelförmige Hohlräume beschreiben. Darüber hinaus sind sie verantwortlich für Transportphänomene im Zementstein.

Schrumpfporen

Schrumpfporen sind etwa 10 nm groß und entstehen infolge der Bildung des Zementgels. Zu Beginn der Verfestigung ist die Lage der Zementkörner weitestgehend fest. Bei der Hydratation der C-S-H-Phasen wird das Wasser als sog. „Hydratwasser“ in die Hydratphasen eingebaut, wodurch wassergefüllte Bereiche leergesaugt werden und Schrumpfporen entstehen (Schrumpfung bzw. chemisches Schrumpfen). Die Poren sind entweder luft- oder wassergefüllt und bilden bei frühzeitiger Frostbeanspruchung des Betons/Mörtels Ausweichräume für enthaltenes Wasser.

Gelporen

Während der Hydratation kommt es an den relativ großen Oberflächen der C-S-H-Phasen zur physikalischen Bindung des Wassers als Porenflüssigkeit. Die dabei entstehenden wassergefüllten Hohlräume zwischen den einzelnen C-S-H-Phasen werden als Gelporen bezeichnet. Das Gelwasser ist nicht frei beweglich, sondern adsorptiv an der Oberfläche gebunden. Gelporen sind 1 bis 10 nm groß, wobei der Übergang von Gel- zu Schrumpfporen fließend ist (Gelporosität).

2.5.8.4 Wasser-Zement-Wert bzw. w/m-Verhältnis und Wasserarten

Der Wasser-Zement-Wert bzw. *w/z-Wert* ist eine der wichtigsten technologischen Kenngrößen in der Zementchemie und gibt das Masseverhältnis von Wasser und Zement an. Er ist wesentlich für die Festigkeit und Beständigkeit des Zementsteins. Grundsätzlich mindert ein zunehmender w/z-Wert die (Druck-)Festigkeit, chemische Widerstandsfähigkeit, Frost-Tau-Wechselbeständigkeit sowie Wasserdichtigkeit bzw. Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins. Nach dem Zementstein-Modell von (Powers, et al., 1948) ergibt sich die fortschreitende Entwicklung des Zementstein-Gefüges mit der fortschreitenden Hydratation des Zements, wobei das Wasser hierbei chemisch als *Kristallwasser*, physikalisch-adsorptiv als *Gelwasser* und als flüssi-

ges, freies Wasser - *Kapillarwasser*, in den Hohlräumen des Zementsteins gebunden wird. Nach der Zugabe von Wasser füllt dieses zunächst sämtliche Hohlräume wie Poren und Risse im Inneren der Zementpartikel sowie Zwischenräume der Partikel auf. Dadurch ergibt sich eine um alle Partikel figurative Hülle aus Zementgel, in welcher die Hydratationsprodukte des Zements zunächst ein sehr lockeres, hohlraumreiches und mit der Zeit ein immer dichter werdendes Gefüge aus Gelporen ausbilden. Von (Locher, 2000d; Stark, et al., 2000f) sind weitere Gefüge-Modelle u. a. nach (Feldman, et al., 1969) beschrieben. Das Kapillarwasser hinterlässt nach dem Verdunsten Kapillarporen; es verdunstet ebenso bei Trockenheit in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und wird bspw. bei Regen wieder aufgenommen. Das Gelwasser hingegen wird erst ab > 100 °C ausgetrieben; es handelt sich um schwer verdampfbares Wasser. Chemisch gebundenes Wasser wird erst bei der Zerstörung des C-S-H-Gels und der C-A-H-Phasen abgegeben (nicht verdampfbares Wasser).

2.5.9 Wärmeübertragung

Nach (Cerbe, et al., 2002) gibt ein wärmedurchlässiges System an seine Umgebung Wärme ab oder nimmt sie von ihr auf. Voraussetzung dafür ist ein Temperaturunterschied zwischen den beiden. Die Wärmeübertragung verläuft stets in Richtung fallender Temperaturen. Wärme kann durch drei unterschiedliche Vorgänge übertragen werden, die in der Praxis meist gemeinsam auftreten. Die Übertragung erfolgt durch Leitung und/oder Konvektion und/oder Strahlung. Bei der Wärmeleitung wird die Wärme ausschließlich zwischen direkt benachbarten Teilchen fester Körper oder in unbewegten Flüssigkeiten bzw. Gasen übertragen (kinetische Energie). Bei der Wärmeübertragung durch Konvektion hingegen wird die Wärme an bzw. von strömenden Flüssigkeits- oder Gasteilchen übertragen. Die Energie wird dabei von den Teilchen mitgeführt bzw. abgegeben. Man unterscheidet zwischen „freier Strömung“, wobei die Strömung durch die Wärmeübertragung selbst verursacht wird und „erzwungener Strömung“, bei der die Bewegung durch äußere Kräfte wie bspw. Gebläse oder Pumpen bewirkt wird. Bei der Wärmestrahlung kommt es zum Energieaustausch zwischen einem wärmeren und kälteren Körper in kleinen, nicht weiter teilbaren Beträgen (Photonen). Hierfür ist kein Übertragungsmedium erforderlich. Wärmestrahlung tritt in festen, flüssigen und gasförmigen Medien sowie im Vakuum auf.

Die Wärmeleitfähigkeit von Beton/Mörtel ist nach (Neroth, et al., 2011b) von folgenden Faktoren abhängig:

- Porengehalt sowie Porenart (Porosität)
- Art der Gesteinskörnung
- Feuchtegehalt

Grundsätzlich steigt die Wärmeleitfähigkeit mit sinkendem Wasser-Zement-Wert bzw. w/m-Verhältnis (Demirboğa, et al., 2003; Steiger, et al., 1978). Von (Kim, et al., 2003) wurden weitere, die Wärmeleitfähigkeit beeinflussende Faktoren festgestellt:

- Alter des Materials
- Art der Zusatzstoffe
- Volumen der feinen und groben Gesteinskörnungen
- Zementgehalt
- Temperatur

Nach (Campell-Allen, et al., 1963; Harmathy, 1970; Khan, et al., 1995; Marshall, 1972; Zimmermann, 1989) hat die Porosität, die Art der Gesteinskörnungen sowie der Feuchtegehalt des Betons/Mörtels den größten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, wohingegen die Hydratationsprodukte nur eine untergeordnete Rolle spielen. Von (Campell-Allen, et al., 1963) wurde ein theoretisches Modell, basierend auf dem Ohm'schen Gesetz (Ohm, 1827) zur Vorhersage der Wärmeleitfähigkeit von Beton/Mörtel aufgestellt. Nach (Harmathy, 1970) bzw. dem Modell von (Hamilton, et al., 1962) sind die Porosität und das Äquivalent des Feststoff- und Feuchtegehalts die ausschlaggebenden Einfluss-Faktoren. (Khan, 2002; Khan, et al., 1995) beschreiben den Werkstoff Beton/Mörtel weiter als ein Zwei- bzw. Drei-Phasen-System bestehend aus fester (Hydratationsprodukte und Gesteinskörnungen) und flüssiger Phase. Nach (Zimmermann, 1989) ist die Wärmeleitfähigkeit auch von der Porengröße bzw. -form sowie Porengrößenverteilung abhängig. Entsprechend seinem Modell liegen die Poren (abgeflacht oder gestreckt) in Beton/Mörtel größtenteils als kugelförmige Kapillarporen vor (Kap. 2.5.8.3). (Bhattacharjee, et al., 2004) berichten in ihren Untersuchungen über den Unterschied eingeschlossener sowie umschließender Poren. Bei den eingeschlossenen Poren sind diese komplett von Feststoff umhüllt, bei den umschließenden hingegen umhüllen diese den Feststoff. Aus diesem Zusammenhang ergeben sich die sog. „Flaschenhals-Poren“, die das „gesamte“ Porensystem eines

porösen Materials, über feine Kapillaren (Flaschenhalse) miteinander verbinden. Die Entstehung dieser Porenstruktur kann, im Falle von Beton/Mörtel, sowohl auf die Entstehung von Poren im Allgemeinen (Hydratation), als auch auf Mikrorisse infolge von Formänderungen wie bspw. das Schrumpfen zurückgeführt werden. Nach (Häußler, et al., 1995) können bei nicht-durchströmten Materialien wie Dünnbettmörtel, mit Porendurchmessern kleiner 5 mm, Konvektionseinflüsse als vernachlässigbar angesehen werden. Nach (Tavman, 1996) gilt dies bereits ab Porendurchmessern kleiner 1 mm. In Untersuchungen an Porenbeton von (Wong, et al., 2007) wurde dies ebenfalls bestätigt. Des Weiteren ist die Wärmeleitfähigkeit von der Beschaffenheit (Winkligkeit/Packungsdichte) der Gesteinskörnungen abhängig. (Demirboğa, 2007; Demirboğa, et al., 2003) berichten weiter über die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Mineralogie möglicher Zusatzstoffe. Solche mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit mindern die des Betons/Mörtels. Darüber hinaus nimmt deren Kristallisationsgrad Einfluss auf die Wärmedämmeigenschaften des Betons/Mörtels. Zusätze mit kristalliner Struktur verfügen über eine höhere Wärmeleitfähigkeit als amorphe oder glasartige Stoffe; bei gleicher Zusammensetzung. Außerdem steigt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Zementgehalt. Nach (Shin, et al., 2012) findet die Wärmeübertragung in Beton/Mörtel primär durch Wärmeleitung statt. Von (Stahl, et al., 2012) wurde ein neuartiger Putzmörtel entwickelt. Durch Zugabe eines Granulats aus Silika-Aerogel war es möglich die Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10, tr.} = 0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ um entsprechend 50 % abzusenken. Die Wärmeleitfähigkeiten wurden dabei mithilfe des Wärmestromplatten-Messverfahrens gemäß DIN EN ISO 12667 ermittelt. Nach (Ashour, et al., 2010) konnten Wärmeleitfähigkeiten von Verbundwerkstoffen aus Stroh unterschiedlicher Art und Putzmörteln ebenfalls nach DIN EN ISO 12667 bestimmt werden. (Kim, et al., 2003) berichten über die Wärmeleitfähigkeit von Beton/Mörtel sowie die beiden Messverfahren nach dem Wärmestromplatten-Prinzip und der „Hot wire“-Methode. Die Wärmeübertragung im Dünnbettmörtel kann in erster Linie durch Wärmeleitung im Feststoff und in der Gasphase sowie anteilig durch Strahlung angenommen werden. Die beiden Transportmechanismen werden im Folgenden nach (Grote, et al., 2014) erläutert.

2.5.9.1 Wärmeleitung

Obwohl Wärmeübertragungsvorgänge in der Realität instationär sind, erfolgt hier als Näherung die Annahme stationärer Wärmeübertragung. Hält man die beiden Ober-

flächen einer ebenen Wand der Dicke δ auf verschiedenen Temperaturen T_1 und T_2 , so strömt durch die Wandfläche A in der Zeit T nach dem Fourier'schen Gesetz die Wärme Q (Formel 25) (Grote, et al., 2014):

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta} \cdot T \quad (25)$$

Q : Wärme	[J]
λ : Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
A : Wandfläche	[m ²]
T_1 : Temperatur 1	[K]
T_2 : Temperatur 2	[K]
δ : Wanddicke	[m]
T : Zeit	[s]

Man bezeichnet $\frac{Q}{T} = \dot{Q}$ als Wärmestrom und $\frac{Q}{T \cdot A} = \dot{q}$ als Wärmestromdichte. Es gilt nach Formel 26 (Grote, et al., 2014):

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad \text{und} \quad \dot{q} = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad (26)$$

Ähnlich wie bei der Elektrizitätsleistung ein Strom I nur dann fließt, wenn eine Spannung U anliegt, um den Widerstand R zu überwinden, fließt ein Wärmestrom \dot{Q} nur dann, wenn eine Temperaturdifferenz $\Delta T = T_1 - T_2$ vorhanden ist.

Betrachtet man statt der Wand der endlichen Dicke δ , eine aus ihr senkrecht zum Wärmestrom herausgeschnittene Scheibe der Dicke dx , so erhält man das Fourier'sche Gesetz in der Form (Formel 27) (Grote, et al., 2014):

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{und} \quad \dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (27)$$

Wobei das negative Vorzeichen ausdrückt, dass die Wärme in Richtung abnehmender Temperatur strömt. \dot{Q} ist hierbei der Wärmestrom in Richtung der x-Achse, Entsprechendes gilt für \dot{q} .

2.5.9.2 Wärmestrahlung

Trifft ein Wärmestrom \dot{Q} durch Strahlung auf einen Körper, so wird ein Bruchteil $r\dot{Q}$ reflektiert, ein anderer Teil $a\dot{Q}$ absorbiert und ein Teil $d\dot{Q}$ hindurchgelassen, wobei $r + a + d = 1$ ist. Einen Körper, der alle Strahlung reflektiert ($r = 1, a = d = 0$) nennt man einen „idealen Spiegel“; einen Körper der alle auftretende Strahlung absorbiert ($r = 0, a = 1, d = 0$) heißt „schwarzer Körper“. Entsprechend seiner Temperatur sendet jeder Körper Strahlung aus. Den möglichen Höchstbetrag emittiert ein schwarzer Körper. Die von einem schwarzen Körper je Flächeneinheit emittierte Gesamtstrahlung wird durch das „Gesetz von Stefan-Boltzmann“ beschrieben (Grote, et al., 2014). Betrachtet man „wirkliche“ Körper, so emittieren diese weniger als schwarze Strahler. Die von ihnen emittierte Energie ist durch das „Kirchhoff'sche Gesetz“ beschrieben (Grote, et al., 2014).

2.5.9.3 Porendiffusion

Betrachtet man die innere spezifische Oberfläche eines porösen Katalysators, so nimmt diese nach (Reschetilowski, 2015) bis zu 99 % der gesamten Oberfläche ein. Um die katalytisch wirksamen Zentren im Inneren des Katalysators zu erreichen, müssen die Reaktionspartner nach dem Passieren der äußeren Grenzschicht des Katalysators durch dessen Porensystem transportiert werden. Bei diesem Stoffübergangsprozess, welchen man als Diffusion oder Porendiffusion bezeichnet, kommt es zu einer ungeordneten Wärmebewegung der Moleküle. Unter isothermen Bedingungen kann diese prinzipiell mit dem 2. Fick'schen Gesetz (Fick, 1855) nach Formel 28 beschrieben werden:

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c_A}{\partial L^2} \quad (28)$$

c_A : Stoffmengenkonzentration der Moleküle	[mol/m ³]
t : Zeit	[s]
L : Porenlänge	[m]
D : Proportionalitätskonstante/Diffusionskoeffizient	[m ² /s]

Die Konzentration der Moleküle c_A verändert sich mit der Zeit t und über die Porenlänge L . Der Diffusionskoeffizient D ist dabei abhängig von der Art der Diffusion, Porosität des Feststoffs, Art der Moleküle und den Prozessbedingungen. In Abhängigkeit vom Transportmechanismus der Moleküle unterscheidet man zwischen:

- Normal-Diffusion
- Knudsen-Diffusion
- Oberflächen-Diffusion

Sind die Porenradien im Material größer als die mittlere freie Weglänge der Moleküle und ist das Gas relativ dicht, so handelt es sich um die Normal-Diffusion. Hierbei ist die Anzahl an Zusammenstößen zwischen den Molekülen größer als die Anzahl der Zusammenstöße zwischen den Molekülen und den Porenwänden. Ist im Gegenteil die Anzahl der Zusammenstöße zwischen den Molekülen und den Porenwänden bedeutend höher als die Anzahl der Zusammenstöße der Moleküle untereinander und ist die Gasdichte niedrig (Knudsen-Gase), so liegt die Knudsen-Diffusion vor. Dies ist in porösen Medien wie Beton/Mörtel der Fall. Die mittlere freie Weglänge ist hierbei sehr groß gegenüber dem Porenradius (mikroporöse Katalysatoren). Es gilt nach Formel 29 (Reschetilowski, 2015):

$$D_K = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot d_K \quad (29)$$

D_K : Knudsen-Diffusionskoeffizient [m²/s]
 ω : Molekülgeschwindigkeit [m/s]
 d_K : Kapillardurchmesser [m]

Setzt man in Formel 29 den aus der „kinetischen Gastheorie“ (Geller, 2015) für ω erhaltenen Werte ein, so folgt Formel 30 nach (Reschetilowski, 2015):

$$D_K = \frac{4 \cdot r_P}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \quad (30)$$

r_P : Äquivalenter (= mittlerer) Porenradius [m]
 R : Allgemeine Gaskonstante [kJ/kmol·K]
 T : Temperatur [K]
 M : Molare Masse [kmol/kg]

Der Knudsen-Diffusionskoeffizient D_K ist proportional zum Porenradius r_P und unabhängig vom Druck, während der Diffusionskoeffizient bei der Normal-Diffusion unabhängig vom Porenradius und indirekt proportional dem Druck ist. Sind die Porenradien sowie die mittlere freie Weglänge der Moleküle von gleicher Größenordnung,

kann es zu einer Überlagerung von Normal- und Knudsen-Diffusion kommen. Daneben tritt auch die Oberflächen-Diffusion bzw. Vollmer-Diffusion auf, bei der die adsorbierten Moleküle einer ständigen Wärmebewegung in der Feststoffoberfläche ausgesetzt sind. Diese Diffusion kann jedoch als vernachlässigbar angenommen werden, da es sich dabei lediglich um eine Annahme handelt und diese nicht auf wissenschaftlichen Ergebnissen/Beweisen basiert (Sercombe, et al., 2007). (Müller-Erlwein, 2015) weisen ebenfalls auf die Überlagerung der beiden Diffusionsmechanismen in porösen Strukturen hin. Im Falle der Knudsen-Diffusion treten vor allem Wandstöße mit nachfolgender Sorption und Reflexion in Zufallsrichtung auf. In den Wert des effektiven Diffusionskoeffizienten D_{eff} geht somit die von der Porenstruktur und Porenradienverteilung abhängige Überlagerung der beiden Diffusionsarten mit ein. Nach (Jakobsen, 2014) war die Knudsen-Formel (Formel 29/30) (Knudsen, 1909; Knudsen, et al., 1910) ursprünglich für Makroporen bestätigt, wird heute jedoch weitgehend für den Bereich der Mesoporen angewandt. Hinsichtlich der Überlagerung der beiden Diffusionsmechanismen (Normal- und Knudsen-Diffusion) berichtet der Autor weiter über das Wilke-Bosanquet-Modell (Bosanquet, 1944) sowie das Gas-Modell (Mason, et al., 1983), wobei es sich um Berechnungsmodelle handelt. Nach (Odeh, et al., 2006) bzw. (Taylor, 1990e) sind, bei einem w/z -Wert kleiner 0,6, die Kapillarporen des Zementsteins nicht miteinander verbunden, weshalb die Diffusion durch die Gelporen dominiert wird. Bei w/z -Werten größer 0,6 sind die Kapillarporen miteinander verbunden und nehmen dadurch einen Großteil des Zementstein-Volumens ein und bestimmen dadurch die Diffusion. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen somit die Abhängigkeit der Diffusion vom w/z -Wert und der Porengröße. Die Autoren berichten weiter, dass die Knudsen-Diffusion im Zementstein erst ab Porendurchmessern kleiner 30 nm auftritt. Untersuchungen von (Sercombe, et al., 2007) zeigen, dass die Diffusion im Zementstein abhängig vom Umgebungsdruck ist. Bei Drücken größer 1 bar setzt sich diese aus Normal- und Knudsen-Diffusion zusammen (Überlagerung), wohingegen bei Drücken kleiner 1 bar die Porendiffusion hauptsächlich als Knudsen-Diffusion stattfindet. Sie ist außerdem indirekt abhängig von der Temperatur des durchströmenden Gases (z. B. Luft), dem molekularen Gewicht der Gas-Art sowie der Größe und dem Vernetzungsgrad der für das Gas zugänglichen, ungesättigten Poren. Da die Porengrößen im Zementstein, Beton oder Mörtel breit verteilt sind (Millimeter- bis Nanometer-Bereich), ist es

schwierig einen dominierenden Diffusionsmechanismus in zementgebundenen Materialien festzustellen.

3 Experimentelle Methoden

In den folgenden Unterkapiteln wird die experimentelle Vorgehensweise bei der hier vorgelegten Forschungsarbeit beschrieben. Zunächst wird auf die Probenauswahl und erste Vorversuche durch ein Zusatzstoff-Screening eingegangen. Im Anschluss folgt die werkstofftechnische Charakterisierung der Ausgangsstoffe sowie Untersuchungen an abgebundenen Dünnbettmörtel-Mischungen und ausgewählten Dünnbett-Frischmörtel-Mischungen.

3.1 Gesamt-Probenauswahl

Als Ausgangsmaterial wurde ein verkaufsfertiger Dünnbettmörtel eines namhaften Herstellers gewählt und zunächst die werkstofftechnischen Kenngrößen daraus hergestellter Nullproben experimentell ermittelt. Für die Minderung der Wärmeleitfähigkeit wurden dem Mörtelsystem sowohl pulverförmige Zusatzstoffe (Hohlglas- und Phenolharzkugeln, Kaolin (China Clay), expandierte Alumosilikate, Kieselgur und Ziegelmehl), als auch faserförmige Zusatzstoffe (Dralon- und Filz-Fasern, Polypropylen-Spleissfasern) sowie Glasplättchen und in weiteren Untersuchungen Glashohlkugeln, Schmelzkammer-Granulat, puzzolanische Zusätze (Bims, Perlit, pyrogene Kieselsäure) und Vermiculit in unterschiedlichen Volumenprozent-Zugaben (5 bis 20 Vol.-%) sowohl einzeln, als auch kombiniert zugemischt. Die verwendeten Dünnbettmörtel-Gebinde (Säcke à 15 kg) wurden stets innerhalb des vom Hersteller empfohlenen Verarbeitungszeitraums (sechs Monate) untersucht. Die Charakterisierung der Ausgangsmaterialien sowie die werkstofftechnischen Untersuchungen erfolgten zeitnah. Rückstellproben wurden in Polyethylen-Folie (PE) in luftdichten Behältnissen gelagert. Eine Hydratation und Carbonatisierung der Proben konnte somit weitestgehend verhindert werden. Die Hersteller des Dünnbettmörtels sowie der Zusatzstoffe werden in dieser Arbeit nicht genannt.

3.2 Zusatzstoff-Screening ohne Stoffraumrechnung (Vorversuche)

Für die Herstellung der Dünnbettmörtel-Mischungen wurde das Mischungsverhältnis von Dünnbettmörtel und Zusatzstoff zunächst über die Schüttdichte des verwendeten Pulvers bzw. der verwendeten Fasern in Anlehnung an DIN EN ISO 60 berechnet (Formel 31, Tabelle 11). Das jeweils eingestellte w/m-Verhältnis orientierte sich an der Nullprobe und blieb vorerst unverändert. Entsprechend der Herstellerangabe wurde zu 15 kg trockenem Dünnbettmörtel-Pulver eine Wassermenge von 8,75 l dosiert. Daraus ergibt sich ein w/m-Verhältnis von 0,58. Im Hinblick auf die Berechnung der Mörtelmischungen wurde zunächst die Masse eines Trockenmörtel-Volumens von einem Liter mit 0,96 kg bestimmt und mit einem Volumen von 100 Vol.-% angenommen.

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (31)$$

ρ_s : Schüttdichte [g/cm³]
 m : Masse trocken [g]
 V : Volumen [cm³]

Über das bekannte Zusatzstoff-Volumen am Beispiel von 0,1 l (10 Vol.-%) und die berechnete zugehörige Schüttdichte, lässt sich durch Umstellen von Formel 31 die entsprechende Masse m_x für jeden Zusatzstoff berechnen. Tabelle 11 zeigt die verwendeten Zusammensetzungen der Dünnbettmörtel-Mischungen. Mit den angegebenen Rezepturen erfolgte die Herstellung von Dünnbettmörtel-Proben (Bild 13) und die experimentelle Bestimmung der Druckfestigkeiten nach DIN EN 1015-11 sowie Wärmeleitfähigkeiten gemäß DIN EN ISO 12667 nach einer Lagerung von 28 Tagen. Alle Proben wurden mit einem w/m-Verhältnis von 0,58 hergestellt.

Die Zusatzstoffe wurden zwischen 5 bis 20 Vol.-% dosiert. Die Druckfestigkeiten in der Ergebnisdarstellung der Vorversuche (Bild 16) sind Mittelwerte aus jeweils mindestens fünf Einzelbestimmungen; bei den Wärmeleitfähigkeiten sind die Mittelwerte aus mindestens drei Einzelbestimmungen berechnet. Die zugehörigen Einzelwerte sind im Anhang (Tabelle A-1) aufgeführt.

Tabelle 11: Zusammensetzung der Dünnbettmörtel-Mischungen am Beispiel mit je 10 Vol.-% Zusatzstoff

Nullprobe / Zusatzstoff	Schüttdichte ρ_s [kg/dm³]	Masse Mörtel m_M [kg]	Masse Wasser m_W [kg]	Masse Zusatzstoff m_x [g]
Dünnbettmörtel-Nullprobe	0,96	0,96	0,56	-
Hohlglaskugeln Sorte I	0,07	0,86	0,56	6,72
Hohlglaskugeln Sorte II	0,13	0,86	0,56	12,00
Phenolharzkugeln	0,14	0,86	0,56	12,86
Kaolin (China Clay)	0,43	0,86	0,56	41,28
Expandiertes Aluminosilikat Sorte I	0,25	0,86	0,56	24,00
Expandiertes Aluminosilikat Sorte II (hydrophob)	0,11	0,86	0,56	10,93
Expandiertes Aluminosilikat Sorte III (hydrophil)	0,11	0,86	0,56	10,43
Kieselgur	0,22	0,86	0,56	21,12
Ziegelmehl	0,59	0,86	0,56	56,64
Dralon-Kurzschneidfasern	0,14	0,86	0,56	13,44
Glaswolle-Filz (zerkleinert)	0,13	0,86	0,56	12,48
Polypropylen-Spleißfasern	0,09	0,86	0,56	8,64
Glasplättchen	0,30	0,86	0,56	28,80

Da bei der Berechnungsmethode (Tabelle 11) der Mörtel/Zusatzstoff-Zusammensetzungen weder das Volumen des Wassers, noch das der enthaltenen Luft im Frischmörtel mit einbezogen wurde und darüber hinaus das w/m-Verhältnis unverändert blieb, wurden im nächsten Schritt optimierte Dünnbettmörtel-Mischungen durch Anwendung der Stoffraumrechnung hergestellt (Kap. 3.4.1).

3.3 Methoden zur Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Die nächsten Unterkapitel beschreiben die verwendeten Methoden zur Charakterisierung des Dünnbettmörtel-Pulvers und der Zusatzstoffe.

3.3.1 Auflichtmikroskopie

Mit Hilfe der Auflicht-Stereomikroskopie (SteREO Discovery.V20, Firma Carl Zeiss) erfolgte eine Charakterisierung der ausgewählten Zusatzstoffe. Für die Bildauswertung kam die Software (AxioVision, Firma Carl Zeiss) zum Einsatz.

3.3.2 Korngrößenanalyse

Die Korngrößenanalysen der pulverförmigen Ausgangsstoffe wurde mittels Laserbeugung (Cilas 1064, Firma Quantachrome) gemäß ISO 13320 jeweils in mindestens drei aufeinanderfolgenden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Alle Messungen erfolgten im Nassdispersier-Verfahren und wurden nach der Fraunhofer-Methode gemäß ISO 13320-1 ausgewertet. Um ein Hydratisieren der Proben während der Messungen zu vermeiden, wurden die Dünnbettmörtel-Pulver sowie puzzolanischen Zusatzstoffe in 2-Propanol (p. a., Wasseranteil $\leq 0,1$ Ma.-%) dispergiert.

3.3.3 Bestimmung der Dichte

Die Bestimmung der Feststoffdichten erfolgte durch Gaspyknometrie nach DIN 66137-1 bzw. -2 (Ultrapyc 1200e, Firma Quantachrome) (Formel 31). Im Vorfeld jeder Messung wurden die zu untersuchenden Proben zunächst durch externe Trocknung bei 105 °C bis zur Massenkonstanz in einem Trockenschrank vorbereitet und im Anschluss in einem Exsikkator gelagert. Als Messgas kam Helium (Gasreinheit 5.0) zum Einsatz. Die Ergebnisse der Feststoffdichten sind Mittelwerte aus jeweils drei Einzelbestimmungen; im Falle der Siebrückstände (Kap. 3.4.1.1) aus insgesamt 54 Einzelbestimmungen (18 abgesiebte Dünnbettmörtel-Säcke).

3.3.4 Bestimmung der spezifischen Oberfläche nach BET

Bei der Gasadsorption nach DIN ISO 9277 (bzw. DIN 66131) wird die spezifische Oberfläche von Feststoffen standardmäßig durch Stickstoffadsorption bei 77,35 K (Siedetemperatur des Stickstoffs) nach der BET-Methode bestimmt. Für die Untersuchungen der Ausgangsstoffe wurde ein Gasadsorptions-Messgerät (Autosorb iQ, Firma Quantachrome) mit Stickstoff (Gasreinheit 5.0) als Messgas verwendet. Das Messgerät funktioniert nach der statistisch-volumetrischen Methode, wobei die Adsorption einer bestimmten Gasmenge auf der temperierten Probe, welche sich im Vakuum befindet, erfolgt.

Vor der Adsorptionsmessung ist die Probe von physisorbiertem Material durch Entgasung zu befreien. Zur Entgasung im Vakuum reicht in der Regel ein Enddruck von 1 Pa aus. Diese kann bei erhöhter Temperatur (hier 105 °C) in einem Inertgasstrom (hier Helium) erfolgen und ist dann vollständig, wenn ein konstanter Wert für den Restgasdruck, die Restgaszusammensetzung oder die Probenmasse erreicht ist. Bei

den Angaben der spezifischen Oberflächen handelt es sich um Mittelwerte aus Doppelbestimmungen von 4- bzw. 7-Punkt-BET-Messungen.

3.3.5 Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)

Die chemische Zusammensetzung von Mörtel/Zement und Zusatzstoffen wird mithilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) nach DIN EN 196-2 ermittelt, mit Angabe der oxidischen Elementzusammensetzung in [Ma.-%]. Die quantitative Elementbestimmung erfolgte mittels wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF Axios, Firma PANalytical). Zur Probenvorbereitung und Bestimmung des Glühverlustes wurden die Proben über einen Zeitraum von einer Stunde bei 950 °C geglüht. Die Herstellung der Schmelztabletten (Durchmesser: 40 mm, Dicke: etwa 3 mm) erfolgte aus 8 g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ und 1 g geglühter Probe mit einem Schmelzaufschlussgerät (Firma Fluxana). Die Auswertung von Doppelbestimmungen wurde mit einer Software (SuperQ 5, Firma PANalytical) basierend auf zertifizierten Zementstandards durchgeführt.

3.3.6 Röntgendiffraktometrie (XRD)

Die Röntgendiffraktometrie beruht auf der Beugungstheorie von (Bragg, et al., 1918) und beschreibt die Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit Kristallen als Beugung an Netzebenen. Die röntgenographischen Untersuchungen zu dieser Arbeit entstanden an einem θ - θ -Röntgendiffraktometer (X'Pert Pro, Firma PANalytical, Tabelle 12). Die Probenpräparation der pulverförmigen Ausgangsstoffe wurde unter Anwendung des Backloading-Verfahrens durchgeführt und die erhaltenen Pulverdiffraktogramme ausgewertet (Doppelbestimmung).

Die Messdateien wurden mit Hilfe der Software (HighScore Plus 3.0e, Firma PANalytical) und den Datenbanken ICSD (Inorganic Crystal Structure Database), Database FIZ Karlsruhe, 2009-2 und PDF-2 Release, 2004 ausgewertet (Tabelle 13). Details der Röntgenpulverdiffraktometrie werden von (Spieß, et al., 2009) beschrieben.

Tabelle 12: Messparameter zur Durchführung der Röntgenbeugung

Geometrie	Reflexion / θ - θ (Bragg-Brent.)
Goniometerradius	240 mm
Strahlung	Cu ($K_{\alpha 1}/K_{\alpha 2}$, 1,54060 Å / 1,54443 Å)
Röhrenleistung	45 kV / 40 mA
Filter	Nickel
Detektor	X'Pixcel
Probe	Backloading / Probendreher
Messbereich	5 bis 90 °2 θ
Messzeit	35 s / Schritt
Schrittweite	0,017 °
Blende	Variabel (20 mm bestrahlte Probenlänge / primär / sekundär)
Soller	0,04 rad (prim. / sek.)

Tabelle 13 zeigt die für die Auswertung der pulverförmigen Ausgangsstoffe verwendeten „Karten“ mit zugehöriger PDF-Nummer der Datenbanken.

Tabelle 13: Relevante Zementphasen und weitere Bestandteile für die Phasenanalyse der Ausgangs- bzw. Zusatzstoffe

PDF-Nr.	Mineralname	Trivialname	Chemische Formel (PDF)	Abkürzung
01-086-0402	Hatrurite, syn., Calcium Silicose Oxide	Hatrurit	Ca_3SiO_5	-
00-033-0302	Larnite, syn., Calcium Silicate	Belit	Ca_2SiO_4	C_2S
00-038-1429	Tricalcium Aluminate, Calcium Aluminium Oxide	Aluminat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{C}_3\text{A}_{\text{cub.}}$
98-011-4311	Brownmillerite, Dicalcium Diferrate (III)	Aluminatferrit	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	C_4AF
98-003-4957	Calcite, Calcium Carbonate	Calcit	CaCO_3	-
01-085-0749	Quarz, Silicone Oxide	Quarz	SiO_2	S
00-037-1496	Anhydrite, syn., Calcium Sulfate	Anhydrit	CaSO_4	Cs
00-036-0617	Bassanite, syn., Calcium Sulfate Hydrate	Bassanit	$\text{CaSO}_4 \cdot 2/3 \text{H}_2\text{O}$	-
00-005-0613	Arcanite, syn., Potassium Sulfate	Arcanit	K_2SO_4	-
00-016-0152	Trydimite, Silicon Oxide	Trydimit	SiO_2	S
01-079-1912	Quarz, Silicone Oxide	α -Quarz	SiO_2	S
98-004-2479	Andesine, Sodium Calcium Aluminosilicate	Andesin	$\text{Al}_{1,46}\text{Ca}_{0,347}\text{Na}_{0,685}\text{O}_8\text{Si}_{2,54}$	-
98-010-8664	Quarz, Silicone Oxide	α -Quarz	SiO_2	S
00-009-0478	Anorthoclase, Potassium Sodium Aluminium Silicate	Anorthoklas	$(\text{Na}, \text{K})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$	-
00-019-0926	Microcline, Potassium Aluminium Sulfate	Mikroclin	KAlSi_3O_8	-

3.3.7 Porenanalyse von Pulverproben durch Quecksilberporosimetrie

Zur Bestimmung der Porenvolumenverteilung, der sogenannten „offenen Porosität“ der porösen Feststoffe bzw. pulverförmigen Proben wurde die Quecksilberporosimetrie (Poremaster 60, Firma Quantachrome) als Messverfahren angewandt. Die Quecksilberporosimetrie nach ISO 15901-1 (bzw. DIN 66133) beruht auf der Kapillardepension, wobei unter Druck die nicht-benetzende Flüssigkeit Quecksilber in die Poren der zu untersuchenden Probe intrudiert wird. Der Zusammenhang zwischen dem aufzuwendenden Druck und der Porenweite zylindrischer Poren ist dabei durch die Washburn-Gleichung nach (Washburn, 1921) gegeben (Formel 32):

$$r_P = - \frac{2 \cdot \sigma}{\rho} \cdot \cos \vartheta \quad (32)$$

r_P : Porenradius	[m]
σ : Oberflächenspannung des eingepressten Quecksilbers (480 N/m bei 20 °C)	[N/m]
ρ : Druck	[Pa]
ϑ : Kontaktwinkel (140 °)	[°]

Vor jeder Messung sind die zu untersuchenden Proben (Bild 12) in gleicher Weise wie bei der Gasadsorption, von physisorbiertem Material durch Entgasung zu befreien (Kap. 3.3.3).

Nachdem die Messzelle verschlossen in das Quecksilberporosimeter eingebaut und evakuiert wurde, erfolgt über eine gebogene Kapillare und mit steigendem Druck die Quecksilberintrusion in die Probe. Mithilfe eines Probenhalters ist es neben der Messung von Dünnbettmörtel-Bruchstücken ebenso möglich, pulverförmige Proben mit dem Quecksilberporosimetrie-Verfahren zu untersuchen. Es erfolgte stets eine Doppel- bzw. Dreifach-Bestimmung der untersuchten Proben. Die Darstellung der Porenvolumina wurde gemäß DIN 66139 durchgeführt.



Bild 12: Probenzelle ($0,5 \text{ cm}^3$ Zellenvolumen) befüllt mit Dünnbettmörtel-Bruchstücken (links); Untersuchung einer Pulverprobe (rechts)

3.3.8 Wassersorptionsvermögen

Für die Herstellung der durch Zusatzstoffe modifizierten Mörtelmischungen gemäß Stoffraumrechnung wurde mit Ausnahme der hydrophoben Zusätze expandiertes Alumosilikat der Sorte II, Glashohlkugeln, Schmelzkammer-Granulat und Vermiculit das Wassersorptionsvermögen untersucht. Die Zusatzstoffe expandiertes Alumosilikat der Sorte III, expandierter Perlit sowie pyrogene Kieselsäure wurden hierfür jeweils mit einer Masse von 20 g vorsichtig auf ein sehr feines Sieb ($45 \mu\text{m}$) mit zusätzlicher Siebpfanne als Auffangbehälter aufgegeben und anschließend vollständig mit Wasser bedeckt. Nach 30 Minuten konnte durch Rückwiegen der Probe die adsorbierte Masse an Wasser bestimmt und die Wasseraufnahme des jeweiligen Stoffes festgestellt werden.

3.4 Probenherstellung

Für die Probenherstellung wurden zwei in den äußeren Abmessungen unterschiedliche Formen verwendet. Bild 13 zeigt eine befüllte Stahlform mit Aufsetzkasten (links, hinten) für die Herstellung von Dünnbettmörtel-Normprismen ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$) sowie eine aus Silikon gegossene Form für die Herstellung von Prüfkörpern ($100 \times 100 \times$ mindestens 15 mm) für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr.}}$.

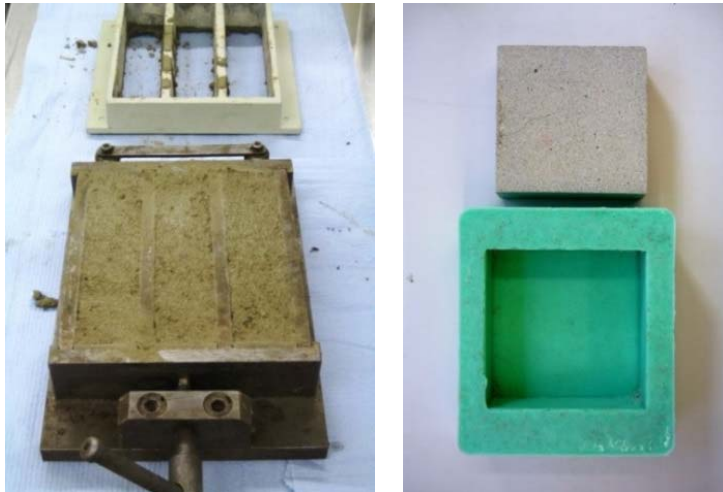


Bild 13: Stahlform mit Aufsetzkasten zur Herstellung von Mörtelprismen (links); Silikonform zur Herstellung von Wärmeleitplatten (rechts)

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper wurden nach DIN EN 196-1 hergestellt. Für das Anmischen der Dünnbettmörtel-Mischungen kam ein Mörtelmischer (ToniMIX, Firma Toni Technik) zum Einsatz. Das Mörtelwasser wurde bei RT in einem PE-Wasserbehälter gelagert. Die Herstellung erfolgte für jede Mischung innerhalb von acht Minuten bei niedriger Rührgeschwindigkeit (Rotation = $140 \pm 5 \text{ min.}^{-1}$, Planetenbewegung $62 \pm 5 \text{ min.}^{-1}$). Nach dem Befüllen der Formen wurden diese entsprechend DIN EN 1015-11 zunächst für 2 Tage in PE-Folie, anschließend für fünf Tage in einem Klimaschrank (KBF 115, Firma Binder) bei einer Temperatur von $20 \pm 2 \text{ °C}$ sowie $95 \pm 5 \%$ relativer Luftfeuchtigkeit und schließlich bei Raumlufttemperatur bis zu einem Prüfalter von insgesamt 28 Tagen gelagert.

3.4.1 Grundlagen der Stoffraumrechnung

Für das weitere Zusatzstoff-Screening wurde für die Berechnung der Rezepturen die Stoffraumrechnung verwendet. Hierfür waren eine Siebanalyse und die Bestimmung der Feststoffdichten der Siebrückstände und Zusatzstoffe sowie die Bestimmung des Luftgehalts der Dünnbettmörtel-Nullproben notwendig. Dabei wurde zunächst an den erfolgreichen Zusatzstoffen expandiertes Alumosilikat der Sorten II und III festgehalten. Darüber hinaus wurden gezielt die erfolgversprechenden Zusatzstoffe Glashohlkugeln, Schmelzkammer-Granulat, Bimsmehl der Sorte I und II, expandierter Perlit, pyrogene Kieselsäure und Vermiculit in die Untersuchungen integriert.

3.4.1.1 Siebanalyse

Im Vorfeld der Stoffraumrechnung ist eine Siebanalyse der Fein- und Grobanteile der im Mörtelsack enthaltenen Mörtelmischung nach DIN 66165-1 bzw. -2 notwendig. Die verwendeten Siebgrößen bzw. Maschenweiten waren 63, 90, 125, 250 und 500 μm , wobei das Größtkorn des Mörtels 1000 μm beträgt. Die Siebanalysen sind an einem Siebturm (Analysette 3 Pro, Firma Fritsch) mit den Einstellungen Amplitude 1,5 und Siebdauer 5 Minuten durchgeführt worden. Nach der Siebung erfolgte die Bestimmung der Feststoffdichten der Siebrückstände mittels Helium-Gaspyknometrie (Kap. 3.3.3).

3.4.1.2 Bestimmung des Luftgehalts

Durch Wiegen der Siebrückstände und in Kenntnis der Feststoffdichten wurde die Berechnung der jeweiligen Volumenanteile ermöglicht. Unter Berücksichtigung der Luftporen des Dünnbett-Frischmörtels nach DIN EN 1015-7 (Luftgehaltsprüfer 1 l, Firma Testing) konnte eine aus den Einzelfractionen exakt zusammengesetzte Dünnbettmörtel-Nullprobe hergestellt werden (Tabelle 14). Die Tabelle zeigt die experimentell ermittelten Massenverhältnisse an einem typischen Sack Dünnbettmörtel. Mit den gemessenen Feststoffdichten sowie den Massenverhältnissen kann eine Berechnung der jeweiligen Volumenanteile erfolgen. Im hier vorgestellten Beispiel eines typischen Sacks Dünnbettmörtel betrug der Luftporengehalt 22 Vol.-%.

3.4.1.3 Stoffraumrechnung

Die Berechnung der Rezepturen erfolgte mittels Stoffraumrechnung gemäß Formel 33 nach (HeidelbergCement AG, 2011; Klausen, et al., 2013a). Für die Herstellung der Dünnbettmörtel-Proben müssen die Massen- und Volumen-Anteile zunächst auf 1,00 kg umgerechnet und anschließend auf das gewünschte Zielvolumen in [l] bzw. auf die Einzelmassen in [g] der Fraktionen bezogen werden. Die Wassermenge ergibt sich durch den Faktor 0,58. In Tabelle 14 wurde das Zielvolumen beispielhaft auf 2 Liter Frischmörtel bezogen.

Bei den mittels Stoffraumrechnung optimierten Mörtelmischungen wurde stets der Grobanteil mit $x_i \geq 125 \mu\text{m}$ der Grundmischung anteilig substituiert und durch ausgewählte Zusatzstoffe (Kap. 3.1) ersetzt. Der Feinanteil hingegen blieb unverändert, da

es sich dabei um den Bindemittel-Anteil des Mörtels handelt und dieser maßgeblich zur Festigkeitsentwicklung beiträgt.

$$V_G = V_M + V_W + V_L + V_Z + V_X \dots = \left(\frac{m_M}{\rho_M}\right) + \left(\frac{m_W}{\rho_W}\right) + V_L + \left(\frac{m_Z}{\rho_Z}\right) + \left(\frac{m_X}{\rho_X}\right) \dots \quad (33)$$

- V_G : Gesamtvolumen des Frischmörtels [l]
- V_M : Volumen des Trockenmörtels [l]
- V_W : Volumen des Wassers [l]
- V_L : Volumen der Luft (Poren) [%]
- V_Z : Volumen des Zusatzstoffes x [l]
- V_X : Volumen des Zusatzstoffes x + 1 [l]
- m_M : Masse des Trockenmörtels [kg]
- m_W : Masse des Wassers [kg]
- m_Z : Masse des Zusatzstoffes x [kg]
- m_X : Masse des Zusatzstoffes x + 1 [kg]
- ρ_M : Feststoffdichte des Trockenmörtels [kg/dm³]
- ρ_W : Feststoffdichte des Wassers [kg/dm³]
- ρ_Z : Feststoffdichte des Zusatzstoffes x [kg/dm³]
- ρ_X : Feststoffdichte des Zusatzstoffes x + 1 [kg/dm³]

In Tabelle 14 wurde das Zielvolumen beispielhaft auf 2 Liter Frischmörtel bezogen.

Tabelle 14: Beispiel für die Herstellung von 2,00 l Dünnbettmörtel-Mischung (Nullprobe) mittels Stoffraumrechnung mit einem w/m-Verhältnis von 0,58

Siebfraktion, Maschen- weite	Masse	Volumen	Volumen	Volumen	Volumen	Volumen	Volumen	Masse	Feststoffdichte	Zielvolumen
	1,00 kg	1,00 kg		1,00 l	1,00 l	1,00 l	1,00 l	2,00 l		2,00 l
	m_{xi} [Ma.-%]	V_{xi} [l]		V_M [Vol.-%]	V_w [Vol.-%]	V_L [Vol.-%]	V_Z [Vol.-%]	m_{xi} [g]		ρ_{Fxi} [g/cm ³]
x_i [µm]			V_G [l]							
$x_1 < 63$	0,43	0,14	-	0,11	-	-	-	654,09	3,02	2,00
$x_2 < 90$	0,28	0,09	-	0,07	-	-	-	423,01	3,02	
$x_3 < 125$	0,07	0,02	-	0,02	-	-	-	104,73	2,81	
$x_4 < 250$	0,03	0,02	-	0,01	-	-	-	45,85	1,90	
$x_5 < 500$	0,17	0,15	-	0,11	-	-	-	253,75	1,11	
$x_6 \geq 500$	0,03	0,02	-	0,02	-	-	-	43,32	1,28	
$\Sigma x_i < 1000$	1,00	0,45	-	0,34	-	-	-	1524,75	2,24	
Wasser	-	0,58	-	-	0,44	-	-	889,44	1,00	
Luft / Poren	-	0,28	-	-	-	0,22	-	-	-	
Zusatzstoff x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Σ	1,00	1,31	1,31	0,31	0,44	0,22	-	2414,19	-	

3.5 Untersuchungen am abgeordneten Dünnbettmörtel

Im Zeitraum von 2 bis 28 Tagen wurden an den gemäß Stoffraumrechnung zusammengesetzten Dünnbettmörtel-Mischungen unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt, die nachfolgend behandelt werden.

3.5.1 Werkstofftechnische Parameter

Die werkstofftechnischen Parameter dynamischer Elastizitäts-Modul, Dreipunkt-Biegezugfestigkeit sowie Druckfestigkeit wurden nach 7 bzw. 28 Tagen an den Normprismen gemäß DIN EN 12504-4 sowie DIN EN 1015-11 gemessen. Die Ergebnisse sind jeweils Mittelwerte aus drei bzw. sechs Einzelbestimmungen. Nach 28 Tagen erfolgte außerdem die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ gemäß DIN EN ISO 12667. Diese Ergebnisse sind Mittelwerte aus jeweils sechs Einzelbestimmungen.

3.5.1.1 Masse der Prüfkörper

Das Wiegen der Prüfkörper (Normprismen) fand nach 2, 7, 14 und 28 Tagen statt. Bei den Massen handelt es sich um Mittelwerte aus drei bzw. sechs Einzelbestimmungen.

3.5.1.2 Dynamischer Elastizitäts-Modul

Im Hinblick auf die Berechnung des dynamischen E-Moduls ist es im Vorfeld notwendig, die Dichte des zu prüfenden Körpers (Normprisma) zu bestimmen. Dies gelingt zunächst über die Bestimmung der äußeren Abmessungen mithilfe eines Messschiebers und anschließender Volumenberechnung nach (Zeidler, 2013) Formel 34:

$$V = l \cdot b \cdot h \quad (34)$$

V : Volumen des Prüfkörpers [cm³]
l : Länge des Prüfkörpers [cm]
b : Breite des Prüfkörpers [cm]
h : Höhe des Prüfkörpers [cm]

Die Berechnung der Rohdichte erfolgt nach (Formel 31, Kap. 3.2). An den Prüfkörpern wird der E-Modul mittels Ultraschall ermittelt (Ultrasonic Tester BP-5, Firma Dr. Steinkamp). Hierbei wird die Laufzeit einer longitudinalen Schallwelle durch das

Normprisma gemessen. Es kommt folgende vereinfachte Formel 35 zur Anwendung (UltraTest GmbH):

$$E = \rho \cdot v^2 \quad (35)$$

E : Dynamischer E-Modul [GPa]
 ρ : Rohdichte [g/cm³]
 v : Schallgeschwindigkeit [mm/μs]

3.5.1.3 Dreipunkt-Biegezugfestigkeit

Die Messung bzw. Berechnung der Dreipunkt-Biegezugfestigkeiten (Druck-Biege-Prüfmaschine RT 200-10-1D, Firma Testing) erfolgte nach der vereinfachten Formel 36:

$$\beta_B = F_f \cdot 2,34 \cdot 10^{-3} \quad (36)$$

β_B : Dreipunkt-Biegezugfestigkeit [N/mm²]
 F_f : Bruchlast [N]

3.5.1.4 Druckfestigkeit

Die Berechnung der Druckfestigkeiten erfolgte nach Formel 37:

$$\beta_D = F_c / 1600 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

β_D : Druckfestigkeit [N/mm²]
 F_c : Bruchlast [N]

Für die Messungen wurden Druckplatten mit den Abmaßen $l = 40$ mm und $b = 40$ mm verwendet, wodurch sich eine Auflagefläche von 1600 mm² ergibt.

3.5.1.5 Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ erfolgte an einem Wärmestromplatten-Messgerät (TLP 200, Firma Taurus) nach einem Probenalter von 28 Tagen. Das Gerät funktioniert nach dem stationären Messverfahren, wobei der Probe ein Temperaturgradient vorgegeben wird. Das Messverfahren bezieht sich auf die Wärmeleitfähigkeit einer rückgetrockneten Probe bei 10 °C Probenmitteltemperatur. Im Vorfeld der Messungen waren die zu untersuchenden Prüfkörper (Kap 3.4, Bild 13, rechts) zunächst planparallel nass zu schleifen und im Anschluss schrittweise bei 40 und

105 °C für jeweils 24 Stunden zu trocknen. Bis zur eigentlichen Messung wurden die Proben im Exsikkator gelagert. Um einen möglichen Einfluss von Kondensationsfeuchte an der Referenzplatte auszuschließen, werden drei Messungen bei den Probenmitteltemperaturen 15, 25 und 35 °C durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C Probenmitteltemperatur wird anschließend durch lineare Regression durch diese drei Messpunkte ermittelt. Bezüglich der messtechnischen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit einer Probe, wird der Wärmestrom durch die Probe aus der Heizspannung und der Stromstärke ermittelt (Kap. 2.5.9.1, Formel 25). Mit Kenntnis der Oberflächentemperaturen an der Warm- und Kaltseite lässt sich somit die Wärmeleitfähigkeit einer Probe, bei konstantem Wärmestrom berechnen.

3.5.2 Porenanalyse

An den abgebundenen Dünnbettmörtel-Mischungen wurde nach 28 Tagen eine ausführliche Porenanalyse durchgeführt (Doppelbestimmungen). Diese erfolgte in erster Linie mittels Quecksilberporosimetrie (Kap. 3.3.7). Darüber hinaus erfolgte eine Berechnung der Porositäten mittels Formel 38 (Quantachrome® Instruments, 2013):

$$\Phi = \left(\frac{V_q}{\frac{V_q + 1}{\rho_s}} \right) \cdot 100 \% \quad (38)$$

Φ : Porosität [%]
 V_q : Spezifisches Gesamt-Porenvolumen [cm³/g]
 ρ_s : Feststoffdichte [g/cm³]

Für die Analyse des mittels Quecksilberintrusion nicht zugänglichen und feineren Mesoporen-Bereichs wurde die Gasadsorption mit Stickstoff als Messgas eingesetzt (Kap. 3.3.4). Die Methode schließt an die Messuntergrenze der Quecksilberporosimetrie an und ermöglicht die Ermittlung von Porendurchmessern von nur wenigen Nanometern. Die Auswertung der gemessenen Isothermen erfolgte mittels Dichte-Funktional-Theorie (DFT), wobei die Messobergrenze für dieses Berechnungsmodell bei etwa 75 nm liegt.

3.5.3 Röntgendiffraktometrie (XRD)

Neben der Phasenanalyse der Ausgangsstoffe wurden auch abgebundene Dünnbettmörtel-Proben mittels Röntgenbeugung untersucht (Kap. 3.3.6). Vor jeder Messung mussten die zu untersuchenden Proben zunächst in Pulverform gebracht werden. Dies geschah händisch nach einem Probenalter von 2 Tagen durch Homogenisieren im Mörser. Nach 7, 14, 21 und 28 Tagen erfolgte das Aufmahlen teilweise mittels einer Wolframcarbidge-Mörsermühle (RM 100, Firma Retsch). Die darauf folgende Probenpräparation wurde unter Anwendung des Backloading-Verfahrens durchgeführt und die erhaltenen Pulverdiffraktogramme ausgewertet (Tabelle 15).

Um das Abbindeverhalten genauer zu verstehen, wurde dieses an ausgewählten Dünnbettmörtel-Mischungen sowohl an Laborluft-Atmosphäre, als auch unter CO₂-Ausschluss untersucht (Kap. 2.5.7.1). Bei den Untersuchungen handelt es sich um Mehrfachbestimmungen. Im Falle des CO₂-Ausschlusses wurden die Dünnbettmörtel-Proben in einem evakuierten Exsikkator und in Stickstoff-Atmosphäre (Gasreinheit 2.2) gelagert (Bild 14).

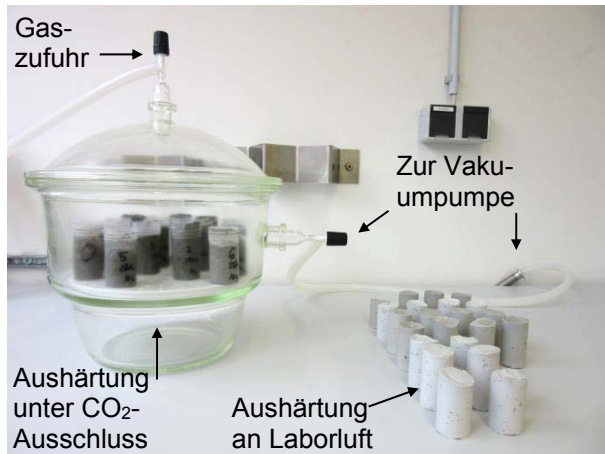


Bild 14: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Portlandit-Abbaus unter CO₂-Ausschluss in N₂-Atmosphäre bzw. an Laborluft-Atmosphäre (Carbonatisierung)

In Tabelle 15 sind die für die Auswertung der abgebundenen Dünnbettmörtel-Proben verwendeten „Karten“ mit zugehöriger PDF-Nummer der Datenbanken aufgelistet.

Tabelle 15: Relevante Zementphasen, Hydratationsprodukte und weitere Bestandteile für die Phasenanalyse der Dünnbettmörtel-Proben sowie Ausgangs- bzw. Zusatzstoffe

PDF-Nr.	Mineralname	Trivialname	Chemische Formel (PDF)	Abkürzung
00-049-0442	Calcium Silicate	Alit	Ca_3SiO_5	C_3S
00-033-0302	Larnite, syn., Calcium Silicate	Belit	Ca_2SiO_4	C_2S
00-038-1429	Tricalcium Aluminate, Calcium Aluminium Oxide	Aluminat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{C}_3\text{A}_{\text{cub.}}$
00-030-0226	Brownmillerite, syn.	Aluminatferrit	$\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_2\text{O}_5$	C_4AF
00-041-1451	Ettringite, syn., Calcium Aluminium Sulfate Hydroxide Hydrate	Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$	E
00-041-0221	Calcium Aluminium Oxide Carbonate Hydroxide Hydrate	Halbcarbonat	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3)_{0,5}(\text{OH}) \cdot 11,5 \text{H}_2\text{O}$	HC
00-044-1481	Portlandite, syn., Calcium Hydroxide	Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	P
00-046-1045	Quarz, syn., Silicone Oxide	Quarz	SiO_2	S
00-005-0586	Calcite, syn., Calcium Carbonate	Calcit	CaCO_3	-

3.5.4 Thermische Analyse zur Quantifizierung des Portlandit-Abbaus

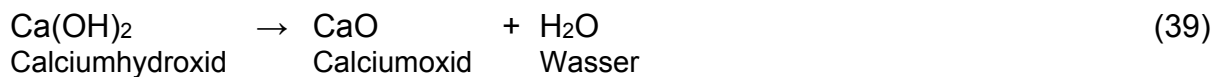
Die thermische Analyse (TG / DTG) nach DIN 51005 sowie DIN 51006 beschreibt die Änderung einer Probeneigenschaft bei aufgezwungener Temperaturänderung in Abhängigkeit von der Zeit. Bei der Thermogravimetrie (TG) werden diesbezüglich physikalische Vorgänge und chemische Reaktionen untersucht, die mit einer Masseänderung einer Probe verbunden sind. Die Messungen wurden mit einer Thermowaage (STA 449 F3 Jupiter®, Firma Netzsch) durchgeführt. Die thermogravimetrischen Analysen erfolgten an ausgewählten pulverförmigen Dünnbettmörtel-Proben analog zu den XRD-Analysen nach einem Probenalter von 2 bis 28 Tagen (Tabelle 16).

Tabelle 16: Gerätespezifische Einstellungen für die Durchführung von Thermoanalysen (TG / DTG)

Starttemperatur [°C]	40 °C (Stand- by-Modus)
Heizrate [K/min.]	5
Tiegelmaterial	Pt (> 500 °C), ohne Deckel
Atmosphäre	Synthetische Luft (N ₂ / O ₂ (80 / 20))
Probenmasse [mg]	32

Die Auswertung der TG- bzw. DTG-Kurven erfolgte mit Hilfe einer zugehörigen Software (Proteus 6.1.0B). Bei den DTG-Kurven handelt es sich um die erste zeitliche Ableitung der TG-Kurven. Sie beschreiben die Geschwindigkeit der Masseänderung. Bei den durchgeführten Messungen handelt es sich um Doppelbestimmungen.

Die durchgeführten Thermoanalysen hatten das primäre Ziel der quantitativen Bestimmung des Ca(OH)_2 -Gehalts in Dünnbettmörteln bzw. der Entwässerung dieser Phase im Temperaturbereich zwischen 390 bis 460 °C. Zunächst zerfällt Ca(OH)_2 unter Temperatureinwirkung in Calciumoxid und Wasser nach Formel 39 (Stark, et al., 2013):



Dieser Zerfall ist durch die Entwässerung bzw. den Masseverlust an Wasser m_H beschrieben. Die Berechnung der tatsächlichen Masse an Portlandit m_{CH} erfolgt gemäß Formel 40 (Lawrence, et al., 2006; Mortimer, et al., 2003):

$$m_{CH} = \frac{M_{CH}}{M_H} \cdot m_H = \frac{74,093 \text{ g/mol}}{18,015 \text{ g/mol}} \cdot m_H = 4,11 \cdot m_H \quad [\text{Ma.-%}] \quad (40)$$

$$\text{mit: } n_x = \frac{m_x}{M_x} \quad (41)$$

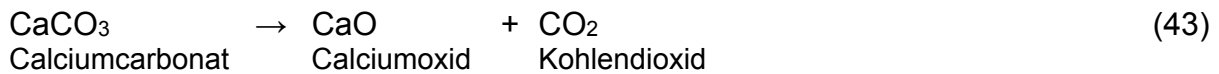
m_{CH}	: Masse Ca(OH)_2	[Ma.-%]
M_{CH}	: Molare Masse $\text{Ca(OH)}_2 = 74,093$	[g/mol]
M_H	: Molare Masse $\text{H}_2\text{O} = 18,015$	[g/mol]
m_H	: Masse H_2O bzw. Masseverlust	[Ma.-%]
n_x	: Stoffmenge	[mol]

Darüber hinaus wurden die im Dünnbettmörtel entstandenen Calcit-Massen gemäß Formel 42 berechnet (Lawrence, et al., 2006; Mortimer, et al., 2003):

$$m_{Cc} = \frac{M_{Cc}}{M_c} \cdot m_c = \frac{100,0869 \text{ g/mol}}{44,01 \text{ g/mol}} \cdot m_c = 2,27 \cdot m_c \quad [\text{Ma.-%}] \quad (42)$$

m_{Cc}	: Masse CaCO_3	[Ma.-%]
M_{Cc}	: Molare Masse $\text{CaCO}_3 = 100,0869$	[g/mol]
M_c	: Molare Masse $\text{CO}_2 = 44,0100$	[g/mol]
m_c	: Masse CO_2 bzw. Masseverlust	[Ma.-%]

Im Temperaturbereich von 640 bis 715 °C decarbonatisiert das CaCO₃ und zerfällt zu Calciumoxid und Kohlendioxid (Formel 43):



3.5.5 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Sämtliche REM-Aufnahmen dieser Arbeit wurden im Zentrum für Werkstoffanalytik (ZWL), Lauf a. d. Pegnitz im Probenalter von 28 Tagen - hydratisiert an Luft, im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe angefertigt. Die Untersuchungen wurden an einem FEG-Rasterelektronenmikroskop (Gemini 1530 VP, Firma LEO) durchgeführt.

3.6 Untersuchungen der Zementhydratation

Um zu prüfen, welche Auswirkungen die Dosierung von Zusatzstoffen auf die Zementhydratation hat, wurden neben der Messung des Luftporengehalts in den Dünnbettmörtel-Nullproben (Kap. 3.4.1.2), ausgewählte Dünnbett-Frischmörtel-Mischungen mittels isothermer Wärmeflusskalorimetrie und Vicat-Methode untersucht.

3.6.1 Isotherme Wärmeflusskalorimetrie

Die Messungen wurden an einem Wärmeflusskalorimeter nach (Kuzel, 1984; Pöllmann, et al., 1991) mit drei Messzellen (Probenmasse 2 g, Probenpräparation: „Externes Anmischen“) und einer Referenzzelle durchgeführt. Die Datenerfassung erfolgte alle 30 Sekunden mit einem Digitalmultimeter (Modell 2000, Firma Keithley). Zur Steuerung des Messgerätes und zur Auswertung der Daten wurde eine spezielle Software („OMI“/Mess-Software und „sep“/Auswertungs-Software, Firma Mesicon) verwendet. Die Wärmeflusskalorimetrie erlaubt die Bestimmung der Hydratationswärme nach (Kuzel, 1984) zu beliebigen Reaktionszeiten. Die Ergebnisdarstellung erfolgte aus Dreifachbestimmungen.

3.6.2 Messung der Erstarrungszeiten (Beginn und Ende)

Um die Zeitabhängigkeit der Viskositätsänderung bei der Hydratation modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen bewerten zu können, erfolgt ein Viskositäts-Vergleich mit den Dünnbettmörtel-Nullproben. Die Ausgangs- bzw. Vergleichs-Viskosität ist die ermittelte Normsteife einer Dünnbettmörtel-Nullprobe. In Abständen von 4 Minuten (einstellbar) wurde, bei einem Nadel-Fallgewicht von 300 g, die Eindringtiefe in den

„Dünnbettmörtel-Kuchen“ nach DIN EN 196-3 bzw. DIN EN 480-2 gemessen und der Erstarrungsverlauf aufgezeichnet. Für die Messungen kam ein automatisches Vicat-Nadelgerät (ToniSET Two-7302, Firma Toni Technik) zum Einsatz. Die Ergebnisdarstellung erfolgte aus Doppelbestimmungen.

3.7 Finite-Elemente Berechnungen unterschiedlicher Wandaufbauten

Durch Finite-Elemente Berechnungen ist es möglich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äquiv.}}$ eines monolithischen Wandbaustoffes bzw. Wandausschnitts mit zugehöriger Dünnbettmörtel-Fuge zu bestimmen. Als Finite-Elemente Programm kam hierfür eine Software (ANSYS CFX 17.2, Firma Ansys, Inc.) zum Einsatz, mit der Wärmeübergänge an Bauteilen abgeschätzt werden können.

3.8 Putzmörtel

Neben der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr.}}$ von Dünnbettmörtel durch Zusatz von pyrogener Kieselsäure wurde der Effekt an einem weiteren Mörtelsystem geprüft. Dazu wurde ein verkaufsfertiger zementhaltiger Sockel- und Nassraumputz eines namhaften Herstellers für den Innen- und Außenbereich ausgewählt, der gemäß DIN EN 998-2 auch als Unter- und Fertigputz verwendet wird. Der Putz zeichnet sich laut Herstellerangabe durch eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,45 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und einer Druckfestigkeit von $\beta_D \geq 6,0 \text{ MPa}$ aus und gehört nach DIN EN 1015-11 der Mörtelgruppe P III an. Von diesem Putz wurden zunächst die werkstofftechnischen Kenngrößen daraus hergestellter Nullproben mit einem w/m-Verhältnis von 0,18 ermittelt. Anschließend wurde der Putz durch Siebung in die entsprechenden Fraktionen aufgetrennt und grobe Siebfraktionen $\geq 125 \mu\text{m}$ anteilig durch pyrogene Kieselsäure substituiert. Für die Berechnung der Rezepturen wurde die Stoffraumrechnung verwendet (Schmidt, et al., 2018b). Bei der Herstellung der Mischungsreihen mit pyrogener Kieselsäure war eine angepasste Variation der w/m-Verhältnisse notwendig, wobei stets auf eine gute Verarbeitbarkeit des Putz-Frischmörtels geachtet wurde. Nach einer Lagerung der hergestellten Putzmörtel-Proben von 7 bzw. 28 Tagen erfolgte die Bestimmung der werkstofftechnischen Kenngrößen u. a. dynamische Elastizitätsmoduln, Dreipunkt-Biegezug- und Druckfestigkeiten, Trockenroh-dichten sowie Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr.}}$. Außerdem erfolgte die Untersuchung von Porengröße und Porengrößenverteilung, Gesamtporosität sowie der Feststoffdichte. Darüber hinaus wurde eine chemische und mineralogische Analyse durchgeführt.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit dargestellt und interpretiert. Zunächst wird auf die Vorversuche durch ein erstes Zusatzstoff-Screening eingegangen. Im Anschluss folgen die Ergebnisse bezüglich der Charakterisierung von Ausgangsstoffen, den Untersuchungen am abgebundenen Dünnbettmörtel sowie der Zementhydratation. Abschließend wird auf die FEM-Berechnung unterschiedlicher Wandaufbauten und die Übertragung der Ergebnisse auf einen Putzmörtel (Sockelputz) eingegangen.

4.1 Zusatzstoff-Screening ohne Stoffraumrechnung (Vorversuche)

Mithilfe eines Zusatzstoff-Screenings wurde die Wirkungsweise von zunächst 13 unterschiedlichen Zusatzstoffen auf den verwendeten Dünnbettmörtel untersucht. Bild 15 zeigt Aufnahmen der ausgewählten Zusatzstoffe; in Tabelle 17 sind besondere Merkmale beschrieben. In Bild 16 ist die Korrelation der Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten der Dünnbettmörtel-Proben nach einem Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Dosierung mit 5 bis 20 Vol.-% im Vergleich zur Nullprobe dargestellt.

Aus dem Screening geht hervor, dass die Dünnbettmörtel-Nullproben eine 28 Tage-Druckfestigkeit von $\beta_D = 10,1$ MPa und eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) im Mittel aufweisen und damit den Herstellerangaben in der Festigkeitsklasse M 10 entsprechen. Im Falle der Zugabe von Glasplättchen und Hohlglaskugeln der Sorte I mit je 15 Vol.-% wurde die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) auf jeweils $\lambda_{10, tr.} = 0,19$ W/(m·K) herabgesetzt. In beiden Fällen konnte die Druckfestigkeitsklasse M 10 jedoch nicht eingehalten werden. Die Zugabe der übrigen Zusatzstoffe bewirkte praktisch in keinem Fall eine Absenkung der Wärmeleitfähigkeit, aber in fast allen Fällen eine geringfügige bis deutliche Erhöhung der Druckfestigkeit. Durch Zugabe von 5 Vol.-% expandiertem Alumosilikat der Sorte III oder 15 Vol.-% Polypropylen-Spleissfasern wurde die Druckfestigkeit auf $\beta_D = 15,4$ MPa bzw. $\beta_D = 18,9$ MPa erhöht (Bild 16). Die Ergebnisse zeigen, dass eine Zusatzstoff-Dosierung von 10 Vol.-% die besten Ergebnisse hinsichtlich einer wärmetechnischen Optimierung unter Berücksichtigung der Festigkeitsklasse M 10 von Dünnbettmörtel bewirkt.



Hohlglaskugeln
Sorte I



Hohlglaskugeln
Sorte II



Phenolharzkugeln



Kaolin (China Clay)



Expandiertes Alu-
minosilikat Sorte I



Expandiertes Alu-
minosilikat Sorte II



Expandiertes Alu-
minosilikat Sorte III



Kieselgur



Ziegelmehl



Dralon-Kurzschnitt-
fasern



Glaswolle-Filz
(zerkleinert)



Polypropylen-
Spleissfasern



Glasplättchen



Glashohlkugeln



Schmelzkammer-
Granulat



Bimsmehl Sorte I



Bimsmehl Sorte II



Expandierter Perlit



Pyrogene
Kieselsäure



Vermiculit

Bild 15: Fotoaufnahmen der im Screening verwendeten Zusatzstoffe

In Tabelle 17 sind besondere Merkmale der eingesetzten Zusatzstoffe aufgeführt.

Tabelle 17: Besondere Merkmale der verwendeten Zusatzstoffe

Zusatzstoff	Besondere Merkmale
Hohlgaskugeln Sorte I	Aus alkaliarmen Borosilikatglas: niedrige Dichte, unterschiedliche Korngröße
Hohlgaskugeln Sorte II	
Phenolharzkugeln	Organisch, chemisch inert und mechanisch stabil, innen hohl, niedrige Dichte
Kaolin (China Clay)	Aluminiumsilikathydrat $Al_4(Si_4O_{10}(OH)_8)$: Fe-arm, kolloidale Teilchen, kalziniert
Expandiertes Alumosilikat Sorte I	Glimmerartiges Silikat aus der Gruppe der Aluminiumsilikate: hohl, geringe Dichte, hitzeexpandiert
Expandiertes Alumosilikat Sorte II	Glimmerartiges Silikat aus der Gruppe der Aluminiumsilikate: hohl, geringe Dichte, hitzeexpandiert, stark hydrophob
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	Glimmerartiges Silikat aus der Gruppe der Aluminiumsilikate: hohl, geringe Dichte, hitzeexpandiert, leicht saugend (hydrophil)
Kieselgur	Diatomeenerde: granuliert und kalziniert
Ziegelmehl	Gebrannter Ton: aufgemahlen
Dralon-Kurzschnittfasern	Polyacrylnitril: Länge 4 mm
Glaswolle-Filz	Mineralwolle: zerkleinert
Polypropylen-Spleissfasern	Länge: 18 mm
Glasplättchen	Aus alkaliarmen Borosilikatglas
Glashohlkugeln	Aus alkaliarmen Borosilikatglas: unporös, hydrophob, sehr niedrige Dichte
Schmelzkammer-Granulat	Nebenprodukt bei der Verfeuerung von Steinkohle: niedriges Schüttgewicht, fein aufgemahlen
Bismehl Sorte I	Bismehlgranulat aus amorphem Natrium-Aluminium-Silikat: unterschiedliche Korngröße
Bismehl Sorte II	
Expandierter Perlit	Natrium-Aluminium-Silikat-Gestein (Gruppe Obsidiane): hitzeexpandiert bei 1000 °C
Pyrogene Kieselsäure	Amorphes Siliziumdioxid: synthetisch, hydrophil, flammenhydrolytisch hergestellt, geringe Korngröße, hohe spezifische Oberfläche
Vermiculit	Aluminium-Eisen-Magnesium-Silikat

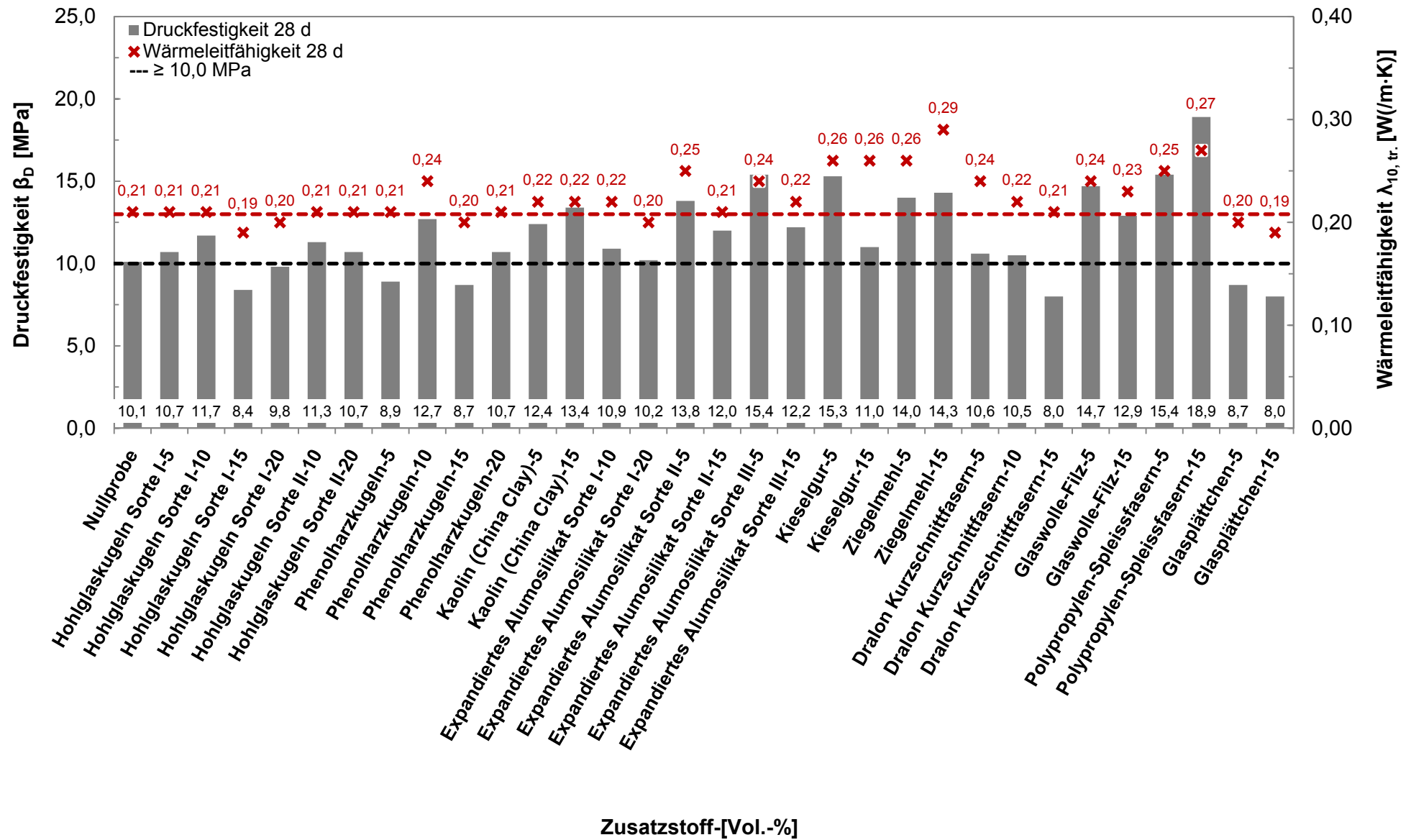


Bild 16: Zusatzstoff-Screening in Dünnbettmörtel; Korrelation der 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.}$ von Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Zugabe zwischen 5 bis 20 Vol.-% im Vergleich zur Nullprobe (Tab. A-1)

4.2 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Um die Wirkungsweise der ausgewählten Zusatzstoffe (Bild 15, Tabelle 17) auf das Dünnbettmörtel-System und dessen Werkstoffparameter genauer zu verstehen, wurden der Dünnbettmörtel und die Zusatzstoffe mit unterschiedlichen Methoden untersucht.

4.2.1 Korngrößenanalysen, Feststoffdichten und BET-Oberflächen

Tabelle 18 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen Korngrößen, Feststoffdichten und spezifischen Oberflächen. Das ungesiebte Trockenmörtel-Pulver verfügt über eine Korngröße von 31,14 μm , eine Feststoffdichte von 2,27 g/cm^3 und eine spezifische Oberfläche von 1,60 m^2/g im Mittel. Die d_{50} -Werte bzw. spezifischen Oberflächen der Siebrückstände x_1 bis x_6 liegen zwischen 15,05 und 823,76 μm bzw. 1,26 und 2,77 m^2/g im Mittel und steigen mit zunehmender Siebgröße an; die zugehörigen Feststoffdichten sinken dagegen ab. Eine Ausnahme macht in diesem Zusammenhang die Siebfraktion x_5 kleiner 500 μm . Sie hat mit $\rho_F = 1,38 \text{ g}/\text{cm}^3$ und $a_S = 1,27 \text{ m}^2/\text{g}$ im Mittel die niedrigste Feststoffdichte sowie niedrigste spezifische Oberfläche, da es sich hierbei um den „Leichtzuschlag“ des Ausgangsmaterials handelt und dieser u. a. aus Vermiculit sowie Schaumglas- und Styroporkugeln besteht (Bilder A-1). Die beiden Zusatzstoffe Glasplättchen und Vermiculit haben mit $d_{50} = 257,71 \mu\text{m}$ und $d_{50} = 123,60 \mu\text{m}$ die höchsten Korngrößen-Werte und grenzen sich von den übrigen Zusatzstoffen deutlich ab. Die zugehörigen Feststoffdichten und spezifischen Oberflächen wurden mit $\rho_F = 2,20 \text{ g}/\text{cm}^3$ und $a_S = 0,75 \text{ m}^2/\text{g}$ bzw. $\rho_F = 2,01 \text{ g}/\text{cm}^3$ und $a_S = 8,26 \text{ m}^2/\text{g}$ im Mittel bestimmt (Tabelle 18). Im Falle der Glasplättchen muss auf deren brüchige sowie plättchenförmige Struktur hingewiesen werden; hier liegen keine Partikel bzw. Körner vor (Bilder A-1). Die Zusätze Hohlglas- und Phenolharzkugeln, expandierte Alumosilikate, Glashohlkugeln sowie Schmelzkammer-Granulat verfügen über ähnliche d_{50} -Werte sowie BET-Oberflächen im Bereich zwischen etwa 30 bis 70 μm bzw. 0,5 bis 4,3 m^2/g . Die zugehörigen Feststoffdichten sind allesamt kleiner 1,0 g/cm^3 , mit Ausnahme des Schmelzkammer-Granulats. Hier liegt eine im Vergleich hohe Dichte von $\rho_F = 2,62 \text{ g}/\text{cm}^3$ vor. Die Hohlglaskugeln der Sorte I haben mit $\rho_F = 0,12 \text{ g}/\text{cm}^3$ im Mittel die niedrigste Feststoffdichte aller verwendeter Zusatzstoffe. Der Zusatzstoff Kaolin besitzt einen d_{50} -Wert von 6,48 μm , die höchste Dichte aller Zusätze von 2,65 g/cm^3 und eine BET-Oberfläche von 12,54 g/cm^2 im Mittel.

Tabelle 18: Korngrößen, Feststoffdichten und spezifische Oberflächen von ungesiebertem Dünnbettmörtel-Pulver, Dünnbettmörtel-Siebrückständen sowie eingesetzten Zusatzstoffen (Tab. A-2 bis A-4)

Nullprobe: Siebrückstände x_i [μm] / Zusatzstoffe		Korngröße d_{50} -Wert [μm]	Feststoffdichte Mittelwert ρ_F [g/cm^3]	Spezifische Oberfläche BET a_s [m^2/g]
Dünnbettmörtel- Pulver (trocken)	Ungesiebt	31,14	2,27	1,60
	$x_1 < 63$	15,05	3,24	1,26
	$x_2 < 90$	15,50	3,19	1,31
	$x_3 < 125$	24,00	3,00	1,47
	$x_4 < 250$	49,53	2,09	2,03
	$x_5 < 500$	274,50	1,38	1,27
	$x_6 \geq 500$	823,76	1,44	2,77
Hohlglaskugeln Sorte I		56,32	0,12	3,21
Hohlglaskugeln Sorte II		42,31	0,47	4,28
Phenolharzkugeln		66,35	0,62	n. a.
Kaolin (China Clay)		6,48	2,65	12,54
Expandiertes Alumosilikat Sorte I		35,55	0,79	2,04
Expandiertes Alumosilikat Sorte II		34,08	0,86	2,33
Expandiertes Alumosilikat Sorte III		34,73	0,82	2,89
Kieselgur		5,83	2,25	325,05
Ziegelmehl		23,30	2,44	10,86
Dralon-Kurzschnittfasern		n. a.	1,18	n. a.
Glaswolle-Filz (zerkleinert)		n. a.	2,67	n. a.
Polypropylen-Spleissfasern		n. a.	0,93	n. a.
Glasplättchen		257,71	2,20	0,75
Glashohlkugeln		53,49	0,13	1,99
Schmelzkammer-Granulat		48,08	2,62	0,55
Bismehl Sorte I		10,86	2,40	2,49
Bismehl Sorte II		16,61	2,33	7,30
Expandierter Perlit		25,65	2,20	2,92
Pyrogene Kieselsäure		10,06	1,96	181,68
Vermiculit		123,60	2,01	8,26

n. a.: nicht auswertbar

Im Falle der Kieselgur wurden der niedrigste D_{50} -Wert mit 5,83 μm sowie die höchste spezifische Oberfläche von 325,05 m^2/g gemessen (Tabelle 18). Die beiden Messergebnisse sind aufgrund der Kieselalgen-Struktur nachvollziehbar (Bilder A-2). Die Feststoffdichte liegt bei 2,25 g/cm^3 . Das Ziegelmehl hat eine Korngröße von 23,30 μm , eine Feststoffdichte von 2,44 g/cm^3 und eine BET-Oberfläche von 10,86 m^2/g . Die faserförmigen Zusätze Dralon-Kurzschnittfasern, Glaswolle-Filz und Polypropylen-Spleissfasern verfügen über Dichten von 1,18, 2,67 und 0,93 g/cm^3 .

Die beiden Bimsmehle unterscheiden sich sowohl in ihrer Korngröße, als auch spezifischen Oberfläche voneinander. Die gemessenen Feststoffdichten sind vergleichbar. Die Mittelwerte liegen bei $d_{50} = 10,86$ bzw. $16,61 \mu\text{m}$, $\rho_F = 2,40$ bzw. $2,33 \text{ g/cm}^3$ sowie $a_s = 2,49$ bzw. $7,30 \text{ m}^2/\text{g}$. Der expandierte Perlit zeichnet sich durch eine Korngröße von $25,65 \mu\text{m}$, eine Dichte von $2,20 \text{ g/cm}^3$ und eine BET-Oberfläche von $2,92 \text{ m}^2/\text{g}$ aus. Die pyrogene Kieselsäure verfügt mit $181,68 \text{ m}^2/\text{g}$ über eine vergleichsweise sehr große BET-Oberfläche sowie mit $10,06 \mu\text{m}$ über einen niedrigen d_{50} -Wert. Beide Ergebnisse können auf eine erhöhte Reaktivität dieses Zusatzstoffes hindeuten. Die Feststoffdichte wurde mit $1,96 \text{ g/cm}^3$ bestimmt.

4.2.2 Röntgenfluoreszenzanalysen (XRF)

Die Röntgenfluoreszenzanalysen wurden zunächst am Dünnbettmörtel-Trockenpulver und den Siebrückständen x_1 bis x_6 durchgeführt (Tabelle 19). Anschließend erfolgten Analysen der Zusatzstoffe pyrogene Kieselsäure, expandierter Perlit sowie expandiertes Alumosilikat der Sorte III (Tabelle 20). Im Vergleich zu den anderen Zusätzen (Bild 15, Tabelle 17) erwiesen sich diese als besonders geeignete Zusatzstoffe für den verwendeten Dünnbettmörtel (Schmidt, et al., 2018b; Schmidt, et al., 2018c).

Aus der XRF-Analyse des ungesiebten Trockenmörtel-Pulvers gehen die typischen Hauptbestandteile des Zements, nämlich Calciumoxid mit 50,94 Ma.-%, Siliziumdioxid mit 28,10 Ma.-%, Aluminiumoxid mit 5,28 Ma.-% und Eisenoxid mit 2,74 Ma.-% hervor. Darüber hinaus enthält der Trockenmörtel Schwefeltrioxid mit 2,99 Ma.-% als Sulfatträger sowie 2,54 Ma.-% Magnesiumoxid. Der Glühverlust GV (950 °C) wurde mit 3,22 Ma.-% bestimmt (Tabelle 19). Im Falle der Siebrückstände x_1 bis x_6 lässt sich für die CaO-Gehalte eine Abnahme von 60,79 auf 14,06 Ma.-% sowie eine Zunahme der SiO₂-Gehalte von 19,11 auf 52,47 Ma.-% feststellen. Dieser Zusammenhang ist plausibel, da die Siebrückstände kleiner 125 μm primär aus fein aufgemahlenem Zementklinker und die Rückstände größer 125 μm aus Siliziumdioxid in Form von Quarzmehl oder „Stützkorn“ aus gröberem Quarz (x_5 mit 60,40 Ma.-%) bestehen (Bilder A-1.1 und A-1.2). Die Al₂O₃- sowie Fe₂O₃-Gehalte der Feianteile (x_i kleiner 125 μm) sind mit etwa 5,5 Ma.-% bzw. 3,0 Ma.-% im Mittel weitestgehend konstant. Die Grobanteile verfügen über geringfügig höhere Anteile an Al₂O₃ sowie niedrigere Anteile an Fe₂O₃.

Der hohe Glühverlust des Siebrückstandes x_6 mit annähernd 7 Ma.-% lässt sich dadurch erklären, da diese Siebfraktion neben Ziehharmonika-förmigem Vermiculit und Schaumglaskugeln aus u. a. großvolumigen Styroporkugeln besteht, welche während des Glühvorgangs vollständig verbrennen (Bild A-1.1).

Tabelle 19: Röntgenfluoreszenzanalysen und Glühverluste GV (950 °C) des ungesiebten Trockenmörtels (Nullprobe, Spalte 2) sowie der Siebrückstände ($x_1 < 63 \mu\text{m}$ bis $x_6 \geq 500 \mu\text{m}$)

Oxid / Phase	Siebrückstände x_1 bis x_6 des Dünnbettmörtel-Pulvers						
	Trockenmörtel- ungesiebt < 1000 [μm] [Ma.-%]	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
		< 63	< 90	< 125	< 250	< 500	≥ 500
		[μm] [Ma.-%]	[μm] [Ma.-%]	[μm] [Ma.-%]	[μm] [Ma.-%]	[μm] [Ma.-%]	[μm] [Ma.-%]
SiO ₂	28,10	19,11	19,38	20,17	32,03	60,40	52,47
Al ₂ O ₃	5,28	5,35	5,49	5,60	6,18	4,01	6,30
TiO ₂	0,23	0,26	0,26	0,25	0,23	0,13	0,21
CaO	50,94	60,79	60,17	57,32	43,74	19,21	14,06
MgO	2,54	2,05	2,08	2,06	2,16	2,31	8,58
K ₂ O	1,30	1,14	1,09	1,30	1,84	1,52	1,31
Na ₂ O	1,86	0,28	0,32	0,38	1,06	7,07	6,26
P ₂ O ₅	0,41	0,50	0,50	0,48	0,40	0,19	0,11
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04
SrO	0,26	0,31	0,31	0,29	0,22	0,09	0,06
SO ₃	2,99	3,75	3,52	3,61	3,33	1,19	0,95
Fe ₂ O ₃	2,74	2,96	3,00	2,95	2,59	1,23	2,54
Mn ₃ O ₄	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,06
ZnO	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,03	0,03
V ₂ O ₅	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
ZrO ₂	-	0,06	0,06	0,06	0,05	0,03	0,03
BaO	-	0,04	0,04	0,04	0,04	0,09	0,08
GV (950 °C)	3,22	3,26	3,67	5,35	5,98	2,41	6,94
Summe	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Die XRF-Analysen der Zusatzstoffe zeigen, dass sich diese insbesondere durch verschiedene Gehalte an SiO₂ und Al₂O₃ unterscheiden (Tabelle 20). Im Falle der pyrogenen Kieselsäure besteht diese zu fast 100 Ma.-% aus amorphem Siliziumdioxid. Der expandierte Perlit und das expandierte Alumosilikat der Sorte III ähneln sich in ihrer Zusammensetzung. Mit jeweils ungefähr 75 Ma.-% Siliziumdioxid, etwa 13 Ma.-% Aluminiumoxid und ähnlichen Gehalten an Natrium-, Kalium- und Eisenoxid unterscheiden sich diese deutlich von der Zusammensetzung der pyrogenen Kieselsäure.

Tabelle 20: Röntgenfluoreszenzanalysen und Glühverluste GV (950 °C) der Zusatzstoffe pyrogene Kieselsäure, expandierter Perlit und expandiertes Alumosilikat Sorte III

Oxid / Phase	Pyrogene Kieselsäure [Ma.-%]	Expandierter Perlit [Ma.-%]	Expandiertes Alumosilikat Sorte III [Ma.-%]
SiO ₂	99,9	76,4	75,3
Al ₂ O ₃	-	13,0	13,8
TiO ₂	-	0,1	0,1
CaO	-	1,1	0,7
MgO	-	0,2	0,1
K ₂ O	-	3,6	4,4
Na ₂ O	-	4,2	4,7
P ₂ O ₅	-	-	0,0
Cr ₂ O ₃	-	-	-
SrO	-	-	-
SO ₃	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-	1,1	0,7
Mn ₃ O ₄	-	-	-
ZnO	-	-	-
V ₂ O ₅	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-
BaO	-	-	-
Y ₂ O ₃	-	-	-
CuO	-	0,1	0,1
NiO	-	-	-
MnO	-	0,1	0,1
Cl	-	0,1	-
GV (950 °C)	-	-	-
Summe	99,9	100,0	100,0

4.2.3 Röntgendiffraktometrie (XRD)

In der XRD-Analyse des ungesiebten Dünnbettmörtel-Pulvers wurden typische Portlandzement-Klinkerphasen identifiziert (C₃S, C₂S, C₃A, C₂(A,F)) (Bild 17). Die Phasen sind entsprechend mit „a, b, l und f“ gekennzeichnet. Darüber hinaus wurde Calcit (c) und Quarz (q) nachgewiesen. Die Sulfatträger im ungesiebten Dünnbettmörtel-Pulver sind Anhydrit (an), Bassanit (ba) und Arcanit (ar). Aus den XRD-Röntgenanalysen der Zusatzstoffe (Bild 18) geht hervor, dass die pyrogene Kieselsäure aus zwei SiO₂-Modifikationen Tridymit und α-Quarz besteht (Salmang, et al., 2007). Die entsprechende Untersuchung des expandierten Perlits ergab Kalknatronfeldspat und α-Quarz als kristalline Phasen. Die genaue Zusammensetzung konnte aufgrund der geringen Intensitäten nicht bestimmt werden.

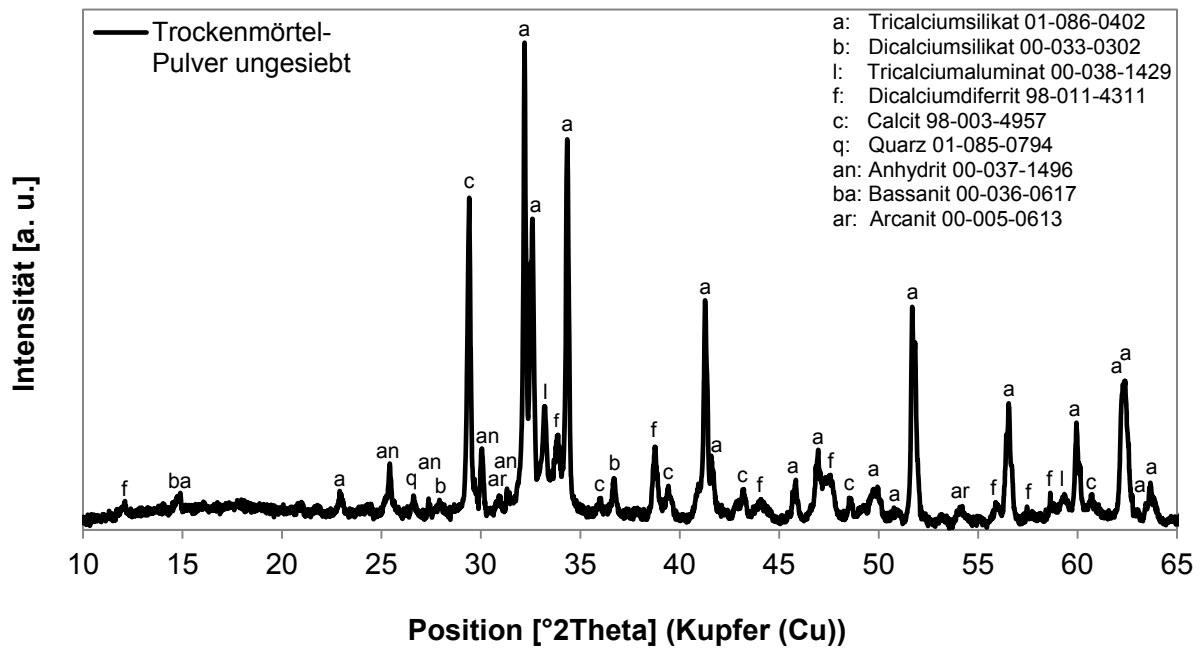


Bild 17: Röntgendiffraktogramm des ungesiebten Dünnbettmörtel-Trockenpulvers

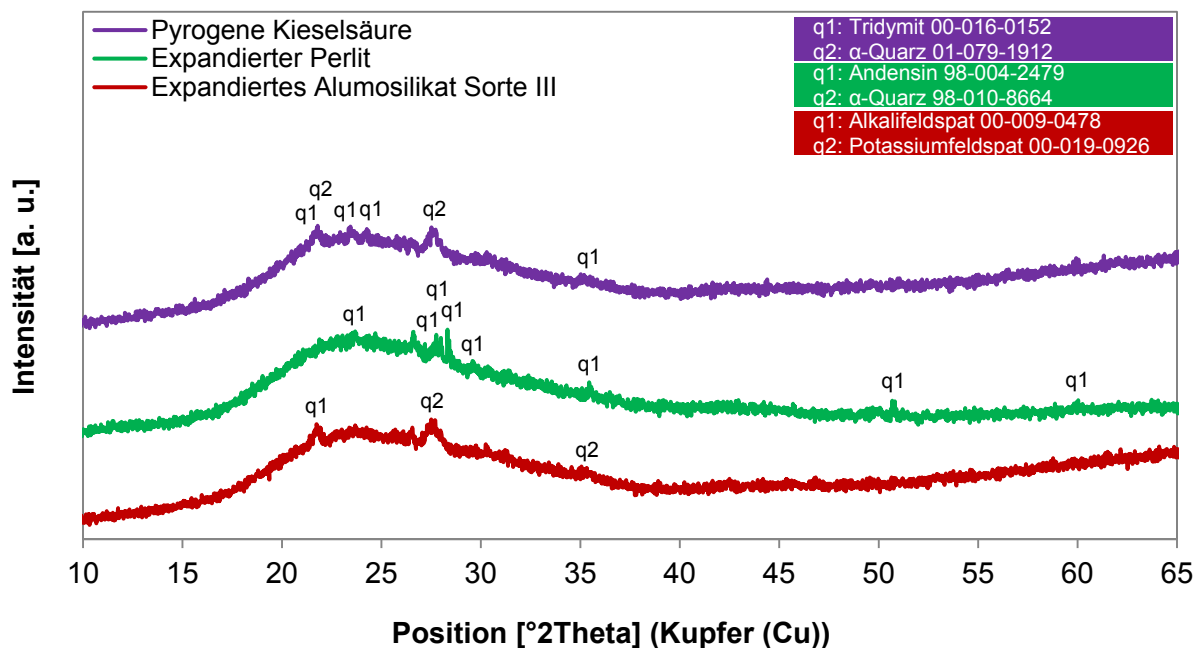


Bild 18: Röntgendiffraktogramme der Zusatzstoffe pyrogene Kieselsäure, expandierter Perlit und expandiertes Alumosilikat Sorte III

Im expandierten Alumosilikat der Sorte III (Bild 18) wurden Alkalifeldspäte identifiziert (Lagaly, et al., 2005). In allen drei Zusatzstoffen ist im XRD-Diagramm im Bereich zwischen 15 bis 35 °2 θ eine deutliche Anhebung des Untergrunds erkennbar (röntgenamorpher Anteil).

4.2.4 Porenanalyse von Pulverproben durch Quecksilberporosimetrie

Der Auswertebereich der Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie (Tabelle 21) erstreckt sich von der Messobergrenze der Makroporen (205 μm) bis zum Bereich der Mesoporen zwischen 50 bis 2 nm. Die gemessenen Pulverproben verfügen über keine Mikroporen mit Durchmessern unter 2 nm. Das spezifische Porenvolumen wurde anteilig auf drei Porengrößen-Bereiche umgerechnet (Spalte 3). Der häufigste Porendurchmesser (Modalwert) sowie der mittlere Porendurchmesser (Medianwert) beziehen sich auf den kompletten Porenbereich (205 μm bis 20 nm).

Tabelle 21: Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie für ungesiebttes Trockenmörtel-Pulver sowie eingesetzte Zusatzstoffe

Nullprobe / Zusatzstoff	Porengrößen- bereich [μm]	Spezifisches Porenvolumen		Häufigster Porendurch- messer d_p [μm]	Mittlerer Porendurch- messer [μm]
		Anteilig V_q [cm^3/g]	Gesamt		
Trockenmörtel-Pulver ungesiebt (Nullprobe)	200,00 - 4,00	0,311	0,75	4,68	3,17
	4,00 - 0,05	0,426			
	0,05 - 0,02	0,009			
Pyrogene Kieselsäure	205,00 - 4,00	10,324	14,70	35,58	16,04
	4,00 - 0,05	3,511			
	0,05 - 0,02	0,868			
Expandierter Perlit	205,00 - 4,00	4,217	4,85	8,19	8,01
	4,00 - 0,05	0,632			
	0,05 - 0,02	-			
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	195,00 - 4,00	3,803	6,82	19,48	5,73
	4,00 - 0,05	3,016			
	0,05 - 0,02	0,041			

Die Bilder 19.1 und 19.2 zeigen das spezifische und kumulative Porenvolumen jeweils in Abhängigkeit vom Porendurchmesser. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass das ungesiebte Trockenmörtel-Pulver über ein, im Vergleich zu den Zusatzstoffen, niedriges spezifisches Gesamtporen-Volumen von 0,75 cm^3/g verfügt (Tabelle 21; Spalte 4). Die pyrogene Kieselsäure besitzt mit 14,70 cm^3/g das höchste Porenvolumen. Sie zeigt außerdem einen auffälligen Porendurchmesser von $d_p = 25$ nm im Bereich der Mesoporen, aber auch einen hohen Anteil an Poren mit einem Durchmesser größer 4 μm bis zur Messobergrenze von 205 μm (Bild 19.1). Die breite Verteilung der Porendurchmesser ist aufgrund der unterschiedlichen Größe der Kiesel-

säure-Agglomerate (Bild A-1.21) nachvollziehbar. Die spezifischen Porenvolumina des expandierten Perlits und des expandierten Alumosilikats der Sorte III betragen 4,85 bzw. 6,82 cm³/g.

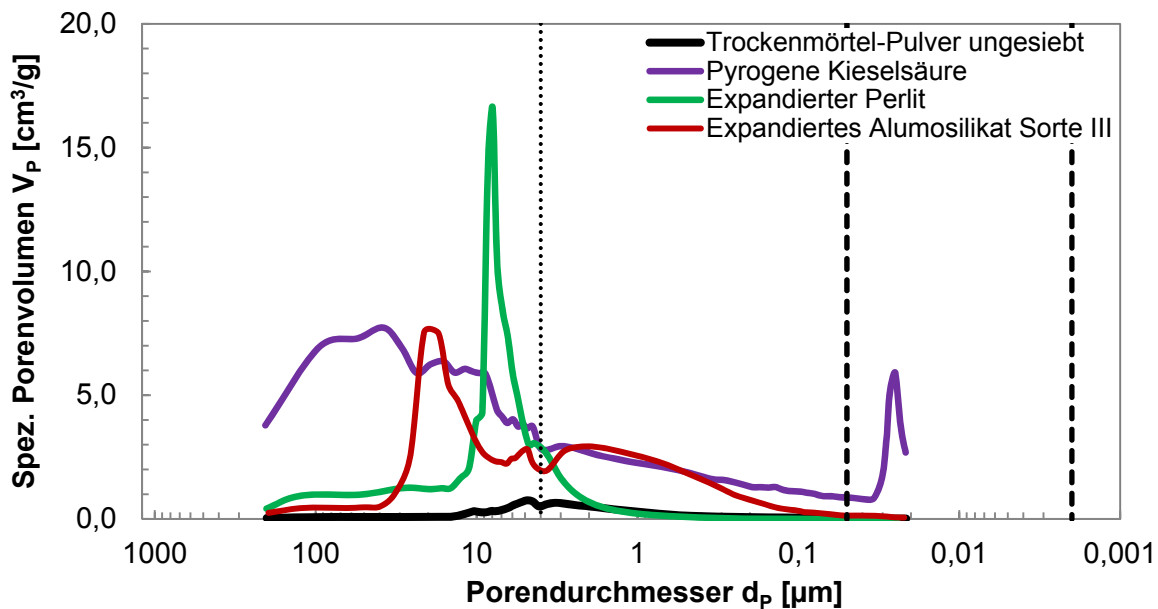


Bild 19.1: Spezifisches Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 205 μm bis 20 nm für die ungesiebte Trockenmörtel-Probe und eingesetzte Zusatzstoffe

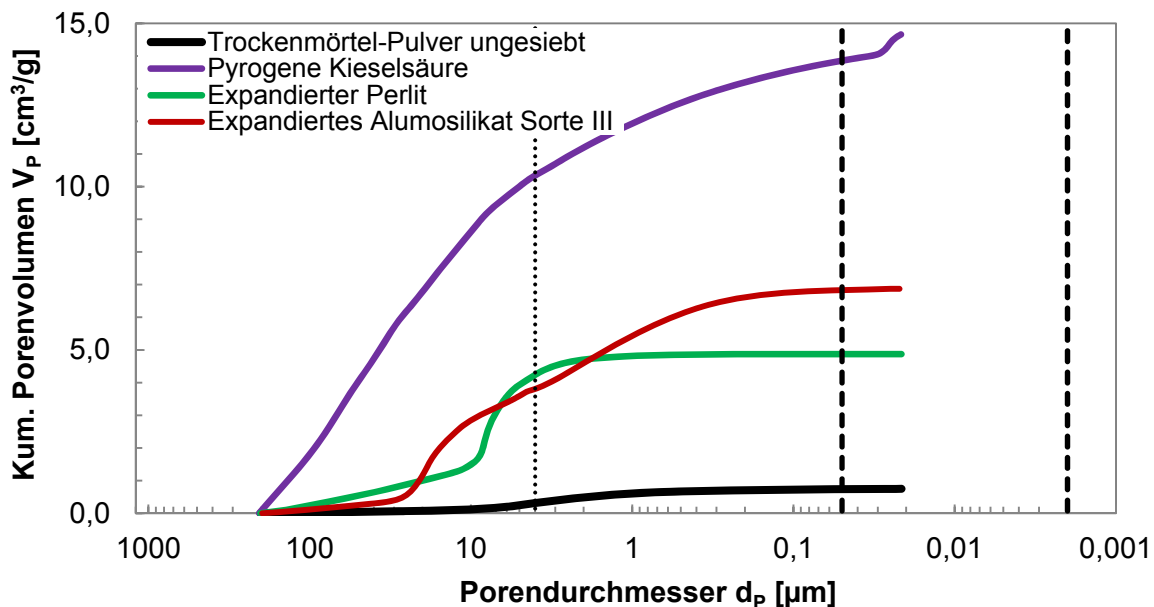


Bild 19.2: Kumulatives Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 205 μm bis 20 nm für die ungesiebte Trockenmörtel-Probe und eingesetzte Zusatzstoffe

Der expandierte Perlit zeigt eine monomodale Porengrößenverteilung (Bild 19.1) mit einem mittleren Durchmesser von $d_P = 8,01 \mu\text{m}$. Der mittlere Porendurchmesser des Alumosilikats der Sorte III wurde mit $d_P = 5,73 \mu\text{m}$ bestimmt. Sowohl der expandierte Perlit, als auch das expandierte Alumosilikat der Sorte III verfügen praktisch über keine bzw. nur sehr wenige Poren kleiner 50 nm (Tabelle 21; Spalte 3).

4.2.5 Wassersorptionsvermögen

Das expandierte Alumosilikat der Sorte III und der expandierte Perlit haben mit 381 bzw. 365 Ma.-% ein ähnlich starkes Wassersorptionsvermögen. Im Falle der pyrogenen Kieselsäure wurde das stärkste Sorptionsvermögen bestimmt. Die Wasseraufnahme betrug hier 1350 Ma.-% (Tabelle 22).

Tabelle 22: Wassersorptionsvermögen hydrophiler Zusatzstoffe

Zusatzstoff	Wasseraufnahme [Ma.-%]
Pyrogene Kieselsäure	1350
Expandierter Perlit	365
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	381

4.3 Zusatzstoff-Screening mit Stoffraumrechnung

Tabelle 23 zeigt die Mittelwerte der Siebanalyse aus insgesamt 18 Einzelbestimmungen (18 Stück Dünnbettmörtel-Säcke) bzw. umgerechnet etwa 270 kg Dünnbettmörtel-Trockenpulver. Die durchschnittliche Füllmenge eines Sackes Dünnbettmörtel beträgt 15,43 kg (Tabelle 23; Spalte 2). Teilt man die gemittelten Siebrückstände in Fein- und Grobanteile auf, so ergibt sich daraus ein Massenverhältnis von etwa 3 zu 1 (73 zu 27 Ma.-%). Der Siebrückstand x_5 kleiner 500 μm hat mit 2,07 l bzw. 32,42 Vol.-% im Mittel das größte Volumen.

Für jeden neu verwendeten Dünnbettmörtel-Sack wurde im Anschluss der Siebanalyse, der Luftgehalt einer Frischmörtel-Teilprobe (Nullprobe) gemessen. Dieser betrug im Mittel 20 % (Tab. A-5).

Tabelle 23: Siebanalyse (Mittelwerte) von insgesamt 18 Dünnbettmörtel-Säcken je 15 kg (Tab. A-2)

Siebfraktion / Maschenweite x_i [μm]	Masse		Masse Feinanteil	Masse Grobanteil	Volumen	
	m_{x_i} [kg]	m_{x_i} [Ma.-%]	$m_{x_1+x_2+x_3}$ [Ma.-%]	$m_{x_4+x_5+x_6}$ [Ma.-%]	V_i [l]	V_i [Vol.-%]
$x_1 < 63$	5,88	38,11	73	27	1,82	28,50
$x_2 < 90$	3,42	22,16			1,07	16,81
$x_3 < 125$	1,97	12,77			0,66	10,32
$x_4 < 250$	0,66	4,26			0,31	4,93
$x_5 < 500$	2,86	18,52			2,07	32,42
$x_6 \geq 500$	0,65	4,18			0,45	7,02
$\Sigma x_i < 1000$	15,43	100,00	100		6,37	100,00

4.4 Untersuchungen am abgeordneten Dünnbettmörtel

Das folgende Unterkapitel behandelt zunächst die Ergebnisse aus den Untersuchungen des weiteren Zusatzstoff-Screenings durch Stoffraumrechnung. Im Anschluss daran folgen die Ergebnisse optimierter bzw. favorisierter Dünnbettmörtel-Mischungen.

4.4.1 Zusatzstoff-Screening mit Stoffraumrechnung – Teil I

Bei der Herstellung der Dünnbettmörtel-Mischungen wurde das w/m-Verhältnis für alle Mischungen zunächst in einem ähnlichen Bereich eingestellt, nämlich zwischen 0,56 bis 0,62. Nur bei der Mischung mit pyrogener Kieselsäure war ein erhöhtes w/m-Verhältnis notwendig, da bei diesem Zusatzstoff ein extrem hohes Wassersorptionsvermögen (1350 Ma.-%) vorliegt. Die Verarbeitbarkeit aller Frischmörtel ist im Vergleich zur Nullprobe für alle Mischungen weitestgehend gleich geblieben. Den Dünnbettmörtel-Mischungen wurden jeweils 10 Vol.-% der Zusatzstoffe zugemischt und daraus Proben für die Bestimmung der werkstofftechnischen Parameter hergestellt (Tab. A-6).

4.4.1.1 Massenabnahmen der Normprismen im Hydratationszeitraum

Die Prüfkörper (Normprismen) der Dünnbettmörtel-Nullproben erfuhren im Zeitraum von 2 bis 28 Tagen einen Massen- bzw. Wasserverlust von im Mittel 20,0 Ma.-% (Bild 20). Die durch pyrogene Kieselsäure und Vermiculit modifizierte Dünnbettmörtel-Proben zeigen mit 24,2 bzw. 21,7 Ma.-% im gleichen Zeitraum einen höheren Wasserverlust (Tab. A-7). Im Falle der kieselsäurehaltigen Proben lässt sich dies auf

das hohe w/m-Verhältnis von 0,86 zurückführen (Wassersorptionsvermögen 1350 Ma.-%).

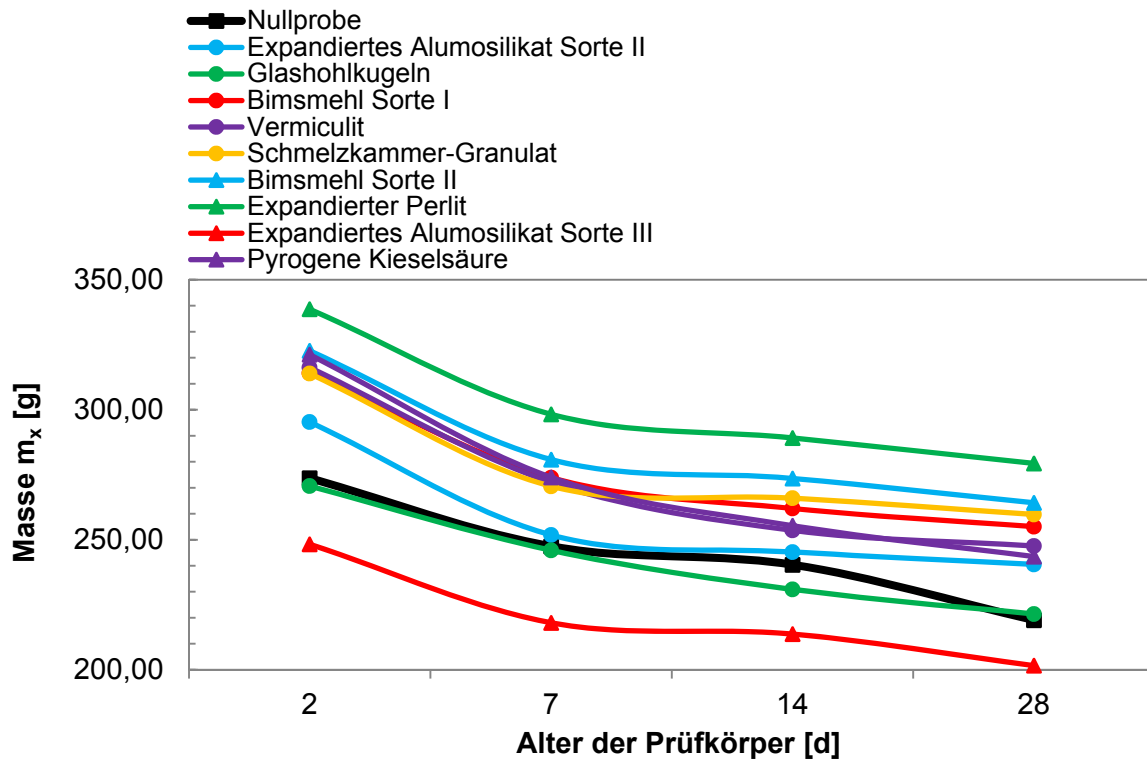


Bild 20: Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben mit jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff (Tab. A-7)

Bild 20 zeigt, dass die Dosierung der verwendeten Zusatzstoffe zum Dünnbettmörtel-System eine Veränderung der Massen- bzw. Wasserverluste während der Hydratation bzw. des Abbinde-Vorgangs bewirkt. Der generelle Massenunterschied der Prüfkörper nach 28 Tagen lässt sich dabei auf die unterschiedlichen Feststoffdichten der Zusatzstoffe zurückführen. Der expandierte Perlit besitzt eine mit $2,20 \text{ g/cm}^3$ höhere Dichte als das expandierte Aluminosilikat der Sorte III mit $0,82 \text{ g/cm}^3$; somit sind die perlithaltigen Prüfkörper um etwa 25 % schwerer.

4.4.1.2 Werkstofftechnische Parameter

In Tabelle 24 sind die werkstofftechnischen Parameter der Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierter Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings mit Stoffraumrechnung eingetragen.

Tabelle 24: Werkstofftechnische Parameter (BET-Oberflächen, E-Moduln, Dreipunkt-Biegezug- und Druckfestigkeiten sowie Wärmeleitfähigkeiten und Trockenrohdichten) modifizierter Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Dosierung im Vergleich zur Nullprobe (Tab. A-8)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosie- rung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	BET- Ober- fläche as [m ² /g]	E-Modul		Dreipunkt- Biegezug- festigkeit		Druck- festigkeit		Wärmeleit- fähigkeit λ _{10, tr.} [W/(m·K)]	Trocken- rohdichte ρ _R [g/cm ³]		
				7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d				
				E _{dyn.}		β _B		β _D				Mittelwerte	
				[GPa]		[MPa]		[MPa]				Mittelwerte	
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	17,34	5,3	4,4	1,3	2,5	8,0	10,3	0,21	0,85		
Expandiertes Alu- mosilikat Sorte II	10	0,60	9,57	5,5	5,3	1,2	3,0	11,0	11,7	0,22	0,85		
Glashohlkugeln		0,62	8,89	5,0	4,6	1,8	2,3	6,8	9,6	0,22	0,81		
Bimsmehl Sorte I		0,56	12,25	6,3	5,7	1,8	3,4	12,0	14,5	0,23	0,92		
Vermiculit		0,57	8,32	6,1	5,4	1,9	3,5	11,9	12,0	0,23	0,93		
Schmelzkammer- Granulat		0,56	9,49	6,2	5,7	1,6	3,7	11,2	14,2	0,24	0,93		
Bimsmehl Sorte II		0,56	10,09	6,6	6,4	1,6	4,1	12,9	15,1	0,25	0,96		
Expandierter Perlit		0,57	8,74	7,7	7,5	1,9	5,6	16,9	20,5	0,25	0,99		
Expandiertes Alu- mosilikat Sorte III		0,60	17,33	4,1	4,0	1,0	2,7	7,2	9,0	0,18	0,73		
Pyrogene Kieselsäure		0,86	18,02	5,6	4,9	1,2	2,0	8,7	11,9	0,17	0,82		

BET-Oberflächen

Die ausgehärteten Dünnbettmörtel-Nullproben weisen im Mittel eine BET-Oberfläche von 17,34 m²/g auf. Durch Dosierung aller eingesetzten Zusatzstoffe, außer der pyrogenen Kieselsäure, verringert sich die BET-Oberfläche. Im Falle der Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure wird diese von 17,34 auf 18,02 m²/g erhöht. Die Dünnbettmörtel-Proben mit Zugabe von 10 Vol.-% expandiertem Perlit verfügen mit 8,74 m²/g im Mittel über die niedrigste spezifische Oberfläche (Tabelle 24).

Dynamische Elastizitätsmoduln

Die E-Moduln der Dünnbettmörtel-Nullproben betragen nach 7 bzw. 28 Tagen 5,3 bzw. 4,4 GPa im Mittel. Generell ist festzustellen, dass die E-Moduln im Zeitraum von 7 bis 28 Tagen stets abnehmen. Bei Verwendung des Alumosilikats der Sorte III ist der E-Modul nach 28 Tagen niedriger als der Wert der Nullprobe. Die höchsten E-Modul-Werte wurden durch Zugabe von 10 Vol.-% expandiertem Perlit erzielt. Dabei

wurde nach einer Aushärtezeit von 7 Tagen der E-Modul der Nullprobe von 5,3 auf 7,7 GPa erhöht und lag nach 28 Tagen Aushärtezeit bei 7,5 GPa (Tabelle 24).

Dreipunkt-Biegezugfestigkeiten

Die Biegezugfestigkeiten der Nullproben zeigen nach 7 Tagen einen Mittelwert von $\beta_B = 1,3$ MPa und einen Mittelwert von 2,5 MPa nach 28 Tagen. Die höchsten Biegezugfestigkeiten wurden durch Zugabe von expandiertem Perlit erzielt; nämlich nach 7 Tagen mit $\beta_B = 1,9$ MPa und nach 28 Tagen mit $\beta_B = 5,6$ MPa. Im Verlauf der Abbindezeit von 28 Tagen erfolgte eine Erhöhung um 195 %. Durch Dosierung der Zusatzstoffe expandiertes Alumosilikat der Sorte II und III wurden die 7 Tage-Biegezugfestigkeiten im Vergleich zur Nullprobe verringert. Die Werte nach einer Abbindezeit von 28 Tagen sind gegenüber der Nullprobe erhöht. Die Zusatzstoffe Glashohlkugeln und pyrogene Kieselsäure bewirken mit 2,3 bzw. 2,0 MPa nach 28 Tagen gegenüber der Nullprobe jeweils niedrigere Biegezugfestigkeiten (Tabelle 24).

Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten

Die gemessenen Druckfestigkeiten β_D und Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.}$ sind in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Zugabe dargestellt. Das Diagramm zeigt außerdem die Festigkeitsentwicklung der Mörtelmischungen nach 7 und 28 Tagen (Bild 21). Die Dünnbettmörtel-Nullproben erreichten nach 7 Tagen im Mittel eine Druckfestigkeit von 8,0 MPa und nach 28 Tagen von 10,3 MPa sowie nach 28 Tagen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) (Tabelle 24). Durch Dosierung von jeweils 10 Vol.-% der Zusatzstoffe konnte die Druckfestigkeit in jedem Falle gesteigert werden; mit Ausnahme der Proben mit Zugabe der Glashohlkugeln und dem expandierten Alumosilikat der Sorte III. Von besonderem Interesse sind die Zusatzstoffe expandierter Perlit und pyrogene Kieselsäure. Durch Zugabe von expandiertem Perlit wurde die 28 Tage-Druckfestigkeit von 10,3 auf 20,5 MPa um 99 % erhöht. Gleichzeitig wurde die Wärmeleitfähigkeit nicht vermindert, sondern erhöhte sich von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) auf 0,25 W/(m·K). Eine deutliche Absenkung der Wärmeleitfähigkeit wurde durch Zugabe der pyrogenen Kieselsäure erzielt. Dabei wurde die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) auf 0,17 W/(m·K) um 19 % gemindert. Gleichzeitig erhöhte sich die Druckfestigkeit von 10,3 auf 11,9 MPa um 15,5 % (Bild 21).

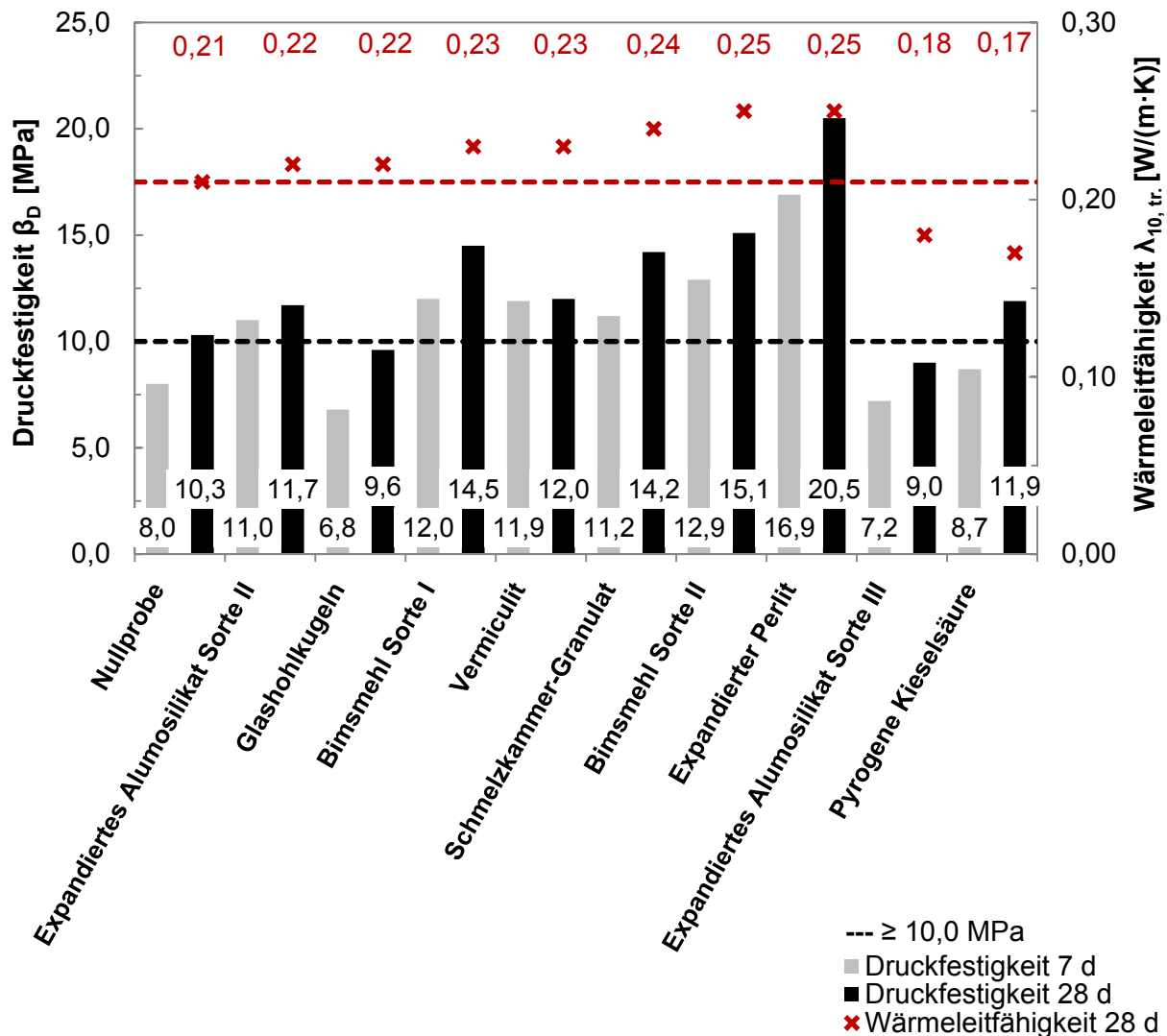


Bild 21: Zusatzstoff-Screening in Dünnbettmörtel; Korrelation der 7 und 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.}$ von Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Zugabe mit jeweils 10 Vol.-% im Vergleich zur Nullprobe

4.4.1.3 Porenanalyse

Um die Ergebnisse hinsichtlich der Veränderung der Druckfestigkeit und der Wärmeleitfähigkeit aus Bild 21 genauer erklären zu können, wurde an den Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierten Mörtel-Proben eine Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten am abgebundenen Festmörtel nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen.

Quecksilberporosimetrie

Die Ergebnisse der Porenanalyse sowie der mittels He-Gaspyknometer ermittelten Feststoffdichten der Dünnbettmörtel-Nullprobe bzw. der modifizierten Dünnbettmörtel-Proben sind in Tabelle 25.1 und 25.2 dargestellt. Die Bilder 22.1 und 22.2 zeigen

das kumulative und spezifische Porenvolumen sowie den Porendurchmesser in graphischer Form.

Tabelle 25.1: Porenanalysen modifizierter Dünnbettmörtel-Proben im Vergleich mit der Dünnbettmörtel-Nullprobe (Tab. A-9)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Feststoffdichte ρ_F [g/cm ³]	Porengrößenbereich [μm]	Spezifisches Porenvolumen		Häufigster Porendurchmesser d_P [μm]	Mittlerer Porendurchmesser
					Anteilig	Gesamt V_q [cm ³ /g]		
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	2,08	210,00 - 4,00	0,191	0,70	2,73	1,36
				4,00 - 0,05	0,482			
				0,05 - 0,02	0,023			
Expandiertes Aluminosilikat Sorte II	10	0,60	2,21	200,00 - 4,00	0,056	0,65	0,71	0,62
				4,00 - 0,05	0,567			
				0,05 - 0,02	0,025			
Glashohlkugeln	10	0,62	2,08	200,00 - 4,00	0,163	0,72	0,53	0,82
				4,00 - 0,05	0,537			
				0,05 - 0,02	0,025			
Bimsmehl Sorte I	10	0,56	2,10	190,00 - 4,00	0,093	0,55	0,51	0,57
				4,00 - 0,05	0,426			
				0,05 - 0,02	0,030			
Vermiculit	10	0,57	2,13	200,00 - 4,00	0,113	0,58	0,62	0,80
				4,00 - 0,05	0,444			
				0,05 - 0,02	0,022			
Schmelzkammer-Granulat	10	0,56	2,07	200,00 - 4,00	0,089	0,54	0,56	0,62
				4,00 - 0,05	0,426			
				0,05 - 0,02	0,027			

Durch den Einbau der Zusatzstoffe in die Mörtel-Matrix resultiert eine Veränderung des Porenvolumens. Die Dünnbettmörtel-Nullprobe besitzt ein spezifisches Gesamtporenvolumen von 0,70 cm³/g. Der häufigste bzw. mittlere Porendurchmesser liegt bei 2,73 bzw. 1,36 μm ; die Feststoffdichte beträgt 2,08 g/cm³ (Tabelle 25.1). Im Falle der Zusatzstoffe expandiertes Aluminosilikat der Sorte II, Bimsmehl der Sorte I, Vermiculit und Schmelzkammer-Granulat verringert sich das Porenvolumen, was jeweils zu einer Festigkeitssteigerung im Vergleich zur Nullprobe führt (Bild 21). Durch Zugabe der Glashohlkugeln erhöht sich das Porenvolumen geringfügig. Dieser Effekt macht sich außerdem bei der Druckfestigkeit bemerkbar; diese nimmt im Vergleich zur

Nullprobe von 10,3 auf 9,6 MPa ab. Normalerweise führt eine Minderung des spezifischen Porenvolumens zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit. Im Hinblick auf die beiden charakteristischen Porendurchmesser (Modal- und Medianwert) wird festgestellt, dass sich diese im Vergleich zur Nullprobe durch die Dosierung der Zusatzstoffe verkleinern (Tabelle 25.1; Spalte 8/9).

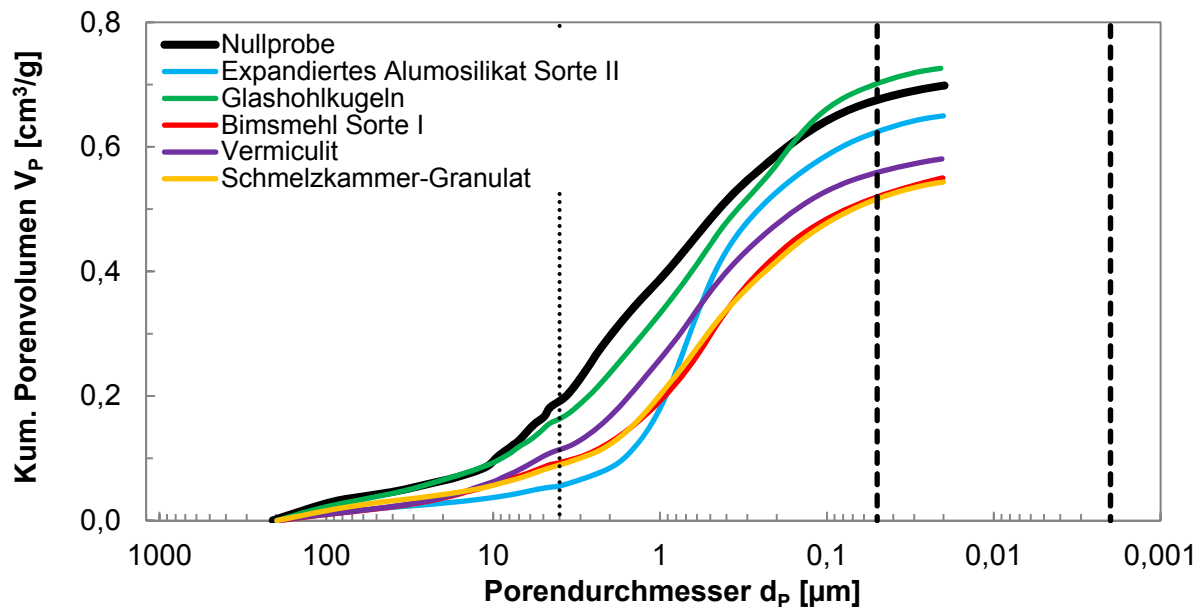


Bild 22.1: Kumulatives Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben

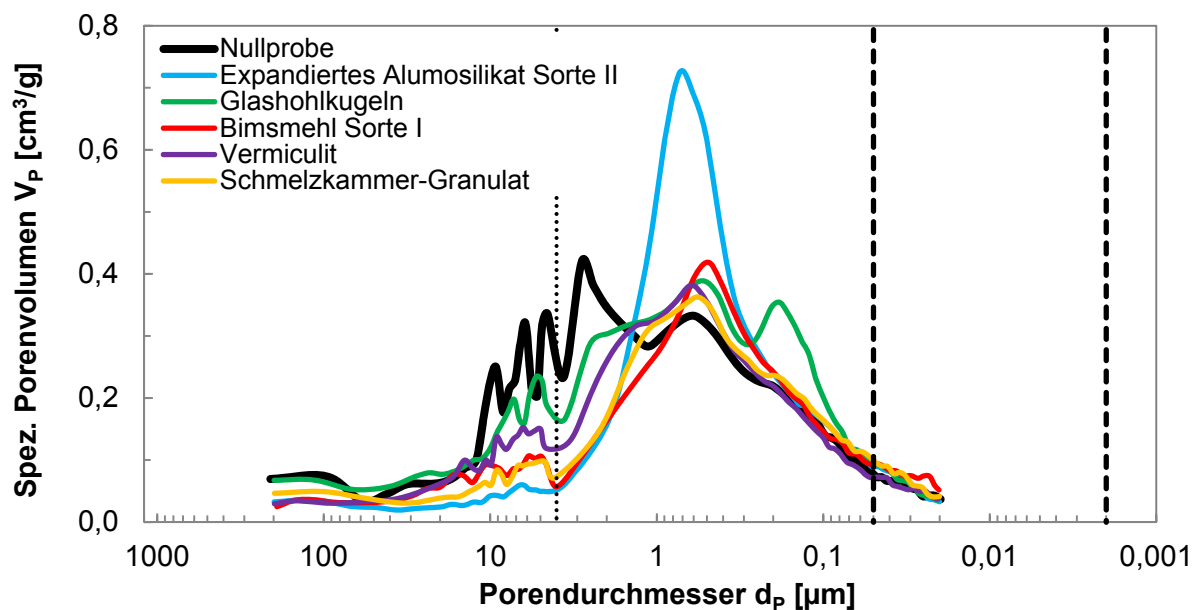


Bild 22.2: Spezifisches Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben

Aus Tabelle 25.2 wird ersichtlich, dass durch die Zugabe von Bimsmehl der Sorte II, expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure die spezifischen Porenvolumina abnehmen; gleichermaßen die Porositäten (Bild 24). Im Falle von expandiertem Perlit sinkt das Porenvolumen von 0,70 auf 0,51 cm³/g deutlich ab. Diese Veränderung resultiert in einer Festigkeitssteigerung um 99 %, aber auch in der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) auf 0,25 W/(m·K) um 19 %.

Tabelle 25.2: Porenanalysen modifizierter Dünnbettmörtel-Proben im Vergleich mit der Dünnbettmörtel-Nullprobe (Tab. A-9)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosie- rung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Fest- stoff- dichte	Porengrößen- bereich	Spezifisches Porenvolumen		Häufigster Poren- durch- messer	Mittlerer Poren- durch- messer
					Anteilig V_q	Gesamt		
	[Vol.-%]		ρ_F [g/cm ³]	[μm]	[cm ³ /g]		d_P [μm]	
Dünnbett- mörtel	Nullprobe	0,58	2,08	210,00 - 4,00	0,191	0,70	2,73	1,36
				4,00 - 0,05	0,482			
				0,05 - 0,02	0,023			
Bimsmehl Sorte II	10	0,56	2,14	200,00 - 4,00	0,073	0,51	0,56	0,60
				4,00 - 0,05	0,424			
				0,05 - 0,02	0,018			
Expandierter Perlit	10	0,57	2,06	190,00 - 4,00	0,035	0,51	0,34	0,32
				4,00 - 0,05	0,452			
				0,05 - 0,02	0,022			
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	10	0,60	2,13	195,00 - 4,00	0,192	0,74	0,58	0,96
				4,00 - 0,05	0,530			
				0,05 - 0,02	0,022			
Pyrogene Kieselsäure	10	0,86	1,81	210,00 - 4,00	0,046	0,60	0,33	0,31
				4,00 - 0,05	0,476			
				0,05 - 0,02	0,079			

Durch Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure wird das Gesamt-Porenvolumen von 0,70 auf 0,60 cm³/g zwar insgesamt reduziert, im Bereich der Mesoporen jedoch um 244 % erhöht (Tabelle 25.2; Spalte 6, Bilder 23.1 und 23.2). Die Minderung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtel-Systems lässt sich somit auf die Zunahme des Porenvolumens im Mesoporen-Bereich zurückführen. Vergleicht man die Kurvenverläufe der Dünnbettmörtel-Nullprobe und der Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure, wird dies durch den steileren Kurvenanstieg der kieselsäurehaltigen Probe ab 50 nm deutlich (Bild 23.1). Es findet ein verstärktes Auffüllen der Mesoporen mit Quecksilber statt. Eine weitere Minderung der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) auf 0,18 W/(m·K) wird durch Zugabe von expandiertem Alumo-

silikat der Sorte III erzielt. Im Vergleich zur kieselsäurehaltigen Probe lässt sich hier jedoch keine Zunahme des Porenvolumens im Mesoporen-Bereich, sondern ein gleichbleibendes Volumen im Makroporen-Bereich größer 4 μm bis zur Messobergrenze von 210 μm feststellen.

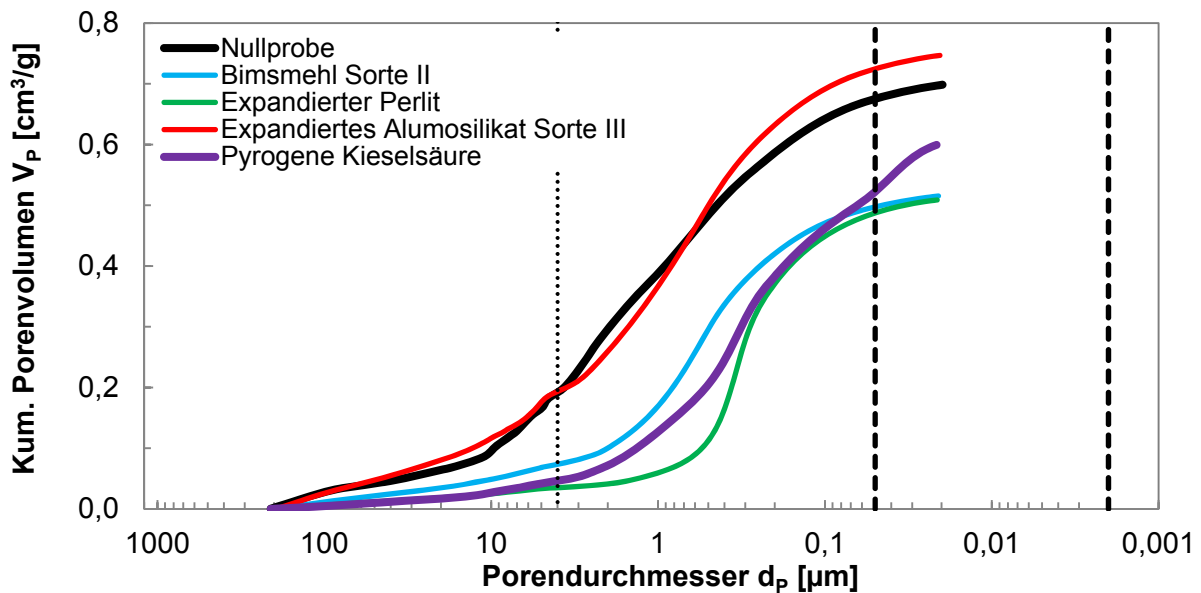


Bild 23.1: Kumulatives Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und optimierte Dünnbettmörtel-Proben

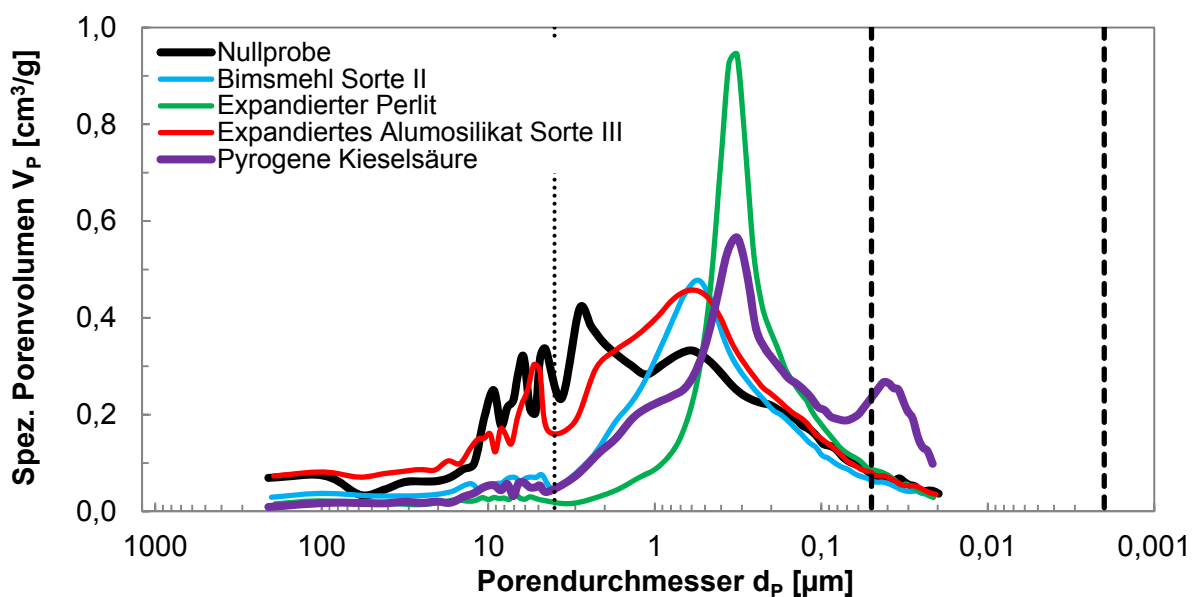


Bild 23.2: Spezifisches Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und optimierte Dünnbettmörtel-Proben

Von besonderem Interesse ist außerdem der nahezu gleiche Medianwert der Perlit- und kieselsäurehaltigen Dünnbettmörtel-Proben mit etwa $d_P = 0,3 \mu\text{m}$ (Tabelle 25.2). Die Kurvenverläufe beider modifizierter Dünnbettmörtel-Proben zeigen bei diesem Porendurchmesser einen auffällig hohen Peak im Vergleich zur Nullprobe (Bild 23.2).

Bild 24 zeigt die berechneten Porositäten nach Formel 38 sowie die korrelierenden Druckfestigkeiten der Dünnbettmörtel nach unterschiedlicher Zusatzstoff-Zugabe. Die Dünnbettmörtel-Nullprobe verfügt über eine Porosität von 59,1 %. Die Minderung des spezifischen Porenvolumens bzw. der Porosität führt zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit. Im Falle der Zugabe von 10 Vol.-% expandiertem Perlit sinkt die Porosität auf 49,4 %. Dies führt zu einer Festigkeitssteigerung um 99 %.

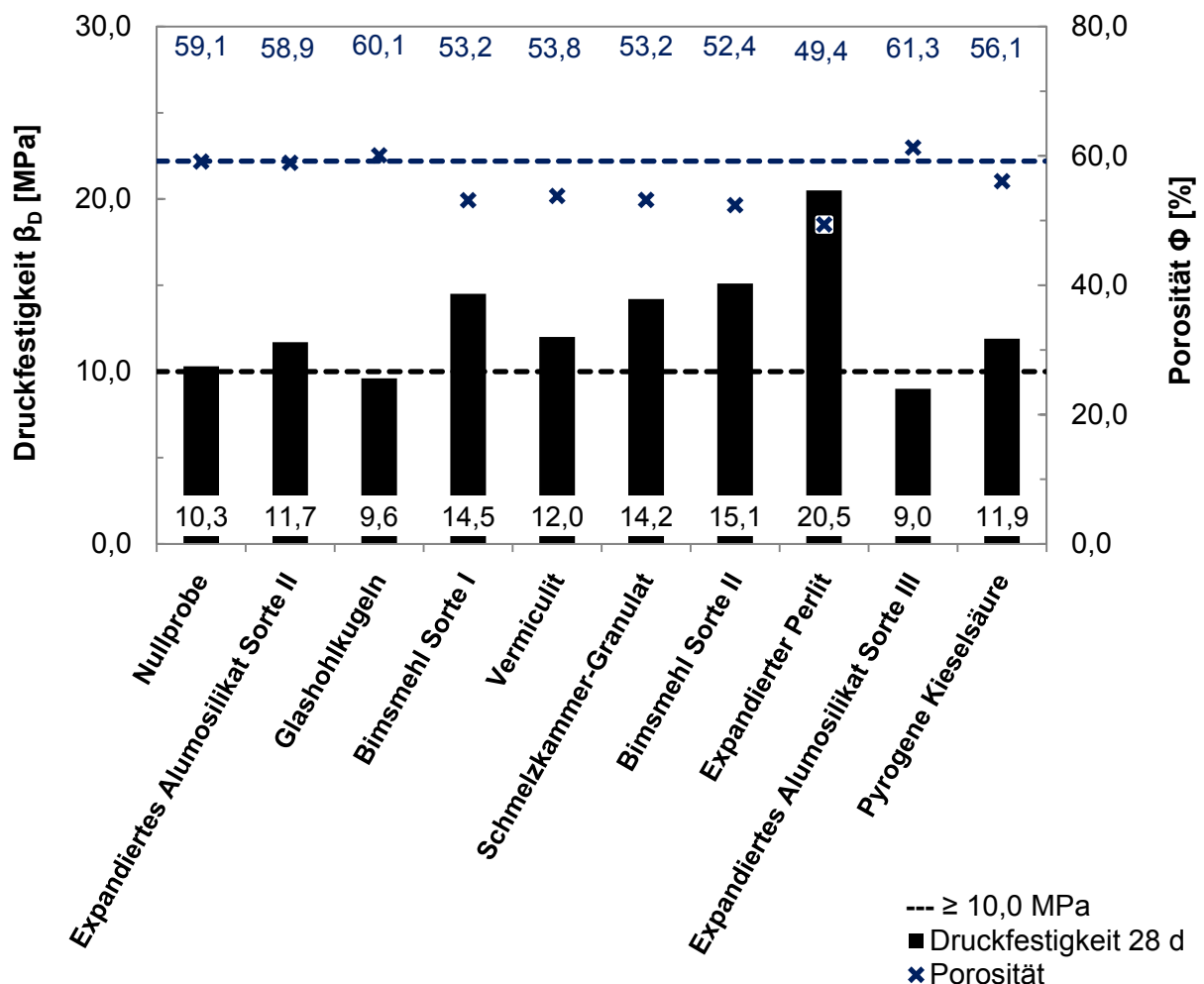


Bild 24: Korrelation von 28 Tage-Druckfestigkeiten und Porositäten ausgehärteter Dünnbettmörtel-Mischungen nach Dosierung von jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff im Vergleich zur Nullprobe

Gasadsorption

Für die Porenanalyse des mittels Quecksilberintrusion nicht zugänglichen und feineren Mesoporen-Bereichs wurde die Gasadsorption mit Stickstoff als Messgas eingesetzt. Die Methode schließt an die Messuntergrenze der Quecksilberporosimetrie an und ermöglicht die Ermittlung von Porendurchmessern von 75 bis 5 nm. In Bild 25 sind die Dünnbettmörtel-Proben mit den Zusatzstoffen expandierter Perlit, expandiertes Alumosilikat der Sorte III und pyrogene Kieselsäure dargestellt; die Porenvolumina der übrigen Dünnbettmörtel-Proben (Tabelle 25.1/2) befinden sich im Anhang dieser Arbeit (Bild A-3).

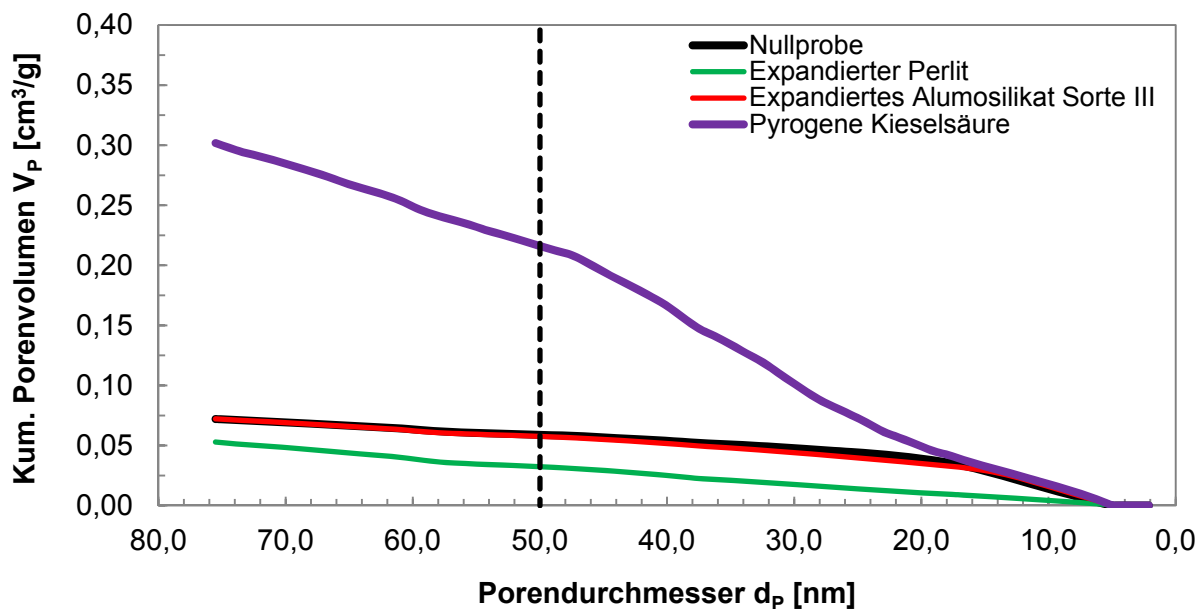


Bild 25: Kumulatives Porenvolumen von Dünnbettmörtel-Proben mit den Zusatzstoffen expandierter Perlit, expandiertes Alumosilikat Sorte III und pyrogene Kieselsäure im Vergleich mit der Nullprobe im Porengrößenbereich < 75 nm in Abhängigkeit von jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff-Dosierung

Aus der graphischen Darstellung (Bild 25) geht hervor, dass die kumulierten Porendurchmesser für die Dünnbettmörtel-Proben mit Perlit-Zugaben und Zugaben von expandiertem Alumosilikat der Sorte III mit $0,053 \text{ cm}^3/\text{g}$ bzw. $0,072 \text{ cm}^3/\text{g}$, in der Größenordnung der Nullprobe mit $0,072 \text{ cm}^3/\text{g}$, liegen. Die Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bewirkt im Bereich der Porendurchmesser < 50 nm die Bildung eines vergleichsweise erhöhten Porenvolumens von $0,219 \text{ cm}^3/\text{g}$. Die Perlit-Probe mit ihrer extrem hohen Druckfestigkeit hat in diesem Bereich mit $0,033 \text{ cm}^3/\text{g}$ das niedrigste Porenvolumen. Die Kurvenverläufe bzw. Porenvolumina von der Dünnbettmörtel-Nullprobe mit $0,059 \text{ cm}^3/\text{g}$ und dem expandierten Alumosilikat der

Sorte III mit $0,058 \text{ cm}^3/\text{g}$ sind weitestgehend kongruent. Die Untersuchungen mit Hilfe der Gasadsorption bestätigen die Ergebnisse aus der Quecksilberporosimetrie.

4.4.1.4 Röntgendiffraktometrie (XRD)

In Bild 26 sind die röntgenographischen Aufnahmen der Dünnbettmörtel-Nullprobe und der Dünnbettmörtel-Proben mit solitären Zugaben von jeweils 10 Vol.-% expandiertem Perlit, expandiertem Alumosilikat der Sorte III sowie pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 2, 7 und 28 Tagen nach Hydratation in Laborluft-Atmosphäre dargestellt. Hierfür wurde jeweils der Winkelbereich zwischen 5 bis $50^\circ 2\theta$ betrachtet. In den Proben wurden die im Zement üblichen Hauptklinkerphasen nachgewiesen. Die zugehörigen Reflexe sind mit den Bezeichnungen „a, b, l und f“ gekennzeichnet. Außerdem wurde in den Proben Calcit (c) und Quarz (q) sowie die Hydratationsprodukte Portlandit (p), Ettringit (e) und Halbcarbonat (h) gefunden. Die Dünnbettmörtel-Nullprobe sowie die drei durch Zusatzstoffe modifizierten Dünnbettmörtel-Proben verfügen außerdem über Calciumcarbonat welches bereits in der Ausgangsmischung enthalten ist (Tabelle 19). Es kann angenommen werden, dass die Zugabe von pyrogener Kieselsäure oder expandiertem Alumosilikat der Sorte III oder expandiertem Perlit, aufgrund jeweils hoher Gehalte an reaktionsfähigem Siliziumdioxid sowie Aluminiumoxid (Tabelle 20), im Verlauf der Zementhydratation, die als „Portlandit-Abbau“ bekannte Reaktion zwischen dem Calciumhydroxid und den genannten Puzzolanen auslöst (Formel 1 und 2), wobei die Bildung zusätzlicher, erhärtungsfähiger Verbindungen (Calciumsilikathydrate und/oder Calciumaluminathydrate) resultiert. Betrachtet man die Röntgendiffraktogramme der Dünnbettmörtel-Proben mit Zugabe von pyrogener Kieselsäure nach einer Alterung von 2, 7 und 28 Tagen (Bild 26), so lässt sich ein zeitlich zunehmender Abbau des Portlandits im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nachweisen; es findet demnach eine puzzolanische Reaktion statt. Im Gegensatz dazu lösen die beiden Zusatzstoffe expandierter Perlit und expandiertes Alumosilikat der Sorte III nur geringfügige bis keine Reaktionen aus; die Portlandit-Intensitäten sind im Vergleich zur Nullprobe ähnlich bzw. vergleichbar. Daraus kann geschlossen werden, dass der Portlandit-Abbau mit expandiertem Alumosilikat der Sorte III bzw. expandiertem Perlit (Formel 2) infolge seiner schwächeren puzzolanischen Reaktivität in geringerem Ausmaß erfolgt, als der Portlandit-Abbau durch Reaktion mit pyrogener Kieselsäure (Formel 1).

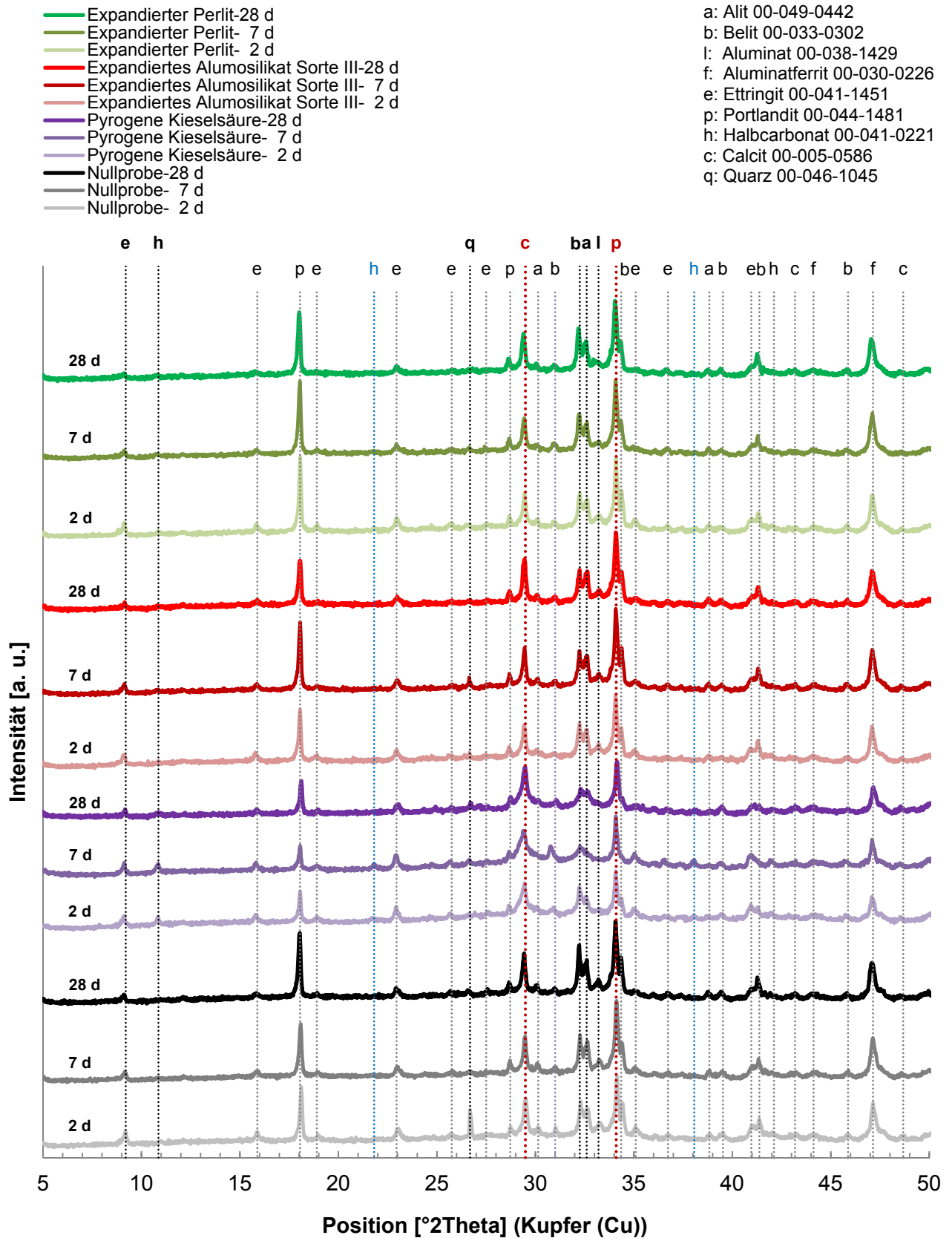


Bild 26: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit, einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Alumosilikat Sorte III sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 2, 7 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre

Bei weiterer Auswertung der XRD-Analysen der kieselsäurehaltigen Proben, sind auch die Hauptintensitäten der Klinkerphasen Alit und Belit sowie Aluminat feststellbar. Diese sind nach 2, 7 und 28 Tagen im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe weniger ausgeprägt (Bild 26). Daraus kann abgeleitet werden, dass im Verlauf des Abbindevorgangs und im Beisein von pyrogener Kieselsäure eine verstärkte Bildung von C-S-H-Phasen stattfindet (Formel 1). In normaler Laborluft-Atmosphäre kommt es außerdem zur Stabilisierung des Ettringits nach Formel 8 und dem damit verbundenen Umsatz zu Halb- sowie Monocarbonat (Formel 9). In Bild 26 verfügen nur die kieselsäurehaltigen Dünnbettmörtel-Proben über vergleichsweise erhöhte Halbcarbonat-Intensitäten nach 2, 7 sowie 28 Tagen. Beim Kontakt mit der CO₂-haltigen Raumluft kommt es zur diffusionsgesteuerten Carbonatisierung des Portlandits zu Calcit nach Formel 13. Bild 26 zeigt diesbezüglich zunehmende bzw. gleichbleibende Calcit-Intensitäten im Verlauf der Hydratation für alle Dünnbettmörtel-Proben. Im Falle der Proben mit Zugabe von pyrogener Kieselsäure wurden vergleichsweise geringfügig erhöhte Intensitäten festgestellt, die möglicherweise auf die Carbonatisierung von Portlandit zurückgeführt werden können. Die Calcit-Intensitäten der beiden durch Zugaben von expandiertem Perlit und expandiertem Alumosilikat der Sorte III modifizierten Dünnbettmörtel-Proben sind im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nach 2, 7 und 28 Tagen geringfügig niedriger.

4.4.1.5 Thermische Analyse (TG)

Um eine quantitative Aussage über einen möglicherweise stattfindenden Portlandit-Abbau der modifizierten Dünnbettmörtel-Proben (Bild 26) treffen zu können, wurden diese mittels thermogravimetrischer Methode untersucht (Bild 27, Tabelle 26). Das Bild zeigt die ermittelte Masseabnahme einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit den entsprechenden Massenabnahmen der Dünnbettmörtel-Proben mit Zugaben von expandiertem Perlit, expandiertem Alumosilikat der Sorte III und pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 28 Tagen, die in Laborluft-Atmosphäre abgebunden hatten. Im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 390 °C findet bei allen Dünnbettmörtel-Proben eine stufenweise Wasserabspaltung aus den Hydratphasen Ettringit, Tetracalciumaluminathydrat bzw. Calciumsilikathydrat mit unterschiedlichem Ausmaß statt. Ab einer Temperatur von 390 °C spaltet das Calciumhydroxid gemäß Formel 39 (Kap. 3.5.4) Wasser ab; dieser Prozess ist bei 460 °C für alle Dünnbettmörtel-Proben beendet. Im Falle der kieselsäurehaltigen Probe kommt es außerdem

zu einem starken Wasserverlust im Temperaturbereich bis 120 °C, welcher sich durch das hier vorhandene erhöhte w/m-Verhältnis von 0,86 erklären lässt.

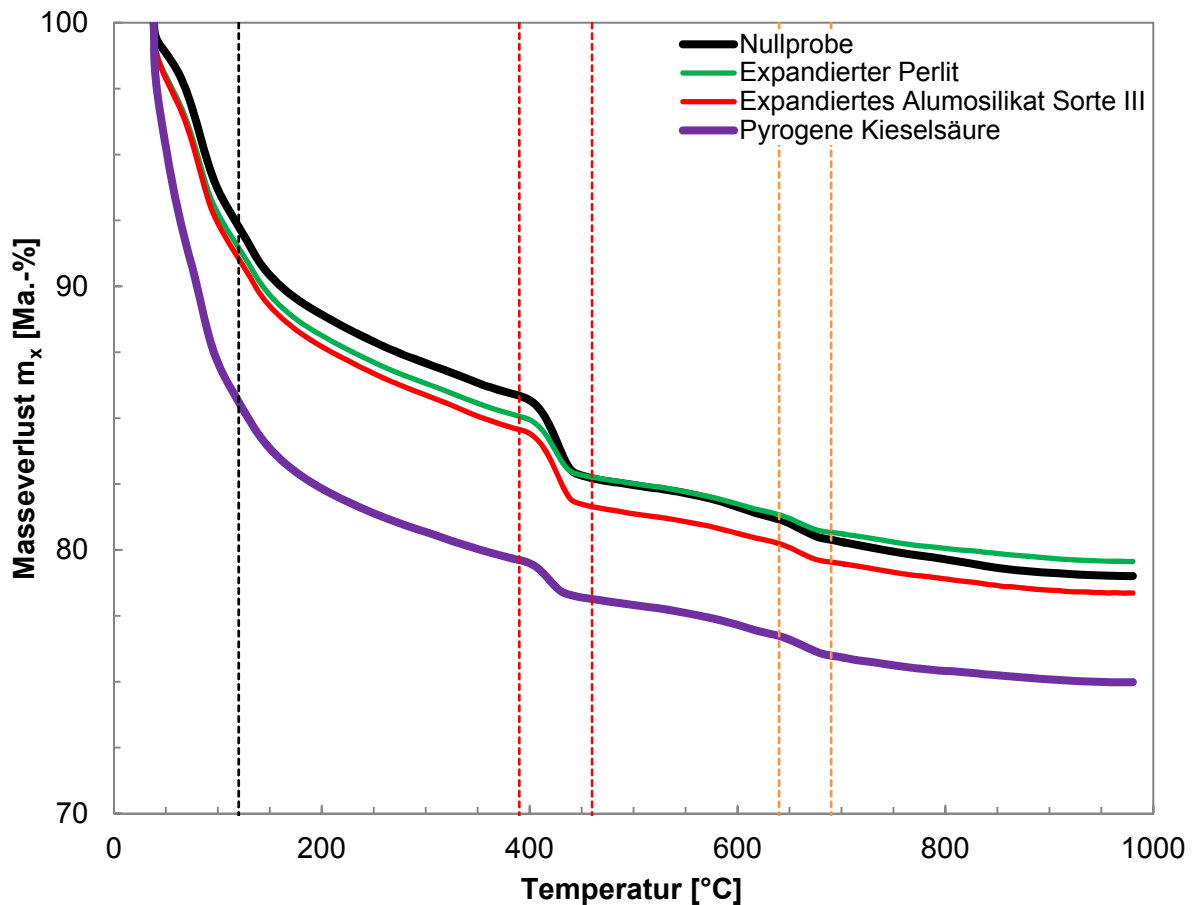


Bild 27: Masseverlust in Abhängigkeit von der Temperatur (TG) einer Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit je 10 Vol.-% Zusatzstoff nach einem Abbindezeitraum von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre (Bild A-4)

Im Temperaturbereich zwischen 390 bis 460 °C erfährt die Dünnbettmörtel-Nullprobe einen Wasserverlust von 3,17 Ma.-%, welcher nach einer Abbindezeit von 28 Tagen einer Portlandit-Masse von 13,04 Ma.-% bzw. 4,17 mg entspricht. Die Berechnung erfolgte gemäß Formel 40. Aus der TG-Analyse der Nullprobe geht hervor, dass diese nach einer Temperaturbehandlung von 1000 °C eine restliche Feststoffmasse von 79,01 Ma.-% (Tabelle 26; Spalte 4) besitzt. Der Gewichtsverlust wird insbesondere durch Abspaltung von Wasser und CO₂ verursacht. Die Dosierung der Zusatzstoffe expandierter Perlit, expandiertes Aluminosilikat der Sorte III und pyrogene Kieselsäure führt im Verlauf der Temperaturbehandlung zu unterschiedlichen Restmassen. Die Kieselsäure-haltige Probe weist dabei mit 74,98 Ma.-% die kleinste Restmasse auf. Die drei verwendeten Zusatzstoffe lösen außerdem einen Portlandit-Abbau in unter-

schiedlicher Stärke aus. Durch Zugabe von expandiertem Alumosilikat der Sorte III wurde die Portlandit-Masse im Temperaturbereich zwischen 390 bis 460 °C von 13,04 auf 11,89 Ma.-% herabgesetzt (Tabelle 26; Spalte 9). Dies entspricht einem Abbau von 9 % im Vergleich zur Nullprobe. Die Perlit-Zugabe bewirkt mit 19 % sogar einen um 10 % stärkeren Portlandit-Abbau als das Alumosilikat der Sorte III. Im Falle der kieselensäurehaltigen Probe findet mit 55 % der stärkste Portlandit-Abbau statt.

Im Temperaturbereich zwischen 640 bis 690 °C findet die Decarbonatisierung entsprechend (Formel 43, Kap. 3.5.4) statt, wobei das sich zersetzende CaCO_3 durch die Carbonatisierung des Calciumhydroxids mit CO_2 entstanden ist. Die Nullprobe erfährt hier einen Kohlendioxidverlust von 0,85 Ma.-%, welcher einer Calciumcarbonat-Masse von 1,93 Ma.-% bzw. 0,62 mg entspricht (Formel 42, Tabelle 26; Spalte 13/14). Die verwendeten Zusatzstoffe verursachen im Vergleich mit der Nullprobe eine Carbonatisierung in unterschiedlichem Ausmaß. Die Perlit-haltige Probe verfügt mit 0,52 mg über eine nach 28 Tagen geringere Calciumcarbonat-Masse im Vergleich zur Nullprobe. Im Falle der beiden Zusatzstoff-Dosierungen Alumosilikat der Sorte III und pyrogener Kieselsäure wurden in den untersuchten Proben mit 0,57 sowie 0,58 mg bzw. 1,77 und 1,80 Ma.-% ebenfalls geringere Massen an Calciumcarbonat ermittelt.

Tabelle 26: Thermogravimetrie bis 1000 °C mit Massenabnahmen, Restmassen, Massenverlusten sowie berechneten Wasserverlusten bzw. Portlandit-Massen und Kohlendioxidverlusten bzw. Calciumcarbonat-Massen modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen mit jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nach einer Abbindezeit von jeweils 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosie- rung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Rest- masse nach TG m_y [Ma.-%]	Masseverlust				Masse Portlandit		Masse			
				Gesamt nach TG		Wasser		Gesamt 390 bis 460 °C		Kohlendioxid		Calciumcarbonat	
				m_x		Anteilig 390 bis 460 °C		m_{CH}		m_c		m_{CC}	
				[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	79,01	20,99	6,72	3,17	1,01	13,04	4,17	0,85	0,27	1,93	0,62
Expandierter Perlit	10	0,57	82,09	17,91	5,73	2,58	0,83	10,61	3,40	0,72	0,23	1,64	0,52
Expandiertes Alumosilikat Sorte III		0,60	78,37	21,63	6,92	2,89	0,92	11,89	3,80	0,78	0,25	1,77	0,57
Pyrogene Kieselsäure		0,86	74,98	25,02	8,01	1,42	0,45	5,84	1,87	0,79	0,25	1,80	0,58

4.4.1.6 Resümee – Teil I

Durch Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure wird die Wärmeleitfähigkeit eines typischen Dünnbettmörtels der Druckfestigkeitsklasse M 10 um 19 % gemindert. Gleichzeitig erfolgt eine Anhebung der Druckfestigkeit um fast 16 %. Monolithisch aufgebaute Wände, die mit einem entsprechend modifizierten Dünnbettmörtel errichtet werden, müssten sich durch eine verbesserte Wärmedämmung auszeichnen. Aus den Untersuchungen geht außerdem hervor, dass durch Zugabe von expandiertem Perlit eine Druckfestigkeitssteigerung um 99 % erfolgt. Mit Hilfe röntgenographischer sowie thermogravimetrischer Untersuchungen war es möglich, puzzolanische Reaktionen sowie eine Carbonatisierung von Dünnbettmörtel-Proben qualitativ und quantitativ festzustellen (Schmidt, et al., 2018b).

4.4.2 Zusatzstoff-Screening mit Stoffraumrechnung – Teil II

In weiteren Untersuchungen sollte zunächst geprüft werden, wie sich jeweils die Dosierung von pyrogener Kieselsäure sowie expandiertem Perlit bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen bzw. Zusatzstoff-Dosierungen auf das Dünnbettmörtel-System auswirkt. Außerdem wurden Kombinationen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III, ebenfalls bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen und Zusatzstoff-Dosierungen, getestet. Bei der Herstellung der Dünnbettmörtel-Mischungen mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure wurde das w/m-Verhältnis ausgehend von 1,65 schrittweise auf 1,40, 1,20, 1,10 bis 1,00 abgesenkt. Das Verhältnis von 1,65 setzt sich dabei aus dem w/m-Verhältnis der Nullproben mit 0,58 und dem maximalen Wassersorptionsvermögen der pyrogenen Kieselsäure (Kap. 4.2.5) zusammen (Tab. A-10). Der expandierte Perlit wurde mit 5, 10 und 15 Vol.-% bei entsprechend angepassten w/m-Verhältnissen dosiert (Tab. A-11). Im Falle des expandierten Alumosilikats der Sorte III erfolgte keine weitere Einzeldosierung. Die Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit wurden mit maximal 15 Vol.-% und unterschiedlichen w/m-Verhältnissen hergestellt (Tab. A-12). Die kombinierte Dosierung aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III erfolgte mit jeweils 5 Vol.-% bei w/m-Verhältnissen zwischen 1,20 und 0,70 (Tab. A-13). Aus den Dünnbettmörtel-Mischungen wurden Proben für die Bestimmung der werkstofftechnischen Parameter hergestellt.

4.4.2.1 Massenabnahmen der Normprismen im Hydratationszeitraum

Die Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bewirkt bei einem ansteigenden w/m-Verhältnis von 1,00 bis 1,65 eine schrittweise Erhöhung des Wasserverlustes von 25,9 bis auf 40,7 Ma.-%. Die Prüfkörper der Mörtelmischungen mit den Mischungsverhältnissen 1,00 und 1,10 sind schwerer als die Nullproben nach 28 Tagen; die abgebundenen Dünnbettmörtel-Proben mit den w/m-Verhältnissen von 1,20, 1,40 und 1,65 sind im Mittel deutlich leichter (Bild 28).

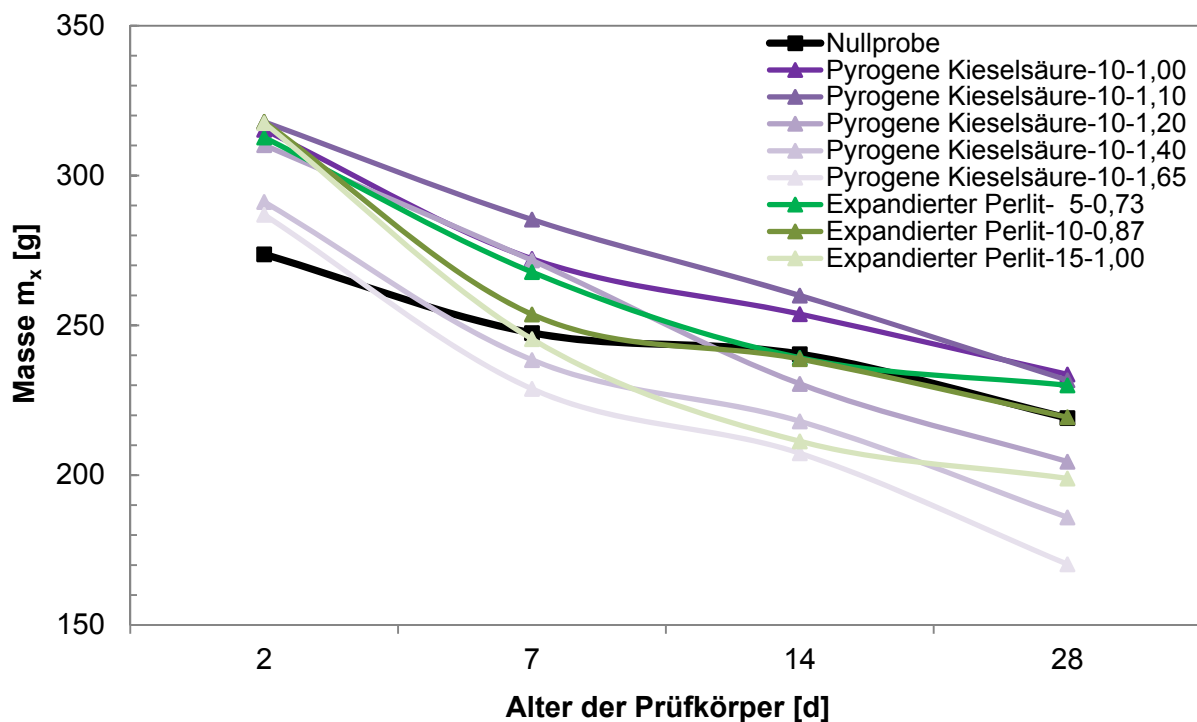


Bild 28: Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben bei Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie 5, 10 und 15 Vol.-% expandiertem Perlit bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen (Tab. A-14)

Aus Bild 28 ist ersichtlich, dass aus der unterschiedlichen Dosierung von expandiertem Perlit, bei entsprechend angepassten w/m-Verhältnissen von 0,73, 0,87 und 1,00, eine Zunahme des Wasserverlustes von 16,6 auf 24,1 Ma.-% nach 28 Tagen resultiert. Die Dünnbettmörtel-Proben mit 15 Vol.-% expandiertem Perlit und dem w/m-Verhältnis von 1,00 sind dabei mit 198,91 g im Mittel im Vergleich zu den Nullproben am leichtesten.

Die kombinierte Dosierung von jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit, bei ansteigenden w/m-Verhältnissen von 0,70 bis 1,22, führt ebenfalls zu einer schrittweisen Zunahme des Wasserverlustes von 12,3 auf 40,4 Ma.-% nach

28 Tagen. Aus der grafischen Darstellung (Bild 29) ist ersichtlich, dass die Prüfkörper der Mörtelmischungen mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie den w/m-Verhältnissen von 1,00 bzw. 1,22 mit 212,14 bzw. 179,14 g im Mittel am leichtesten im Vergleich zu den Nullproben sind.

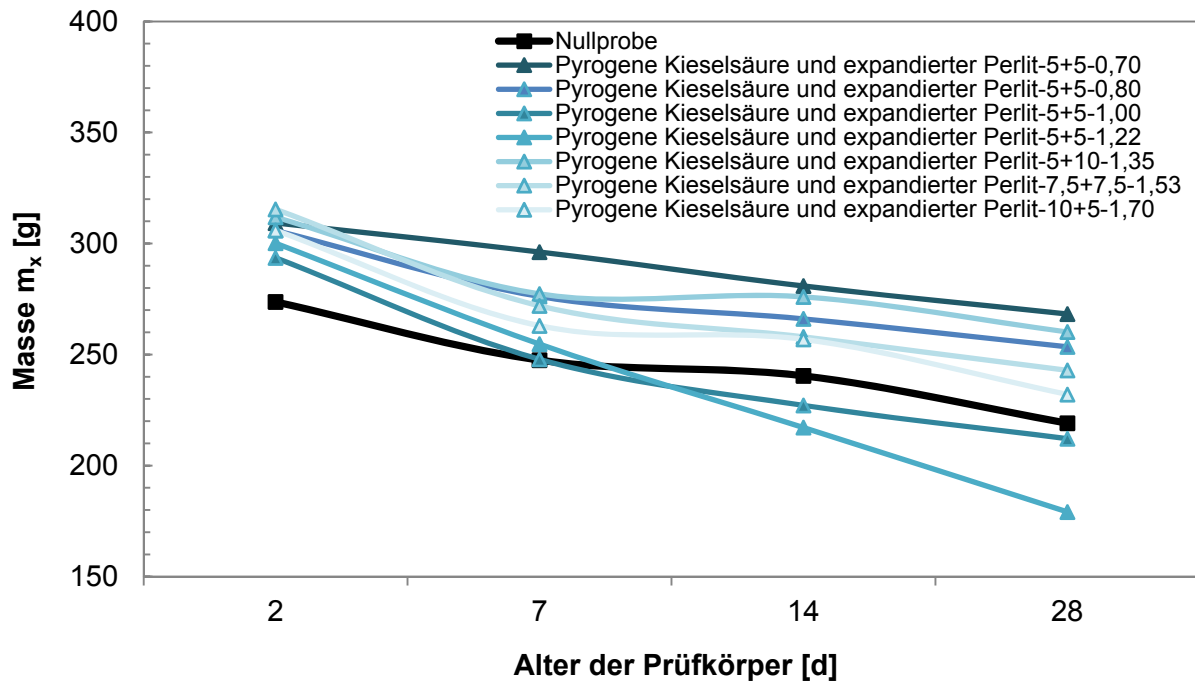


Bild 29: Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben nach der kombinierten Zugabe von 5 bis 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und 5 bis 10 Vol.-% expandiertem Perlit bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen (Tab. A-14)

Die modifizierten Prüfkörper der Mörtelmischungen mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III in Kombination, haben bei w/m-Verhältnissen zwischen 0,70 und 1,20 Wasserverluste im Bereich von 15,1 bis 29,1 Ma.-% zur Folge (Bild 30). Die Prüfkörper der Mörtelmischungen mit den w/m-Verhältnissen von 1,00, 1,10 und 1,20 sind mit 205,13, 207,35 und 192,75 g im Mittel leichter als die Dünnbettmörtel-Nullproben nach 28 Tagen (Bild 30).

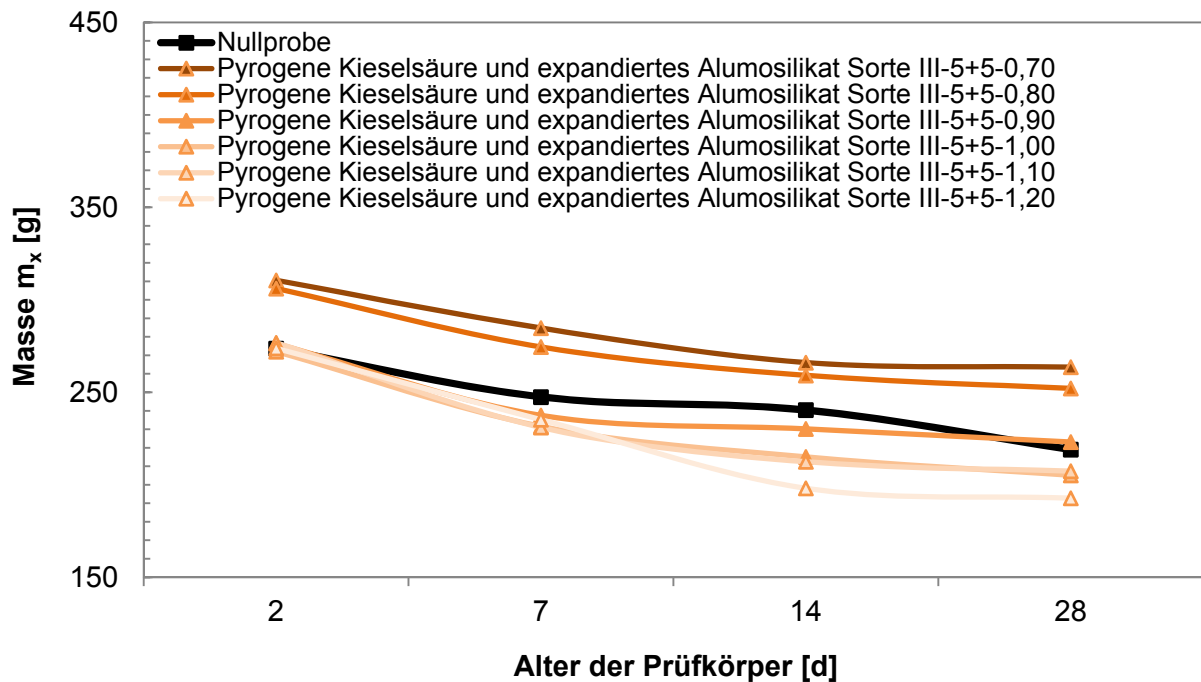


Bild 30: Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben nach der kombinierten Zugabe von jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen (Tab. A-14)

Aus den Ergebnissen der Massen-Bestimmungen der Prüfkörper verschiedener Dünnbettmörtel-Mischungen in Abhängigkeit vom Prüfalter geht hervor, dass diese im Zeitraum zwischen 2 bis 28 Tagen unterschiedliche Massenverluste erfahren (Bilder 28 bis 30). Die Stärke des Wasserverlustes ist dabei in erster Linie vom w/m-Verhältnis, den Zusatzstoff-Eigenschaften und dessen Dosierung abhängig.

4.4.2.2 Werkstofftechnische Parameter

Tabelle 27 zeigt die werkstofftechnischen Parameter von Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierten Dünnbettmörtel-Proben der Zusatzstoff-Versuchsreihen. Die Dünnbettmörtel-Rezepturen wurden mittels Stoffraumrechnung berechnet. Im Falle der Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und dem w/m-Verhältnis von 1,00 wurde der Mittelwert der Druckfestigkeit aus 10 Einzelwerten errechnet.

BET-Oberflächen

Die ausgehärteten Dünnbettmörtel-Nullproben besitzen eine BET-Oberfläche von im Mittel 17,34 m²/g. Durch Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure erhöht sich diese bis zu einem w/m-Verhältnis von 1,10 auf 64,52 m²/g. Wird das w/m-Verhältnis

auf 1,20, 1,40 und 1,65 erhöht, so nehmen die BET-Oberflächen der Dünnbettmörtel-Proben wieder ab; bleiben jedoch im Vergleich mit der Nullprobe deutlich erhöht. Im Falle der Dosierung von 5, 10 und 15 Vol.-% expandiertem Perlit und zugehörigen w/m-Verhältnissen von 0,73, 0,87 bzw. 1,00 wurden die BET-Oberflächen im Vergleich zur Nullprobe abgesenkt. Die kombinierte Zugabe von pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit führte bei allen Mischungs-Verhältnissen und ansteigenden w/m-Verhältnissen von 0,58 bis auf 1,70 zu einer Erhöhung der BET-Oberflächen von 17,34 auf maximal 51,99 m²/g. Durch Kombination der pyrogenen Kieselsäure mit expandiertem Alumosilikat der Sorte III mit jeweils 5 Vol.-% erhöhen sich die BET-Oberflächen bei allen w/m-Verhältnissen im Vergleich zur Nullprobe (Tabelle 27).

Dynamische Elastizitätsmoduln

Die dynamischen E-Moduln der Dünnbettmörtel-Nullproben betragen nach 7 bzw. 28 Tagen jeweils im Mittel 5,3 bzw. 4,4 GPa. Bei Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und steigenden w/m-Verhältnissen sinken die E-Moduln im Vergleich zur Nullprobe sowohl nach 7, als auch nach 28 Tagen. Bei Dosierung von 5 bis 15 Vol.-% expandiertem Perlit und zunehmendem w/m-Verhältnis resultieren ebenfalls E-Moduln unterhalb des Wertes der Nullprobe. Im Falle der Kombinationsreihe von pyrogener Kieselsäure mit expandiertem Perlit, wurde bei einer Zusatzstoff-Dosierung von jeweils 5 Vol.-% und einem w/m-Verhältnis von 0,70 eine Erhöhung des E-Moduls auf 6,6 GPa nach 7 Tagen bzw. 6,3 GPa nach 28 Tagen erreicht. Die Mörtelmischung mit gleicher Zusatzstoffkombination sowie einem w/m-Verhältnis von 0,80 erreichte nach 7 Tagen mit 4,9 GPa zunächst einen niedrigeren E-Modul als die Nullprobe mit 5,3 GPa. Nach 28 Tagen erhöhte sich der E-Modul im Vergleich mit der Nullprobe von 4,4 auf 4,8 GPa. Die E-Modul-Werte der Dünnbettmörtel-Proben mit den w/m-Verhältnissen 1,00 und 1,22 liegen nach 7 bzw. 28 Tagen unterhalb der Werte der Nullprobe. Durch Dosierung von jeweils 7,5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit in Kombination und den w/m-Verhältnissen 1,35, 1,53 sowie 1,70 wurden im Vergleich zur Nullprobe sowohl nach 7, als auch nach 28 Tagen niedrigere E-Moduln erzielt. Bei der Kombinations-Mischreihe aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III mit jeweils 5 Vol.-% zeigte sich bei den beiden w/m-Verhältnissen von 0,70 und 0,80 ein Anstieg der E-Moduln nach 28 Tagen auf 5,8 bzw. 5,1 GPa. Die E-Moduln der Mischungen mit den w/m-

Verhältnissen 0,90, 1,00, 1,10 sowie 1,20 liegen unterhalb des Wertes der Nullprobe (Tabelle 27).

Tabelle 27: Mittelwerte von BET-Oberfläche, dynamischem E-Modul, Dreipunkt-Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Trockenrohddichte von Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit vom w/m-Verhältnis und steigenden Zusatzstoff-Zugaben im Vergleich mit der Dünnbettmörtel-Nullprobe. Die Zusatzstoffe pyrogene Kieselsäure, expandierter Perlit und expandiertes Alumosilikat Sorte III wurden zwischen 5 bis 15 Vol.-% sowohl einzeln, als auch in Kombination zugemischt (Tab. A-15)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosie- rung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	BET- Ober- fläche as	E-Modul		Dreipunkt- Biegezug- festigkeit		Druck- festigkeit		Wärmeleit- fähigkeit Mittelwert $\lambda_{10, tr.}$	Trocken- rohddichte Mittelwert ρ_R
				7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d		
	[Vol.-%]		[m ² /g]	$E_{dyn.}$		β_B		β_D		[W/(m·K)]	[g/cm ³]
				[GPa]		[MPa]		[MPa]			
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	17,34	5,3	4,4	1,3	2,5	8,0	10,3	0,21	0,85
Pyrogene Kieselsäure	10	1,00	50,70	5,0	4,5	1,0	1,6	8,1	10,0	0,15	0,75
		1,10	64,52	4,0	3,7	0,8	1,4	5,5	8,0	0,15	0,70
		1,20	63,91	3,9	2,9	1,0	1,0	5,1	6,8	0,13	0,65
		1,40	60,55	2,5	2,3	0,7	1,0	3,4	3,9	0,12	0,59
		1,65	56,00	1,7	1,6	0,7	0,7	2,2	3,2	0,11	0,54
Expandierter Perlit	5	0,73	15,90	4,9	4,2	2,1	3,0	7,6	10,2	0,22	0,83
	10	0,87	15,53	3,5	3,4	1,6	2,7	6,0	7,4	0,21	0,79
	15	1,00	13,28	2,9	2,5	1,5	1,9	3,8	5,5	0,19	0,75
Pyrogene Kie- selsäure und expandierter Perlit in Kom- bination	5 + 5	0,70	23,44	6,6	6,3	1,8	2,2	8,2	8,9	0,22	0,85
		0,80	35,93	4,9	4,8	1,4	2,3	5,5	9,0	0,19	0,79
		1,00	34,91	3,7	3,0	1,1	1,5	3,7	4,2	0,16	0,69
		1,22	39,68	2,7	2,0	1,1	1,3	3,1	3,4	0,14	0,63
	5 + 10	1,35	32,46	2,6	1,3	0,8	1,0	2,0	3,3	0,14	0,60
	7,5 + 7,5	1,53	42,26	2,5	1,4	0,8	0,8	2,2	3,0	0,12	0,55
	10 + 5	1,70	51,99	1,6	1,5	0,7	0,8	2,0	2,9	0,10	0,53
Pyrogene Kie- selsäure und expandiertes Alumosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	0,70	23,78	6,2	5,8	1,2	2,4	9,6	10,4	0,21	0,87
		0,80	37,11	5,2	5,1	1,1	2,1	6,0	10,0	0,18	0,76
		0,90	30,62	3,8	3,3	1,1	1,7	4,5	6,3	0,17	0,67
		1,00	31,07	3,2	2,6	1,2	1,3	3,6	4,8	0,15	0,65
		1,10	33,92	2,4	2,3	1,0	1,4	2,8	4,9	0,14	0,63
		1,20	30,88	2,2	2,1	1,0	1,1	2,7	3,4	0,14	0,59

Dreipunkt-Biegezugfestigkeiten

Die Biegezugfestigkeiten der Dünnbettmörtel-Nullproben weisen nach 7 Tagen einen Mittelwert von $\beta_B = 1,3$ MPa und nach 28 Tagen einen Wert von $\beta_B = 2,5$ MPa auf. Aus der Mischreihe mit der pyrogenen Kieselsäure geht hervor, dass bei steigendem w/m-Verhältnis die Biegezugfestigkeiten sowohl nach 7, als auch nach 28 Tagen sinken. Die Zugabe von expandiertem Perlit bewirkte nach einer Abbindezeit von 7 Ta-

gen bei allen Volumenzugaben und allen w/m-Verhältnissen stets eine Erhöhung der Biegezugfestigkeiten. Im Falle der Zugaben von 5 bzw. 10 Vol.-% steigen die Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen auf 3,0 bzw. 2,7 MPa im Vergleich zur Nullprobe an. Die Zugabe von 15 Vol.-% bewirkt nach 28 Tagen mit $\beta_B = 1,9$ MPa eine niedrigere Biegezugfestigkeit. Die kombinierte Zugabe von pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit, bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen, führt zu niedrigeren Werten. Nur bei den w/m-Verhältnissen 0,70 und 0,80 wurden nach 7 Tagen leicht erhöhte Ergebnisse erzielt. Im Falle der 28 Tage-Biegezugfestigkeiten wurde der Wert der Nullprobe bei keinem Mischungsverhältnis erreicht. Durch Kombination der pyrogenen Kieselsäure mit expandiertem Alumosilikat der Sorte III war es in keinem Fall möglich die Biegezugfestigkeiten im Vergleich zur Nullprobe zu erhöhen (Tabelle 27).

Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten

In Bild 31 sind die Druckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen sowie die korrelierenden Wärmeleitfähigkeiten nach 28 Tagen für die aus Tabelle 27 erfolgreichsten Zusatzstoff-Zugaben in Abhängigkeit vom w/m-Verhältnis dargestellt. Die Dünnbettmörtel-Nullprobe erreichte nach einer Abbindezeit von 7 bzw. 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 8,0 bzw. 10,3 MPa sowie nach 28 Tagen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ W/(m·K) jeweils im Mittel und erfüllt damit die Vorgaben des Herstellers. Die Zugabe von 10 Vol.-% pyrogenen Kieselsäure bewirkt bei einem w/m-Verhältnis von 1,00 nach einer Abbindezeit von 28 Tagen eine gleichbleibende Druckfestigkeit, während die Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10, tr.} = 0,15$ W/(m·K) abgesenkt wird (Tabelle 27; Spalte 11). Dies entspricht einer Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften um 28,6 %. Im Falle der Zugabe von expandiertem Perlit wurde festgestellt, dass die stufenweise Erhöhung der Dosierung von 5 auf 15 Vol.-%, bei entsprechend angepassten w/m-Verhältnissen zu abnehmenden Druckfestigkeiten führt. Die Zugabe von 5 Vol.-% expandiertem Perlit führt zunächst zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit; bei weiter steigenden Zugaben erfolgt eine Abnahme (Tabelle 27). Aus den Untersuchungen der Kombinationsmischungen mit pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit geht hervor, dass fast jede Dünnbettmörtel-Probe eine im Vergleich zur Nullprobe verminderte Wärmeleitfähigkeit aufweist, jedoch in allen Fällen auch eine Minderung der Druckfestigkeiten sowohl nach 7, als auch nach 28 Tagen resultiert (Tabelle 27). Die Mörtelmischung mit jeweils 5 Vol.-% Kieselsäure- und Perlit-Zugaben in Kombination bei einem w/m-Verhältnis von 0,80 kann dennoch als inte-

ressante Rezeptur angesehen werden, da eine Absenkung der Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um 9,5 % erfolgt. Die korrelierende Druckfestigkeit liegt nach einer Abbindezeit von 28 Tagen bei $\beta_B = 9,0 \text{ MPa}$ und damit um 12,6 % unter der Druckfestigkeit der Nullproben mit 10,3 MPa (Tabelle 27).

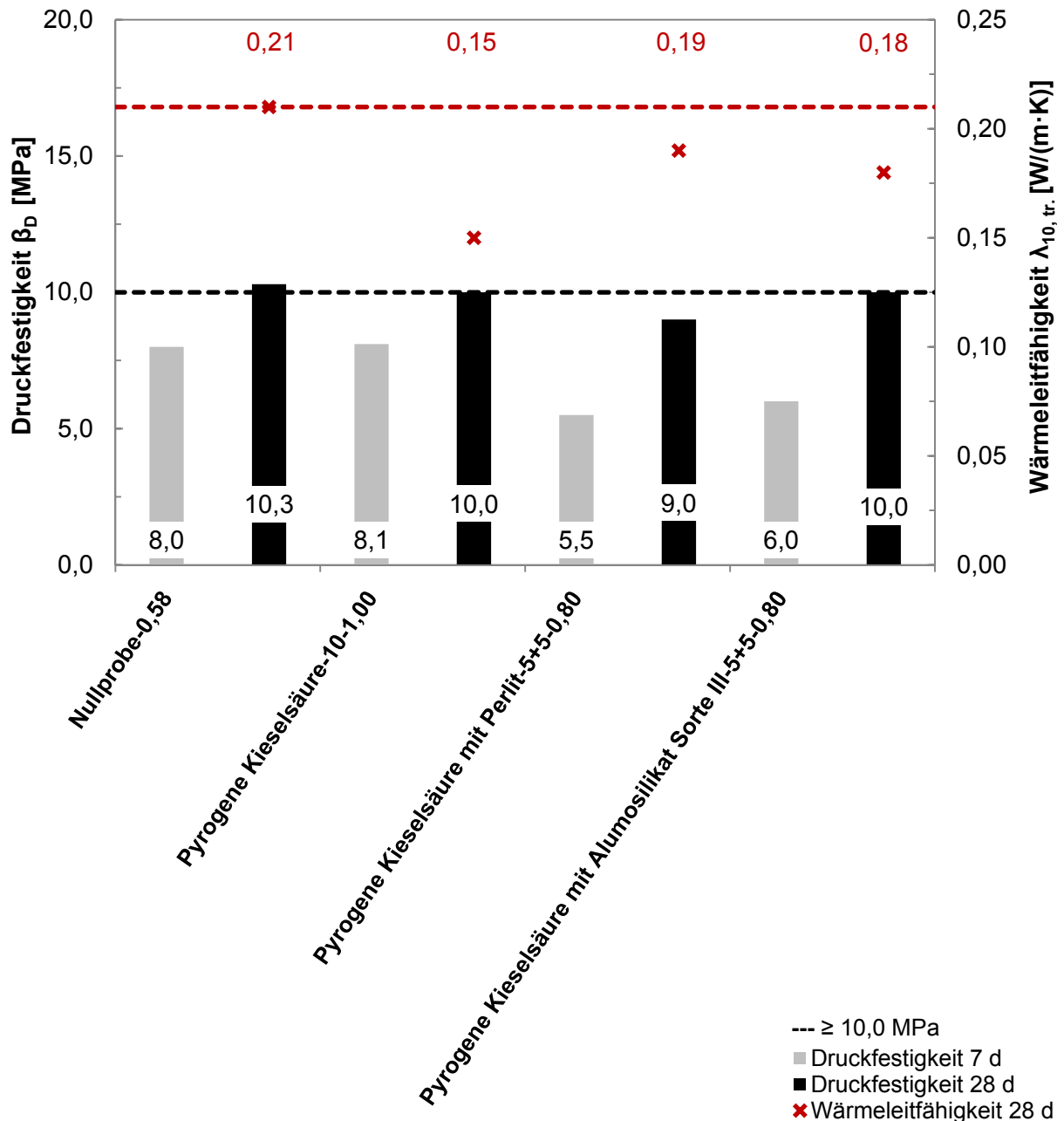


Bild 31: Korrelation der 7 Tage- und 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr.}}$ modifizierter Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit vom w/m-Verhältnis mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III im Vergleich zur Nullprobe

Betrachtet man schließlich die Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III, so zeigen diese den gleichen Zusammenhang zwischen Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten wie die meisten Mörtelmischungen, nämlich die gewünschte Abnahme der Wärmeleitfähigkeit führt gleichzeitig zur unerwünschten Abnahme der Druckfestigkeit (Tabelle 27). Eine Ausnahme macht jedoch die Kombinations-Mischung mit jeweils 5 Vol.-% bei einem w/m-Verhältnis von 0,80. Bei diesem Mischungsverhältnis ist es möglich, die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ der Nullprobe auf $\lambda_{10, tr.} = 0,18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ abzusinken, was einer Minderung der Wärmeleitfähigkeit um 14,3 % entspricht. Die korrelierende Druckfestigkeit betrug nach 28 Tagen im Mittel $\beta_B = 10,0 \text{ MPa}$, womit die Druckfestigkeitsklasse M 10 eingehalten wurde.

4.4.2.3 Porenanalyse

Um die erzielten Ergebnisse, insbesondere bezüglich der Veränderung der Druckfestigkeiten und der Wärmeleitfähigkeiten, der modifizierten Dünnbettmörtel-Mischungen aus Bild 31 zu verstehen, erfolgten u. a. Porenanalysen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption sowie Feststoffdichte-Messungen mittels Gaspyknometrie. Die Untersuchungen wurden am abgebundenen Festmörtel jeweils nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen durchgeführt (Tabelle 28).

Quecksilberporosimetrie

Die kumulativen und spezifischen Porenvolumina der ausgehärteten Dünnbettmörtel-Proben sind in Abhängigkeit vom Porendurchmesser grafisch dargestellt (Bilder 32.1 und 32.2). Die Bilder zeigen die Dünnbettmörtel-Proben mit den Zusatzstoffen pyrogene Kieselsäure (Einzeldosierung) sowie die beiden Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III; die Porenvolumina der übrigen Mörtel-Proben (Tabelle 27) befinden sich im Anhang dieser Arbeit (Bilder A-5 und A-6). Die Dünnbettmörtel-Nullprobe zeigt ein spezifisches Gesamt-Porenvolumen von $0,70 \text{ cm}^3/\text{g}$. Dabei beträgt der häufigste bzw. mittlere Porendurchmesser $2,73$ bzw. $1,36 \text{ }\mu\text{m}$ und die Feststoffdichte $2,08 \text{ g}/\text{cm}^3$ (Tabelle 28). Aus der Porenanalyse geht hervor, dass durch den solitären Einbau von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und einem w/m-Verhältnis von 1,00 keine Veränderung des Porenvolumens insgesamt resultiert. Der häufigste bzw. mittlere Porendurchmesser der Dünnbettmörtel-Probe beträgt $0,44$

bzw. 0,29 μm . Im Vergleich mit der Nullprobe resultiert allerdings ein um 626 % erhöhter Anteil an Mesoporen (50 bis 2 nm). Dies führt zu einer Minderung der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21$ auf 0,15 W/(m·K), entsprechend um 28,6 %. Die Dosierung einer Zusatzstoff-Kombination, bestehend aus jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bei einem w/m-Verhältnis von 0,80, führt zu einer Abnahme des spezifischen Gesamt-Porenvolumens auf $V_q = 0,61 \text{ cm}^3/\text{g}$ und zu einer Absenkung der Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Auch hier kann die Absenkung auf eine Zunahme des Porenvolumens im Bereich der Mesoporen um 204 % zurückgeführt werden. Der häufigste bzw. mittlere Porendurchmesser betrug 0,36 bzw. 0,34 μm .

Bezüglich der Zusatzstoff-Kombination aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III mit einer Zugabe von jeweils 5 Vol.-% und einem w/m-Verhältnis von 0,80 erfolgte eine Reduktion des Gesamt-Porenvolumens von 0,70 cm^3/g der Nullprobe auf 0,65 cm^3/g . Dabei wurde eine Erhöhung des Mesoporen-Volumens um 291 % festgestellt, die auch hier auf den besonderen Einfluss der pyrogenen Kieselsäure zurückgeführt werden kann. Dies führt zu einer Minderung der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21$ auf 0,18 W/(m·K) um 14,3 %. Der häufigste bzw. mittlere Porendurchmesser wurde hier mit 0,39 bzw. 0,30 μm bestimmt. Aus der Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie geht insgesamt hervor, dass sich die modifizierten Dünnbettmörtel-Proben durch gegenüber der Nullprobe feinere Kapillarporen im Mesoporen-Bereich zwischen 5 μm bis 10 nm auszeichnen und vergleichsweise weniger Luftporen im Bereich zwischen 1 mm bis 5 μm enthalten (Bilder 32.1 und 32.2).

Wird das Verhältnis aus dem Mesoporen-Volumen kleiner 50 nm und dem Makroporen-Volumen im Porendurchmesser-Bereich zwischen 1000 bis 100 nm berechnet, so lässt sich nach Formel 44 ein Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der zugehörigen Druckfestigkeit der hergestellten Dünnbettmörtel-Proben ableiten (Bild 32.2, Tabelle 28):

$$\text{Porenvolumen-Verhältnis} = \frac{\text{Volumen}_{\text{Mesoporen} < 50 \text{ nm}}}{\text{Volumen}_{\text{Makroporen} 1000 \text{ bis } 100 \text{ nm}}} \quad (44)$$

Tabelle 28: Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie, Gasadsorption und Gaspyknometrie, Porenvolumen-Verhältnisse aus Mesoporen-Volumina (0,05 bis 0,02 μm) und Makroporen-Volumina (1,0 bis 0,1 μm) sowie Korrelation von Porositäten, Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten ausgehärteter Dünnbettmörtel-Mischungen bestehend aus 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III im Vergleich mit der Nullprobe (Tabelle 27 bzw. Tab. A-15, Tab. A-16)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Fest- stoff- dichte	Porengrößen- bereich	Spezifisches Porenvolumen		Poren- volumen- Verhält- nis	Häufigster Poren- durch- messer	Mittlerer Poren- durch- messer	Porosi- tät	Druck- festigkeit	Wärmeleit- fähigkeit
					Anteilig	Gesamt						
	[Vol.-%]		[g/cm ³]	[μm]	[cm ³ /g]	[cm ³ /g]		[μm]		[%]	[MPa]	[W/(m·K)]
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	2,08	210,00 - 4,00	0,191	0,70	0,09	2,73	1,36	59,1	10,3	0,21
				4,00 - 0,05	0,482							
				0,05 - 0,02	0,023							
				1,00 - 0,10	0,253							
Pyrogene Kieselsäure	10	1,00	2,29	190,00 - 4,00	0,039	0,70	0,47	0,44	0,29	61,5	10,0	0,15
				4,00 - 0,05	0,491							
				0,05 - 0,02	0,167							
				1,00 - 0,10	0,357							
Pyrogene Kiesel- säure und expan- dierter Perlit kombiniert	5 + 5	0,80	2,55	205,00 - 4,00	0,042	0,61	0,17	0,36	0,34	61,0	9,0	0,19
				4,00 - 0,05	0,500							
				0,05 - 0,02	0,070							
				1,00 - 0,10	0,406							
Pyrogene Kiesel- säure und expan- diertes Alumosili- kat kombiniert	5 + 5	0,80	2,15	185,00 - 4,00	0,048	0,65	0,23	0,39	0,30	58,2	10,0	0,18
				4,00 - 0,05	0,509							
				0,05 - 0,02	0,090							
				1,00 - 0,10	0,389							

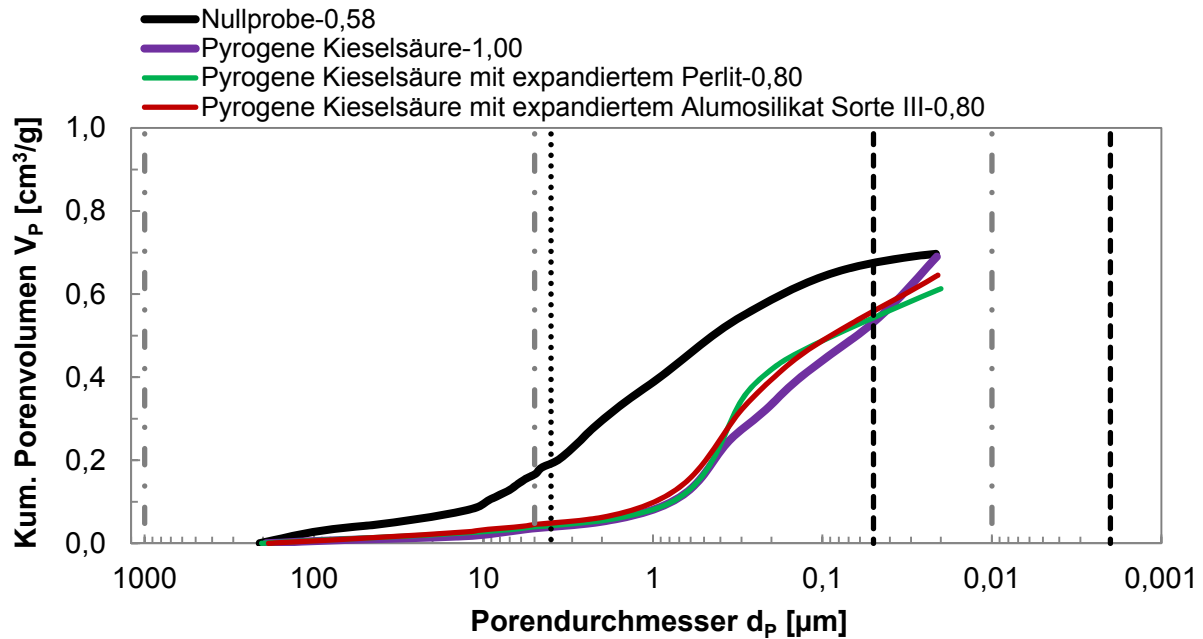


Bild 32.1: Kumulatives Porenvolumen modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III in Abhängigkeit vom Porendurchmesser zwischen 210 μm bis 20 nm, bei angepassten w/m-Verhältnissen, im Vergleich mit der Nullprobe (Bilder A-5)

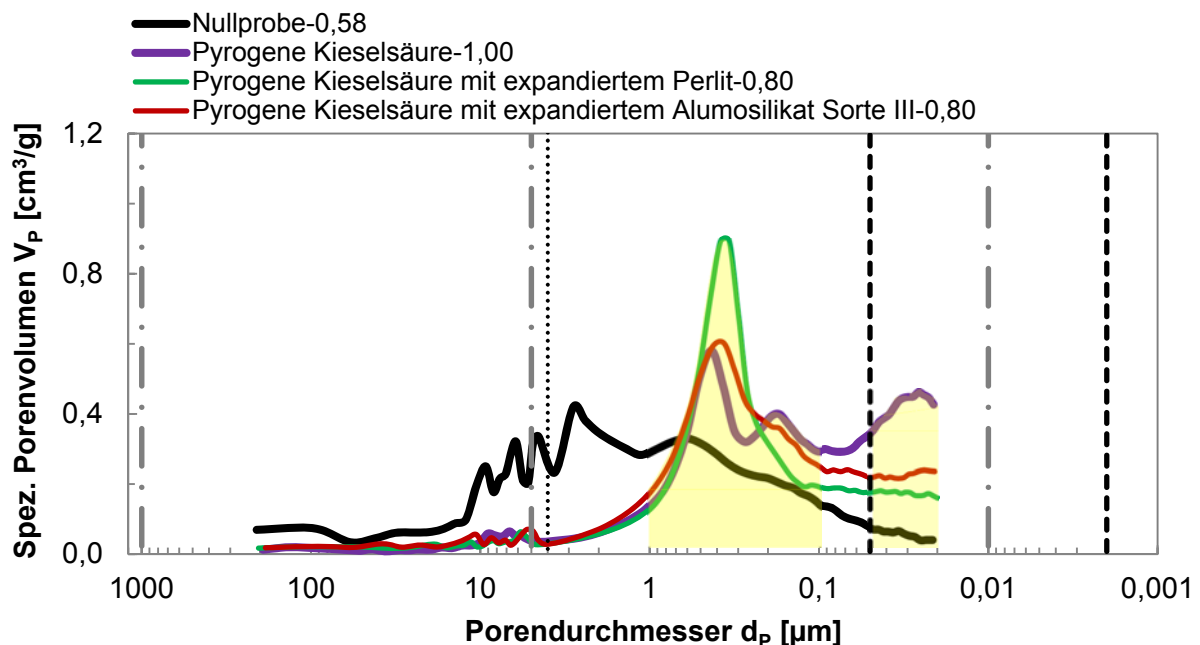


Bild 32.2: Spezifisches Porenvolumen modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III in Abhängigkeit vom Porendurchmesser zwischen 210 μm bis 20 nm, bei angepassten w/m-Verhältnissen, im Vergleich mit der Nullprobe (Bilder A-6, Tab. A-17)

Für die Dünnbettmörtel-Nullprobe wird ein Porenvolumen-Verhältnis von 0,09 berechnet (Tabelle 28; Spalte 8). Im Falle der erfolgreichsten Dünnbettmörtel-Mischung mit einer Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und dem w/m-Verhältnis 1,00 wurde das höchste Porenvolumen-Verhältnis 0,47 aller hier untersuchten Mischungsreihen erzielt. Durch Zugabe von pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit mit jeweils 5 Vol.-% resultiert ein Porenvolumen-Verhältnis von 0,17. Die Dosierung von jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III führt zu einem Porenvolumen-Verhältnis von 0,23. Aus der Untersuchung geht hervor, dass steigende Porenvolumen-Verhältnisse und damit die Zunahme des Porenvolumens im Mesoporen-Bereich eine Absenkung der Wärmeleitfähigkeit im Dünnbettmörtel bewirken. Dabei bleibt die Druckfestigkeit erhalten.

Druckfestigkeiten und Porositäten

Tabelle 28 zeigt die mit Formel 38 berechneten Porositäten sowie Druckfestigkeiten der modifizierten Dünnbettmörtel im Vergleich mit der Nullprobe. Aus der Untersuchung geht hervor, dass die ausgehärtete Dünnbettmörtel-Nullprobe über eine Porosität von 59,1 %, eine Druckfestigkeit von 10,3 MPa und eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ verfügt. Die modifizierten Dünnbettmörtel-Proben zeigen das gleiche bzw. ein geringeres spezifisches Porenvolumen, bei gleichzeitig abgesenkter Wärmeleitfähigkeit und relativ konstanter Druckfestigkeit (Tabelle 28).

Gasadsorption

Für die Porenanalyse des mittels Quecksilberintrusion nicht zugänglichen feineren Mesoporen-Bereichs zwischen etwa 75 bis 5 nm wurde die Gasadsorption mit Stickstoff eingesetzt. Die kumulativen Porenvolumina der modifizierten Dünnbettmörtel-Proben mit Zusätzen von jeweils insgesamt 10 Vol.-% sind im Vergleich mit der Dünnbettmörtel-Nullprobe in Abhängigkeit vom Porendurchmesser dargestellt (Bild 33).

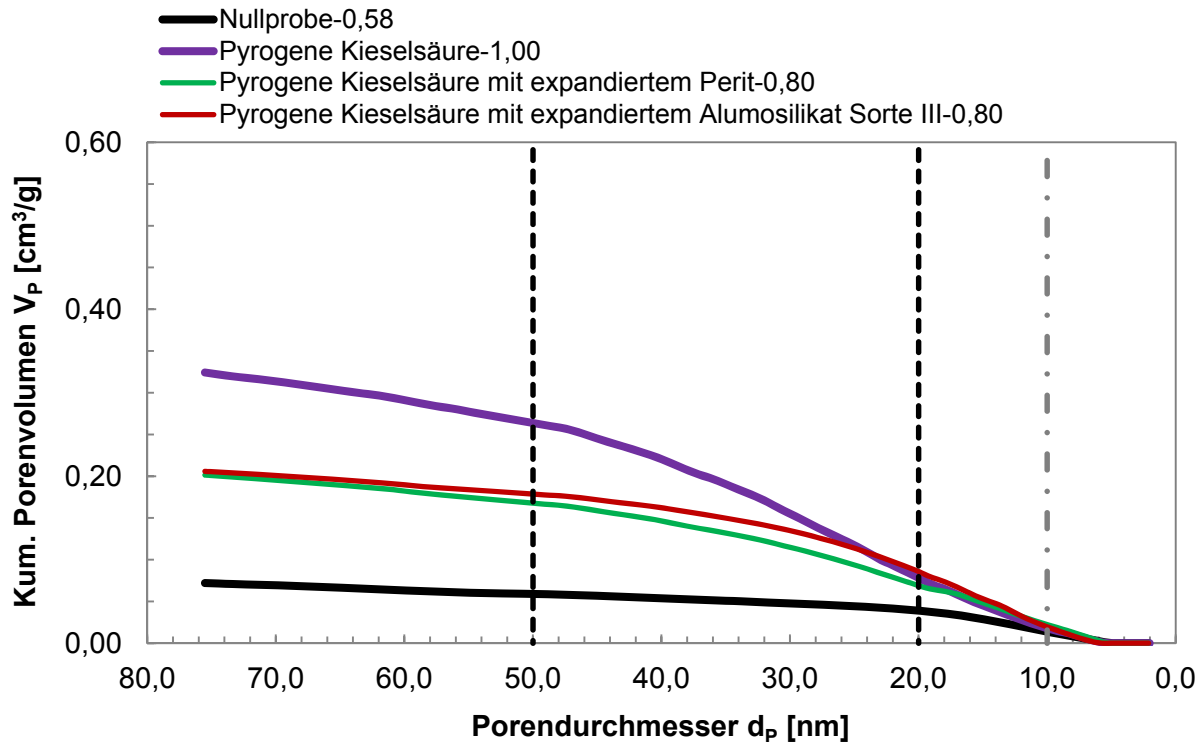


Bild 33: Kumulatives Porenvolumen von Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III, im Porengrößenbereich kleiner 75 nm, im Vergleich mit der Nullprobe

Die Dünnbettmörtel-Nullprobe mit einem w/m-Verhältnis von 0,58 verfügt im Mesoporen-Bereich zwischen 75 und 5 nm über ein spezifisches Porenvolumen von 0,059 cm³/g. Die Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bewirkt bei einem w/m-Verhältnis von 1,00 eine Erhöhung des spezifischen Porenvolumens im Bereich der Mesoporen unter 50 nm auf 0,261 cm³/g. Die spezifischen Porenvolumina der kombinierten Mörtelmischungen aus jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und jeweils 5 Vol.-% expandiertem Alumosilikat der Sorte III bzw. expandiertem Perlit betragen 0,180 sowie 0,169 cm³/g. Die Messergebnisse der Gasadsorptions-Analyse bestätigen die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie.

4.4.2.4 Röntgendiffraktometrie (XRD)

Um zu klären, welche Reaktionen bzw. Klinkerphasen für die Zunahme der Druckfestigkeiten des Dünnbettmörtels bei Zugabe von pyrogener Kieselsäure in Frage kommen, wurden vergleichende Röntgenanalysen (XRD) durchgeführt (Bild 34). Dabei wurden XRD-Analysen von Dünnbettmörtel-Nullproben mit einem w/m-Verhältnis 0,58 mit XRD-Analysen von Dünnbettmörtel-Proben unter Zugabe von 10 Vol.-% py-

rogener Kieselsäure und einem w/m-Verhältnis von 1,00 nach einer Alterungszeit von jeweils 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen miteinander verglichen. Von besonderer Bedeutung war, dass jeweils Parallel-Proben einerseits unter CO₂-Ausschluss und andererseits in normaler Laborluft-Atmosphäre ausgehärtet wurden. Im Falle des CO₂-Ausschlusses wurden die Dünnbettmörtel-Proben in einem zunächst evakuierten und dann mit Stickstoff gefluteten Exsikkator gealtert (Bild 14, Kap. 3.5.3); die entsprechenden Parallel-Proben wurden in normaler Laborluft-Atmosphäre gelagert. Bezüglich den Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III wurden die Aufnahmen nach 2, 7 und 28 Tagen – hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre, angefertigt (Bild 36). Für die Darstellung der Ergebnisse wurde jeweils der Winkelbereich zwischen 25 bis 35 °2θ betrachtet. In allen Proben konnten die im Zement üblichen Hauptklinkerphasen nachgewiesen werden. Die zugehörigen Reflexe sind in den Bildern 34 und 36 mit den Bezeichnungen „a, b und l“ gekennzeichnet. Außerdem wurde in allen Proben Calcit (c) und Quarz (q) gefunden sowie die Hydratationsprodukte Ettringit (e) und Portlandit (p).

Portlandit-Abbau

Bei der Hydratation der Dünnbettmörtel-Proben entsteht stets Calciumhydroxid (Portlandit), welches durch die entsprechenden Reflexe nachgewiesen ist (Bild 34). Es kann angenommen werden, dass die Dosierung von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure in die Dünnbettmörtel-Matrix eine chemische Reaktion zwischen dem Calciumhydroxid und dem SiO₂ entsprechend Formel 1 ermöglicht (Kap. 4.4.1.4 bzw. 4.4.1.5). Dabei wird der Portlandit (Ca(OH)₂) mit zunehmender Erhärtungszeit abgebaut, was durch die stetig abnehmenden Reflexe nach einer Aushärtungszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen bestätigt wird. Vermutlich handelt es sich um den in der Literatur bekannten Portlandit-Abbau, welcher die Bildung zusätzlicher erhärtungsfähiger Verbindungen (C-S-H-Phasen) zur Folge hat. Vergleicht man zunächst die Röntgendiffraktogramme der Dünnbettmörtel-Nullproben (Bild 34), so lässt sich feststellen, dass während der Hydratation unter CO₂-Ausschluss im Exsikkator, geringfügig (nach 7 und 14 Tagen) bis deutlich (nach 21 und 28 Tagen) höhere Portlandit-Intensitäten als bei Hydratation in Laborluft-Atmosphäre resultieren. Dieses Verhalten lässt sich auf den Unterschied der relativen Luftfeuchtigkeit von annähernd 100 % im Exsikkator bzw. etwa 60 % in Laborluft-Atmosphäre zurückführen. Für eine Hydratation unter

CO₂-Ausschluss im Exsikkator steht vergleichsweise mehr reaktives Wasser zur Verfügung als bei der Hydratation in Laborluft-Atmosphäre. Im Falle der kieselsäurehaltigen Probe (10 Vol.-%) zeigt sich das gleiche Verhalten wie bei den Nullproben, jedoch sind die Portlandit-Intensitäten nach 14, 21 und 28 Tagen im Vergleich nur geringfügig erhöht. Diese leicht erhöhten Reflexe können möglicherweise „unverbrauchtem“ Calciumhydroxid zugeordnet werden, da das amorphe Siliziumdioxid der Kieselsäure nach spätestens 14 Tagen vollständig mit dem Calciumhydroxid reagiert hat (Bild 34, rechts). Die unter CO₂-Ausschluss hydratisierten Dünnbettmörtel-Proben verfügen zudem über niedrigere Intensitäten der Hauptklinkerphasen Alit, Belit und Aluminat, was auf einen stärkeren Verbrauch dieser Phasen hindeutet. Demnach kann angenommen werden, dass unter CO₂-Ausschluss eine vollständige Hydratation bzw. ungestörte sowie vollständige puzzolanische Reaktion der pyrogenen Kieselsäure mit dem Calciumhydroxid abläuft. In Laborluft-Atmosphäre hingegen, erfolgt bei gleichzeitig verminderter relativer Luftfeuchtigkeit eine unvollständige Hydratation bzw. eine gestörte puzzolanische Reaktion und Carbonatisierung (Kap. 4.4.1.4 bzw. 4.4.1.5).

Um diese Vermutungen zu bestätigen, wurde der exakt gleiche Versuch an der perlithaltigen Probe mit 10 Vol.-% und dem w/m-Verhältnis 0,57 aus Teil I (Kap. 4.4.1), parallel zur kieselsäurehaltigen Probe durchgeführt. Aus den XRD-Aufnahmen nach einer Hydratationszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen (Bild 35) geht hervor, dass der expandierte Perlit weder in Laborluft-Atmosphäre, noch unter CO₂-Ausschluss eine deutliche puzzolanische Reaktion auslöst; die Portlandit-Intensitäten sind im Vergleich zur Nullprobe in allen Fällen gleichbleibend bzw. nur marginal niedriger.

Die Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat der Sorte III zeigen in Laborluft-Atmosphäre ebenfalls unveränderte Portlandit-Intensitäten (Bild 36). Dies bedeutet, die pyrogene Kieselsäure ist durch die Kombination mit expandiertem Perlit bzw. expandiertem Aluminosilikat der Sorte III in ihrer puzzolanischen Reaktivität geschwächt; vor allem aber weil sie in beiden Fällen nur mit 5 Vol.-% dosiert wurde.

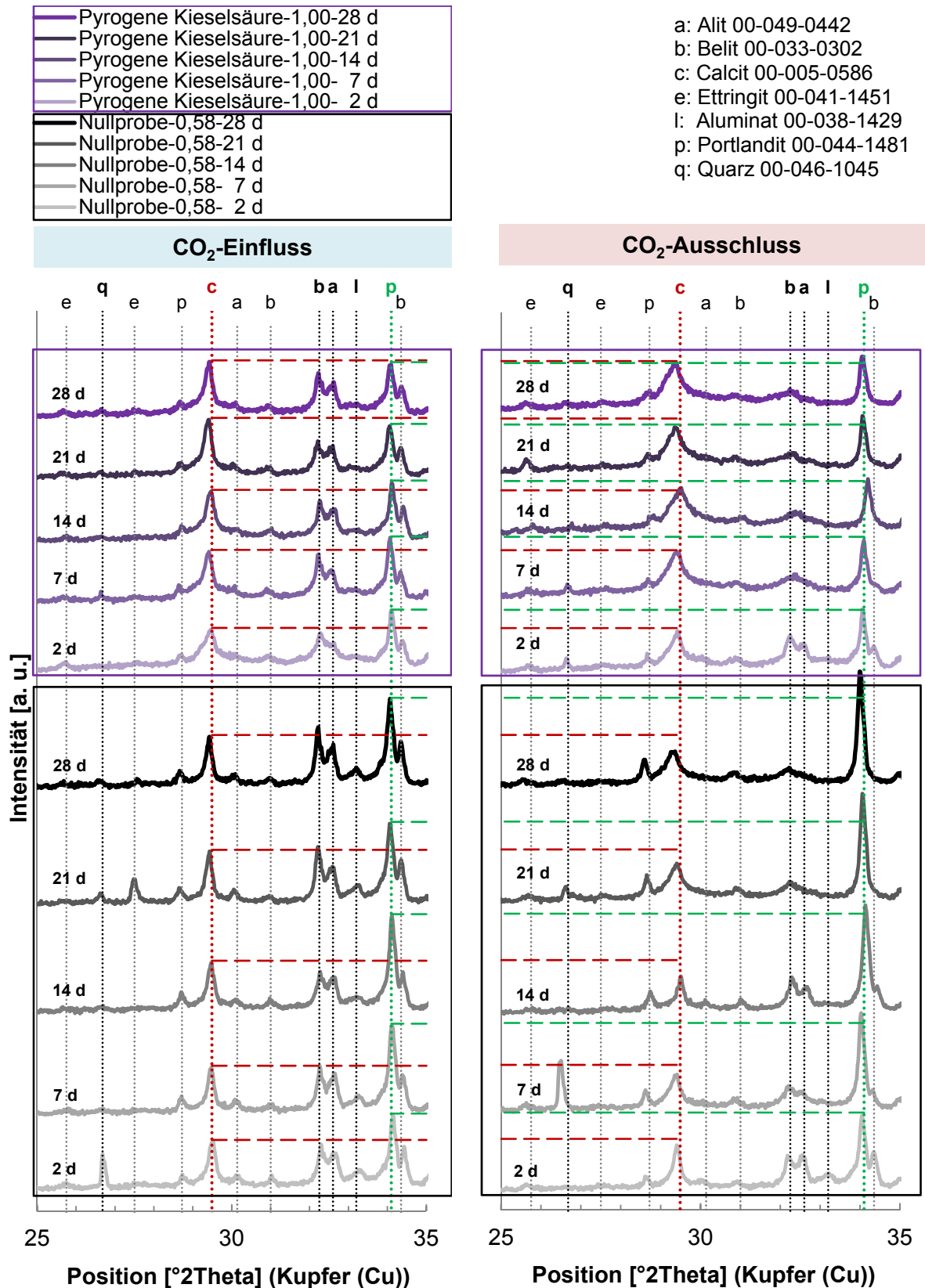


Bild 34: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre (links) sowie unter CO₂-Ausschluss (rechts) (Bilder A-7)

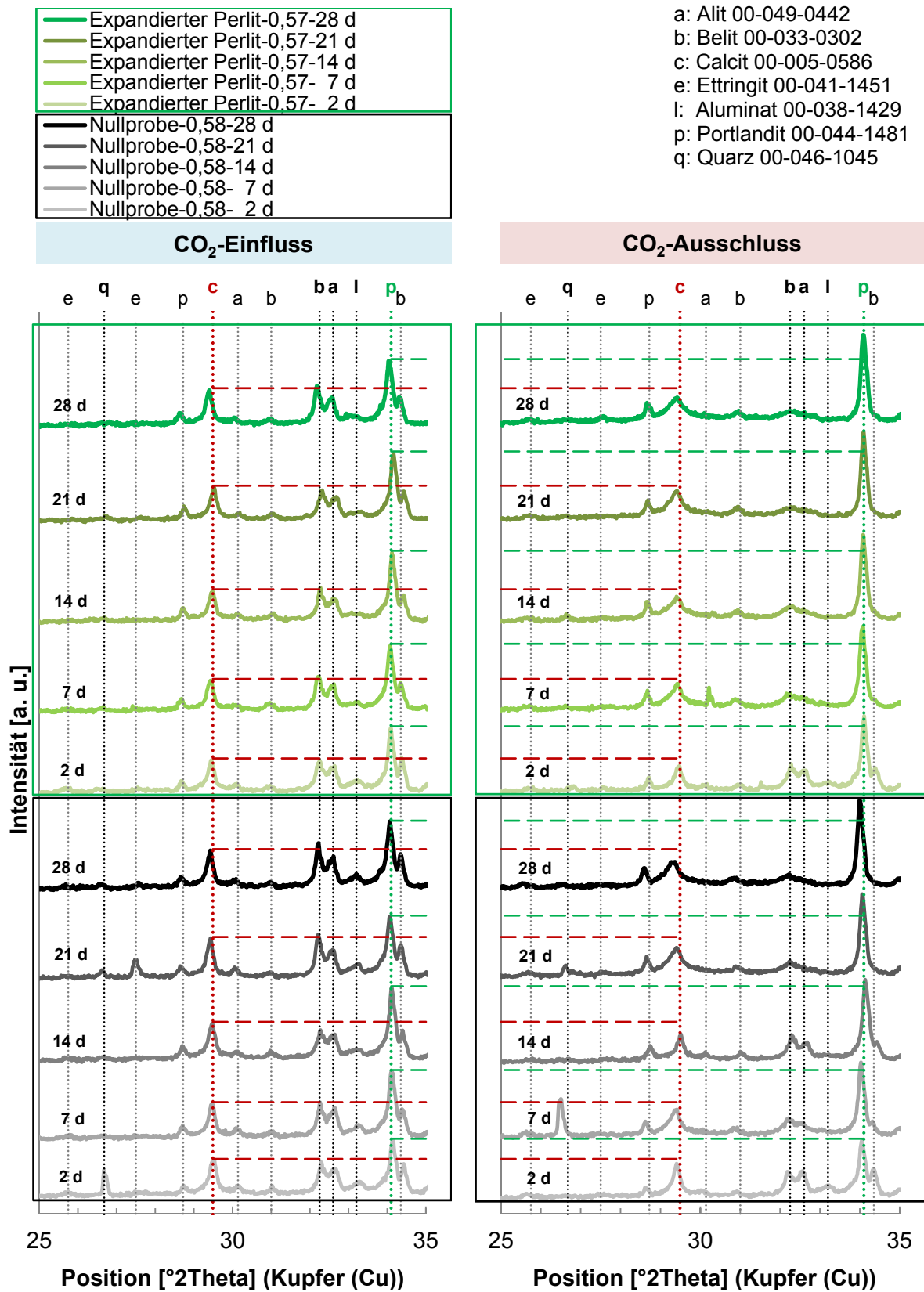


Bild 35: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre (links) sowie unter CO₂-Ausschluss (rechts) (Bilder A-8)

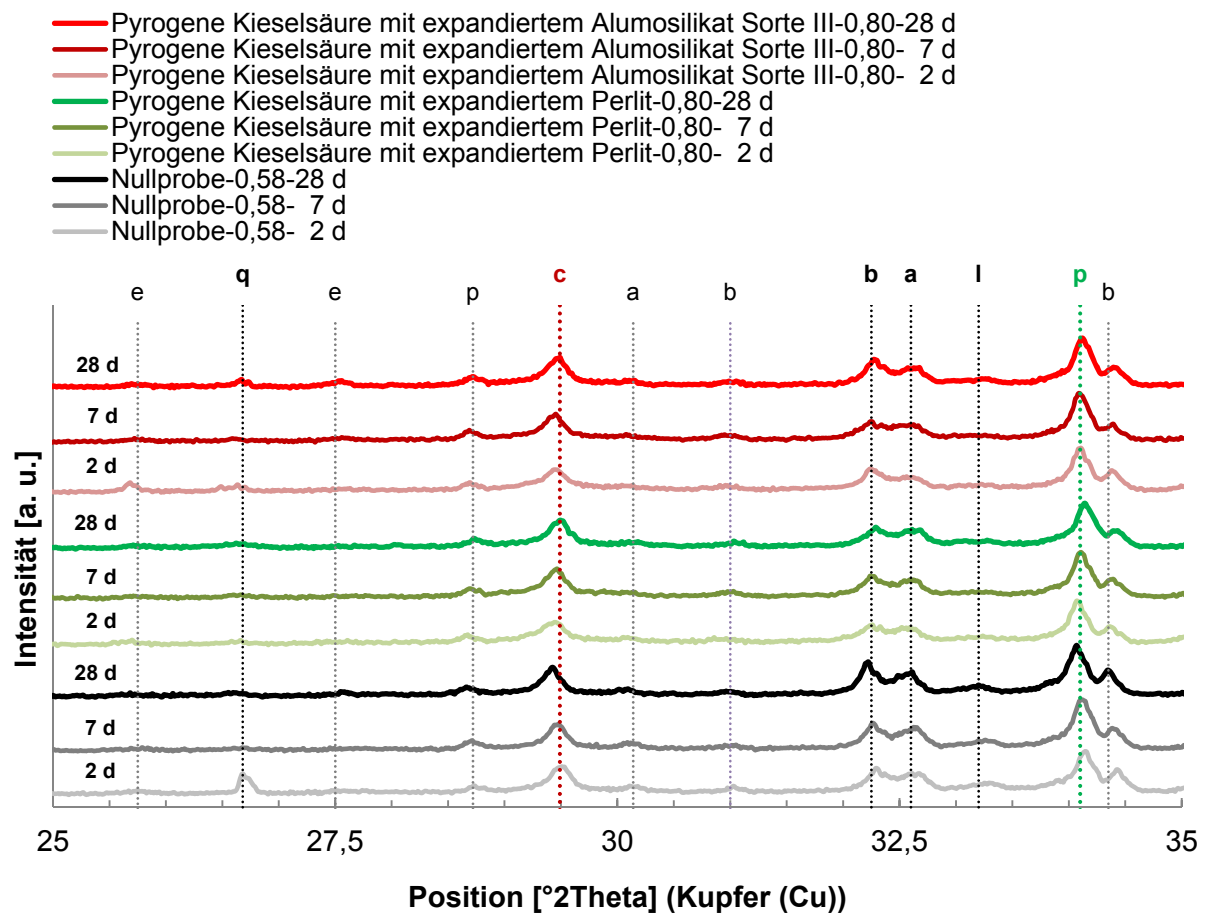


Bild 36: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III im Probenalter von 2, 7 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre (Bild A-9)

Carbonatisierung

Die in Laborluft-Atmosphäre hydratisierenden Dünnbettmörtel-Proben (Bild 34 bzw. 35, links; Bild 36) zeigen im Laufe der Hydratation in allen Fällen gleichbleibende bzw. zunehmende Calcit-Intensitäten. Es kann angenommen werden, dass es dabei zu einem Portlandit-Abbau unter gleichzeitiger Calcit-Bildung kommt (Formel 13). Im Vergleich zur Nullprobe verfügt nur die Perlit-haltige Probe (Bild 35, links) über geringfügig niedrigere Reflexe für jedes Prüfalter.

Bei der Hydratation des Dünnbettmörtels unter CO_2 -Ausschluss (Bild 34 bzw. 35, rechts) im Exsikkator zeigt sich dagegen ein differenziertes Bild. Durch den Versuchsaufbau mit Probenalterung im zunächst evakuierten und dann mit N_2 unter Normaldruck gefluteten Exsikkator war es möglich, eine Carbonatisierung der Proben durch CO_2 -Einflüsse aus der Luft gemäß Formel 13 vollständig zu unterbinden. Dadurch wurde kein „zusätzliches“ CO_2 aus der Luft in den Dünnbettmörtel einge-

bracht (Kap. 3.5.3, Bild 14). Dieser Effekt ist bei der Dünnbettmörtel-Nullprobe und der Probe mit Perlit-Zugabe sehr deutlich zu erkennen (Bild 35, rechts): die Calcit-Intensitäten sind geringer. Die kieselsäurehaltige Dünnbettmörtel-Probe verfügt unter CO_2 -Ausschluss über gleich hohe Calcit-Intensitäten wie nach der Hydratation in Laborluft-Atmosphäre. Ein Grund hierfür könnte das erhöhte w/m-Verhältnis von 1,00 sein, wodurch möglicherweise eine spontane Carbonatisierung während der Probenvorbereitung und XRD-Analyse begünstigt wird.

4.4.2.5 Thermische Analyse (TG)

Um die röntgenographischen Ergebnisse aus Kapitel 4.4.2.4 zu quantifizieren, wurden analog zu den XRD-Analysen thermogravimetrische Untersuchungen durchgeführt (Bilder 37 und 38). Bild 37 zeigt den Masseverlust einer Dünnbettmörtel-Nullprobe (w/m-Verhältnis 0,58) sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit (w/m-Verhältnis 0,57) und einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure (w/m-Verhältnis 1,00) jeweils im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, die in Laborluft-Atmosphäre hydratisiert wurden. Zum Vergleich ist der Massenverlust in Abhängigkeit von der Temperatur der Dünnbettmörtel-Proben dargestellt, die unter CO_2 -Ausschluss in N_2 -Atmosphäre hydratisiert wurden (Bild 38). Für die Bewertung wurden die Massenverluste der Dünnbettmörtel-Proben in speziellen Temperaturbereichen (Bilder 37 und 38, Tabelle 29.1/2) miteinander verglichen. Von Raumtemperatur bis 390 °C findet bei allen Dünnbettmörtel-Proben zunächst eine kontinuierliche Entwässerung der Hydratphasen Ettringit, Tetracalciumaluminhydrat bzw. Calciumsilikathydrat in unterschiedlichem Ausmaß statt. Bei Temperaturen über 390 °C spaltet der Portlandit unter Bildung von Calciumoxid das Wasser ab (Bilder 37 und 38, Tabelle 29.1/2; Spalte 10/11, Formel 40). Die Wasserabspaltung ist bei 460 °C für alle Dünnbettmörtel-Proben beendet. Im Falle der kieselsäurehaltigen Proben kommt es außerdem zu einem starken Wasserverlust im Temperaturbereich bis 120 °C , welcher durch das erhöhte w/m-Verhältnis von 1,00 erklärt werden kann. Im Temperaturbereich von 640 bis 715 °C beginnt die Decarbonatisierung (Bilder 37 und 38, Tabelle 29.1/2; Spalte 14/15, Formel 43) von CaCO_3 , das durch Carbonatisierung aus $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bzw. CaO und CO_2 gemäß Formel 13 gebildet wurde.

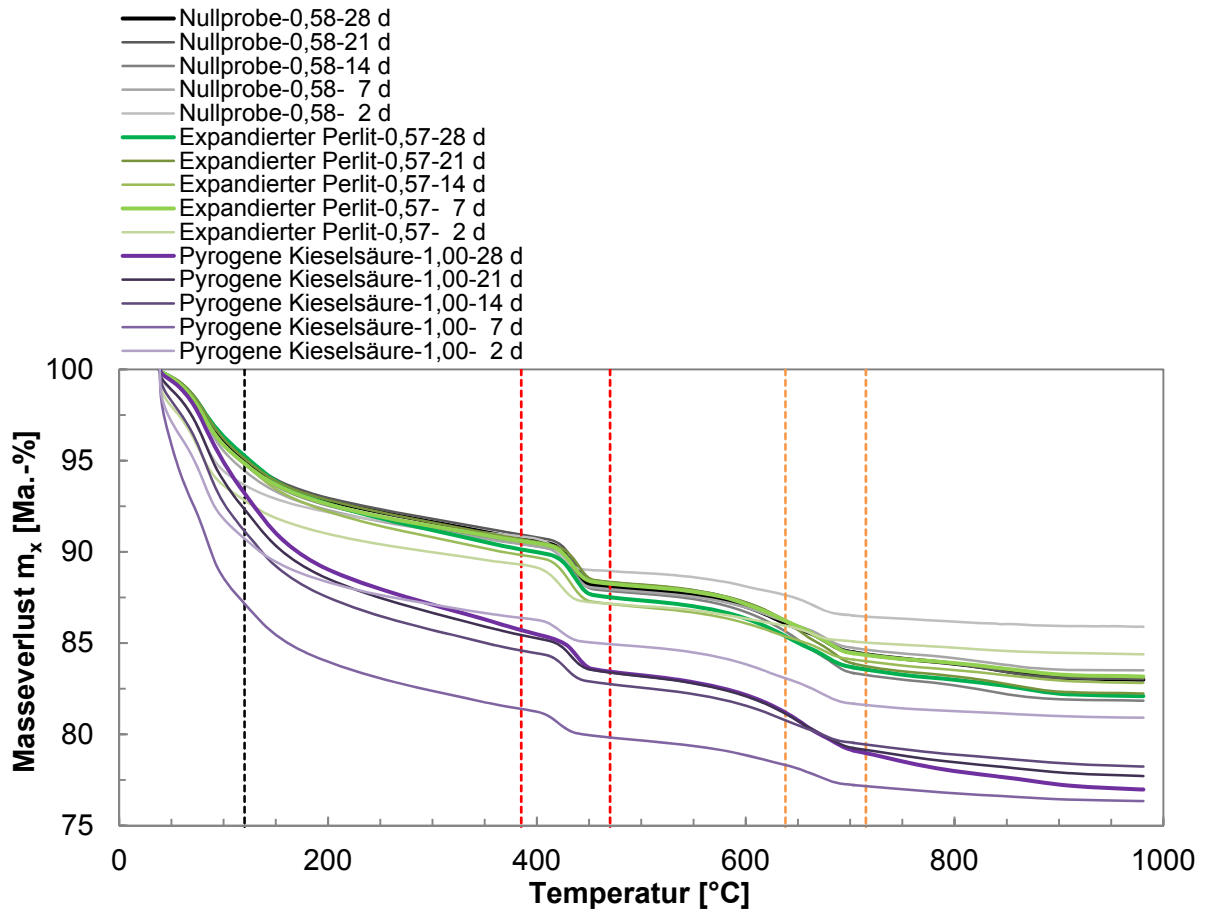


Bild 37: Thermogravimetrische Untersuchungen von Dünnbettmörtel-Nullproben im Vergleich mit Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% Zusatzstoff nach 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, die in Laborluft-Atmosphäre hydratisiert wurden (Bild A-10)

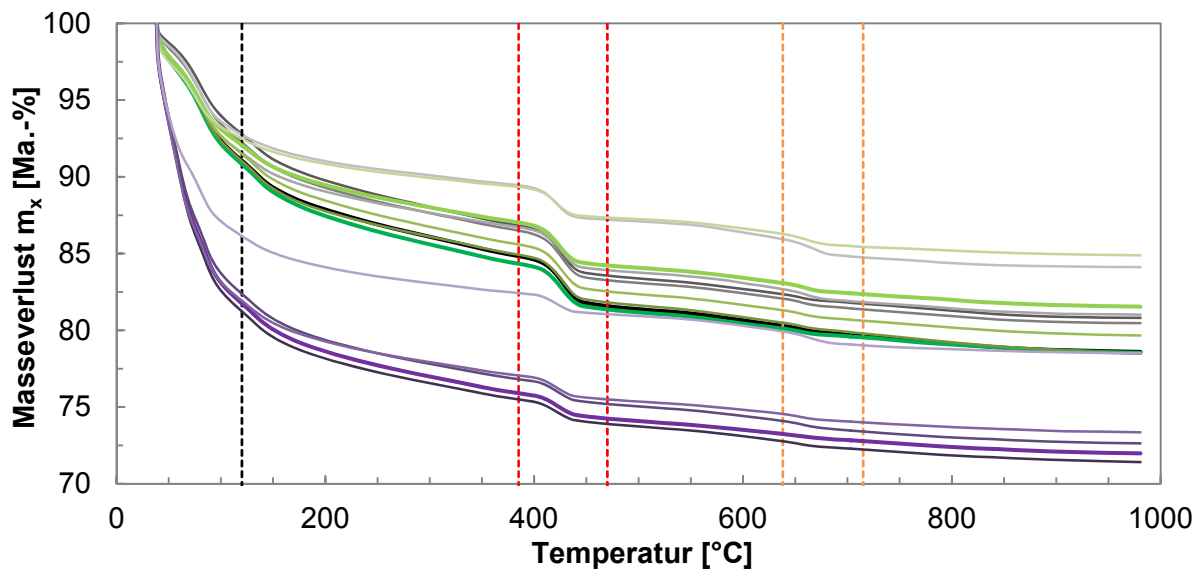


Bild 38: Thermogravimetrische Untersuchungen von Dünnbettmörtel-Nullproben im Vergleich mit Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% Zusatzstoff nach 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, die unter CO₂-Ausschluss im Exsikkator in N₂-Atmosphäre hydratisiert wurden (Bild A-11)

Tabelle 29.1: Thermogravimetrie bzw. Restmassen und Massenverluste sowie berechnete Wasserverluste bzw. Portlandit-Massen und Kohlendioxidverluste bzw. Calciumcarbonat-Massen nach Formel 60 bzw. 62 einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit und einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nach einer Erhärungszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre sowie unter CO₂-Ausschluss (N₂) (Bilder 37 und 38)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosie- rung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Prüf- alter	Rest- masse nach TG	Masseverlust				Masse		Masse			
					Gesamt nach TG		Wasser		Portlandit		Kohlendioxid		Calcium- carbonat	
							Anteilig 390 bis 460 °C		Gesamt 390 bis 460 °C		Gesamt 640 bis 715 °C			
					m _y		m _x		m _{CH}		m _c		m _{cc}	
			[d]	[Ma.-%]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]
Dünnbett- mörtel	Nullprobe (CO ₂)	0,58	2	85,89	14,11	4,52	1,84	0,59	7,57	2,42	1,07	0,34	2,43	0,78
			7	83,51	16,49	5,28	2,33	0,75	9,58	3,07	1,29	0,41	2,93	0,94
			14	81,84	18,16	5,81	2,46	0,79	10,12	3,24	1,65	0,53	3,75	1,20
			21	83,02	16,98	5,43	2,54	0,81	10,45	3,34	1,68	0,54	3,82	1,22
			28	82,99	17,01	5,44	2,50	0,80	10,28	3,29	1,65	0,53	3,75	1,20
	Nullprobe (N ₂)		2	84,11	15,89	5,08	2,20	0,70	9,05	2,90	1,14	0,36	2,59	0,83
			7	81,02	18,98	6,07	2,72	0,87	11,19	3,58	0,74	0,24	1,68	0,54
			14	80,47	19,53	6,25	3,23	1,03	13,28	4,25	0,61	0,20	1,39	0,44
			21	80,81	19,19	6,14	3,19	1,02	13,12	4,20	0,51	0,16	1,16	0,37
			28	78,60	21,40	6,85	3,29	1,05	13,53	4,33	0,50	0,16	1,14	0,36
Expandierter Perlit	10 (CO ₂)	0,57	2	84,38	15,62	5,00	2,06	0,66	8,47	2,71	0,80	0,26	1,82	0,58
			7	83,16	16,84	5,39	2,17	0,69	8,92	2,85	1,77	0,57	4,03	1,29
			14	82,83	17,17	5,49	2,47	0,79	10,16	3,25	1,81	0,58	4,12	1,32
			21	82,23	17,77	5,69	2,22	0,71	9,13	2,92	2,38	0,76	5,41	1,73
			28	82,09	17,91	5,73	2,58	0,83	10,61	3,40	2,49	0,80	5,66	1,81
	10 (N ₂)		2	84,88	15,12	4,84	2,08	0,67	8,55	2,74	0,81	0,26	1,84	0,59
			7	81,54	18,46	5,91	2,85	0,91	11,72	3,75	0,64	0,20	1,46	0,47
			14	79,67	20,33	6,51	3,03	0,97	12,46	3,99	0,58	0,19	1,32	0,42
			21	78,51	21,49	6,88	3,07	0,98	12,63	4,04	0,50	0,16	1,14	0,36
			28	78,53	21,47	6,87	3,09	0,99	12,71	4,07	0,45	0,14	1,02	0,33

Tabelle 29.2: Fortsetzung Tabelle 29.1

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosie- rung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Prüf- alter	Rest- masse nach TG	Masseverlust				Masse		Masse					
					Gesamt nach TG				Wasser		Gesamt 390 bis 460 °C		Kohlendioxid		Calcium- carbonat	
					m _y				m _x		m _{CH}		m _c		m _{CC}	
					[d]	[Ma.-%]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]	[Ma.-%]	[mg]
Dünnbett- mörtel	Nullprobe (CO ₂)	0,58	2	85,89	14,11	4,52	1,84	0,59	7,57	2,42	1,07	0,34	2,43	0,78		
			7	83,51	16,49	5,28	2,33	0,75	9,58	3,07	1,29	0,41	2,93	0,94		
			14	81,84	18,16	5,81	2,46	0,79	10,12	3,24	1,65	0,53	3,75	1,20		
			21	83,02	16,98	5,43	2,54	0,81	10,45	3,34	1,68	0,54	3,82	1,22		
	28		82,99	17,01	5,44	2,50	0,80	10,28	3,29	1,65	0,53	3,75	1,20			
	Nullprobe (N ₂)		2	84,11	15,89	5,08	2,20	0,70	9,05	2,90	1,14	0,36	2,59	0,83		
			7	81,02	18,98	6,07	2,72	0,87	11,19	3,58	0,74	0,24	1,68	0,54		
			14	80,47	19,53	6,25	3,23	1,03	13,28	4,25	0,61	0,20	1,39	0,44		
21		80,81	19,19	6,14	3,19	1,02	13,12	4,20	0,51	0,16	1,16	0,37				
28	78,60	21,40	6,85	3,29	1,05	13,53	4,33	0,50	0,16	1,14	0,36					
Pyrogene Kieselsäure	10 (CO ₂)	1,00	2	80,91	19,09	6,11	1,36	0,44	5,59	1,79	1,16	0,37	2,64	0,84		
			7	76,34	23,66	7,57	1,46	0,47	6,00	1,92	0,94	0,30	2,14	0,68		
			14	78,23	21,77	6,97	1,66	0,53	6,83	2,19	1,07	0,34	2,43	0,78		
			21	77,71	22,29	7,13	1,89	0,60	7,77	2,49	1,78	0,57	4,05	1,30		
	28		76,97	23,03	7,37	1,95	0,62	8,02	2,57	2,20	0,70	5,00	1,60			
	10 (N ₂)		2	78,52	21,48	6,87	1,25	0,40	5,14	1,64	0,84	0,27	1,91	0,61		
			7	73,36	26,64	8,53	1,43	0,46	5,88	1,88	0,45	0,14	1,02	0,33		
			14	72,64	27,36	8,76	1,46	0,47	6,00	1,92	0,52	0,17	1,18	0,38		
21		71,41	28,59	9,15	1,45	0,46	5,96	1,91	0,43	0,14	0,98	0,31				
28	71,99	28,01	8,96	1,45	0,46	5,96	1,91	0,32	0,10	0,73	0,23					

Portlandit-Abbau

Die anteilige Substitution von 10 Vol.-% des Grobanteils der Dünnbettmörtel-Matrix mit einer Korngröße $\geq 125 \mu\text{m}$ durch expandierten Perlit (w/m-Verhältnis 0,57) bzw. pyrogene Kieselsäure (w/m-Verhältnis 1,00) ermöglicht eine chemische Reaktion des in den Zusatzstoffen enthaltenen SiO_2 mit dem vorhandenen Portlandit (Bild 39, Tabelle 29.1/2; Spalte 10/11). Aus dem Vergleich der berechneten Portlandit-Massen gemäß Formel 40 in der Dünnbettmörtel-Nullprobe und der perlithaltigen Probe geht hervor, dass während der Hydratationszeit von 2 bis 28 Tagen unter CO_2 -Ausschluss höhere Portlandit-Massen im Dünnbettmörtel vorliegen, als während der Hydratation in Laborluft-Atmosphäre. Nach einer Abbindezeit von 28 Tagen verfügt die unter CO_2 -Ausschluss erhärtete Nullprobe über eine Portlandit-Masse von 4,33 mg, entsprechend 13,53 Ma.-% (Bild 39, Tabelle 29.1/2; Spalte 10/11), während bei der im gleichen Zeitraum in Laborluft-Atmosphäre erhärteten Nullprobe eine Portlandit-Masse von 3,29 mg, entsprechend 10,28 Ma.-% festgestellt wurde (Bild 39).

Im Falle der durch expandierten Perlit modifizierten Dünnbettmörtel-Probe zeigt sich der gleiche Zusammenhang wie bei der Nullprobe. Während der Hydratationszeit von 2 bis 28 Tagen unter CO_2 -Ausschluss resultieren höhere Portlandit-Massen als in Laborluft-Atmosphäre (Bild 39). Nach 28 Tagen verfügt die unter CO_2 -Ausschluss abgegebene Perlit-haltige Dünnbettmörtel-Probe über eine Portlandit-Masse von 4,07 mg, entsprechend 12,71 Ma.-%. Im Vergleich dazu wurde in Laborluft-Atmosphäre eine Portlandit-Masse von 3,40 mg, entsprechend 10,61 Ma.-% festgestellt. Die berechneten Portlandit-Massen sind nach Hydratation unter CO_2 -Ausschluss höher als nach Hydratation in Laborluft-Atmosphäre. Nach 28 Tagen fand unter CO_2 -Ausschluss ein Portlandit-Abbau um 6 % statt, nämlich von 4,33 auf 4,07 mg, entsprechend von 13,53 auf 12,71 Ma.-% im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe. In Laborluft-Atmosphäre wurde mit 10,61 Ma.-% nach 28 Tagen eine im Vergleich zur Nullprobe mit 10,28 Ma.-% vergleichbare Portlandit-Masse berechnet (Bild 39, Tabelle 29.1; Spalte 10). Die Bildung der unterschiedlichen Portlandit-Massen kann auf die verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten zurückgeführt werden. Bei den unter CO_2 -Ausschluss im Exsikkator erhärteten Proben steht für die Hydratation mehr Wasser zur Verfügung, so dass vergleichsweise mehr Portlandit gebildet wird und entsprechend stärker abgebaut werden kann.

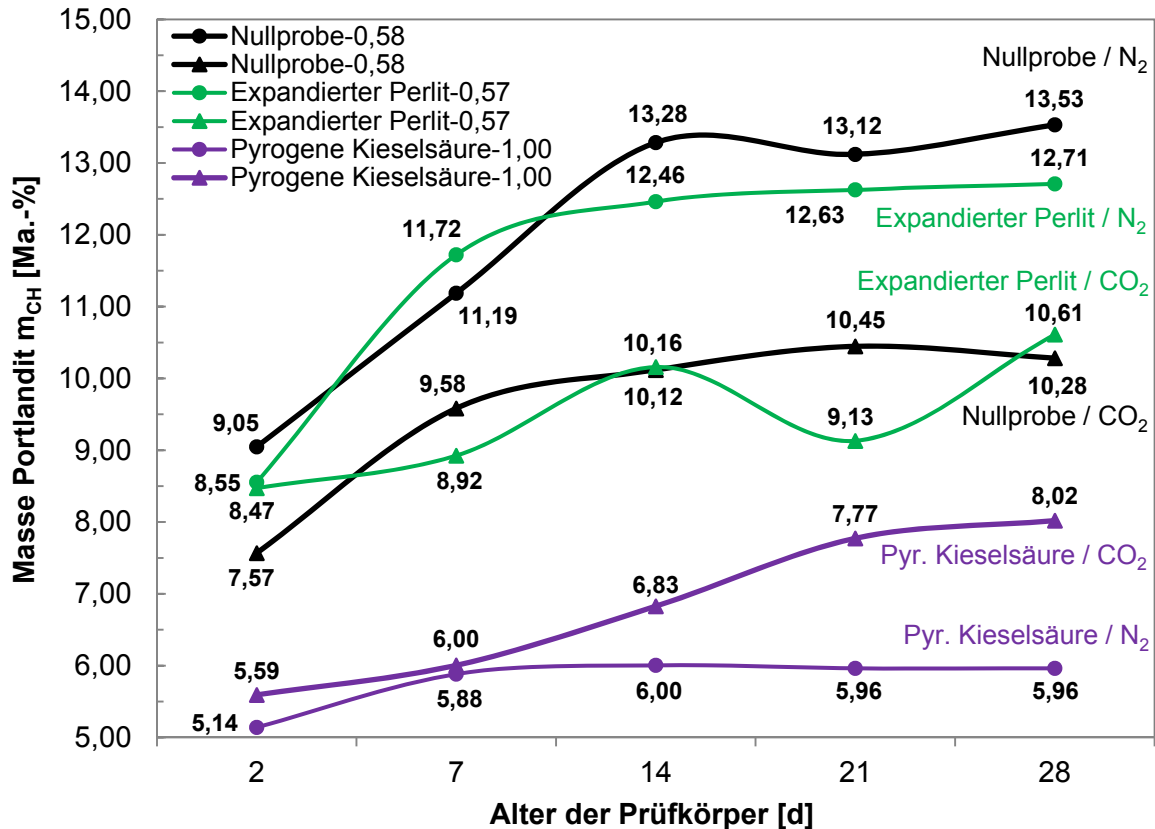


Bild 39: Vergleich der Portlandit-Bildung in einer Dünnbettmörtel-Nullprobe mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit und einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure nach einer Erhärtungszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre sowie unter CO₂-Ausschluss im Exsikkator in N₂-Atmosphäre

Im Falle der kieselsäurehaltigen Proben zeigt sich, dass diese nach 2 und 7 Tagen zunächst über vergleichbar hohe Portlandit-Massen verfügen. Nach einer Erhärtungszeit von 2 und 7 Tagen unter CO₂-Ausschluss wurden mit 5,59 bzw. 6,00 Ma.-% nur geringfügig höhere Portlandit-Massen ermittelt, als bei der Hydratation in Laborluft-Atmosphäre mit Portlandit-Massen von 5,14 bzw. 5,88 Ma.-% (Bild 39, Tabelle 29.2; Spalte 10). Nach einer Hydratationszeit von 14, 21 sowie 28 Tagen wird unter CO₂-Ausschluss kein Calciumhydroxid mehr verbraucht; die Portlandit-Masse liegt bei durchschnittlich 6 Ma.-%. Es kann angenommen werden, dass eine Aushärtung des Dünnbettmörtels unter CO₂-Ausschluss eine ungestörte puzzolanische Reaktion der Kieselsäure mit dem Calciumhydroxid begünstigt. Die Aushärtung in Laborluft-Atmosphäre hingegen, führt wegen des unzureichenden Wasserangebots (Kap. 4.4.2.1) zu einer gestörten puzzolanischen Reaktion der Kieselsäure mit dem Calciumhydroxid und zu einer schwachen Carbonatisierung. Bei Aushärtung in Laborluft-Atmosphäre steigen die nachgewiesenen Portlandit-Massen daher nach 14,

21 sowie 28 Tagen weiter auf 6,83, 7,77 sowie 8,02 Ma.-% an und es findet eine vergleichsweise schwächere puzzolanische Reaktion statt. Es kann zusammengefasst werden, dass innerhalb einer Abbindezeit von 28 Tagen unter CO_2 -Ausschluss ein Portlandit-Abbau von 13,53 Ma.-% der Nullprobe auf 5,96 Ma.-% der modifizierten Probe, also um 56 % erfolgt. Wird der Abbindeprozess stattdessen in Laborluft-Atmosphäre durchgeführt, resultiert im gleichen Abbindezeitraum ein Portlandit-Abbau von 10,28 auf 8,02 Ma.-%, also um 22 % (Bild 39, Tabelle 29.2; Spalte 10).

Carbonatisierung

Die Dünnbettmörtel-Nullprobe erfährt im Temperaturbereich von 640 bis 715 °C nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre einen CO_2 -Verlust von 1,65 Ma.-%, welcher einer Calciumcarbonat-Masse von 1,20 mg bzw. 3,75 Ma.-% entspricht (Bild 40, Tabelle 29.1/2; Spalte 14/15, Formel 42). Wird die Dünnbettmörtel-Nullprobe unter CO_2 -Ausschluss hydratisiert, liegt der CO_2 -Verlust bei 0,50 Ma.-% und die CaCO_3 -Masse bei 0,36 mg bzw. 1,14 Ma.-%.

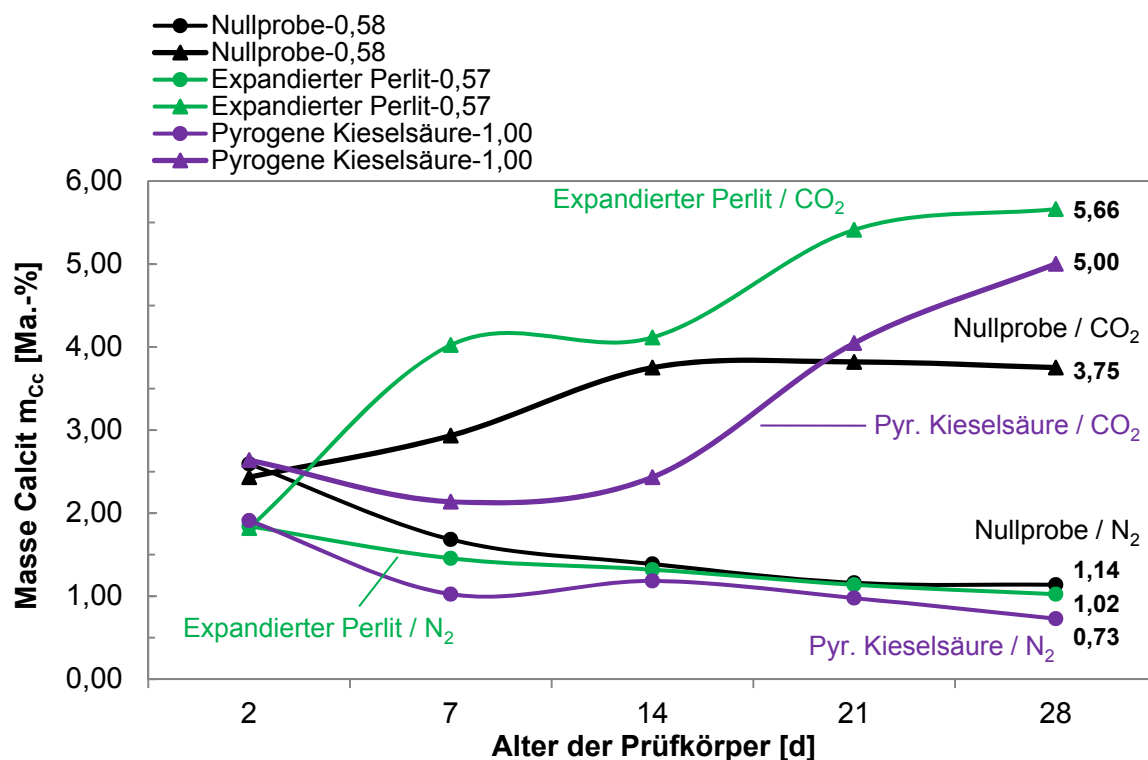


Bild 40: CaCO_3 -Gehalte [Ma.-%] einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit und einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nach einer Erhärtungszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre sowie unter CO_2 -Ausschluss (N_2)

Im Falle der perlithaltigen Probe wurde in Laborluft-Atmosphäre ein CO₂-Verlust von 2,49 Ma.-% festgestellt. Dies entspricht einer Calciumcarbonat-Masse von 1,81 mg bzw. 5,66 Ma.-%. Unter CO₂-Ausschluss zeigt sich das Gegenteil. Die Calciumcarbonat-Masse liegt mit 0,33 mg bzw. 1,02 Ma.-% deutlich niedriger. Die Decarbonatisierung der kieselsäurehaltigen Probe verläuft im Vergleich zur Nullprobe in Laborluft-Atmosphäre mit 5,00 Ma.-% ebenfalls stärker als unter CO₂-Ausschluss mit 0,73 Ma.-%. Aus Bild 40 geht hervor, dass für alle Dünnbettmörtel-Proben die Carbonatisierung bzw. Decarbonatisierung unter CO₂-Ausschluss schwächer ausgeprägt verläuft. In Laborluft-Atmosphäre zeigt sich das genaue Gegenteil, nämlich eine vergleichsweise erhöhte Carbonatbildung in Abhängigkeit von der Zeit.

In den Bildern 37 bis 40 sind nur die Dünnbettmörtel-Proben mit den Zusatzstoffen pyrogene Kieselsäure und expandiertem Perlit dargestellt; die thermogravimetrischen Untersuchungen der beiden Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat der Sorte III befinden sich im Anhang dieser Arbeit (Bilder A-12 und A-13).

4.4.2.6 Resümee – Teil II

Die Forschungsarbeiten aus Teil II zeigen, dass durch den Einsatz spezieller Zusatzstoffe eine wärmetechnische Optimierung von Dünnbettmörtel möglich ist. Durch Zugabe von pyrogener Kieselsäure wurde die Wärmeleitfähigkeit um fast 29 % gemindert. Der so modifizierte Dünnbettmörtel erfüllt die Druckfestigkeitsklasse M 10.

Die Berechnung der Porenvolumen-Verhältnisse aus Mesoporen-Volumina kleiner 50 nm und den Poren-Volumina im Bereich zwischen 1000 bis 100 nm mittels Quecksilberporosimetrie, führt zu der Erkenntnis: je höher das Porenvolumen-Verhältnis, desto erfolgreicher kann die Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Druckfestigkeit abgesenkt werden. Mit Hilfe von XRD- sowie TG-Analysen war es möglich, puzzolanische Reaktionen sowie eine Carbonatisierung von Dünnbettmörtel-Proben qualitativ und quantitativ festzustellen (Schmidt, et al., 2018c).

4.4.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die nachfolgenden REM-Aufnahmen von Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit bzw. 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure (Tabelle 29.1/2) wurden im Probenalter von 28 Tagen nach Hydratation in Laborluft-Atmosphäre angefertigt. Ne-

ben der Beobachtung des Ettringit und dem Portlandit galt die Aufmerksamkeit dem Identifizieren zusätzlicher C-S-H-Phasen sowie der Oberflächenbeschaffenheit bzw. Porosität.

Die Bilder 41 bis 47 zeigen Dünnbettmörtel-Bruchoberflächen in 50-, 500-, 1000- und 5000-facher Vergrößerung. Die Nullprobe (Bild 41) verfügt über eine sehr poröse Matrix mit unterschiedlichen Porengrößen sowie angebrochenen Schaumglaskugeln (Bild A-1.2), welche als Leichtzuschlag in der Ausgangsmischung enthalten sind.

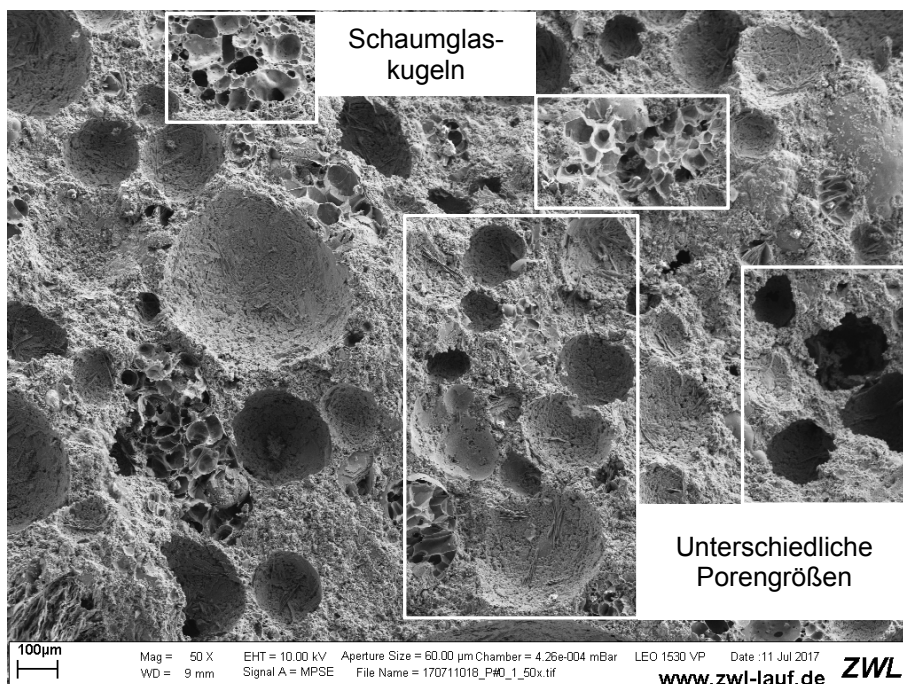


Bild 41: REM-Aufnahme der Bruchfläche einer typischen Dünnbettmörtel-Nullprobe in 50-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

Ab einer 500-fachen Vergrößerung der Nullproben-Oberfläche (Bild 42) gelingt die Identifikation des Hydratationsprodukts Portlandit. Dieser zeigt sich vielfach mit plattenförmiger Geometrie bevorzugt an Porenflächen der Mörtelmatrix. Außerdem lassen sich teilweise Ettringit-Wachstum sowie C-S-H-Phasen an inneren Porenflächen bzw. Bruchoberflächen nachweisen.

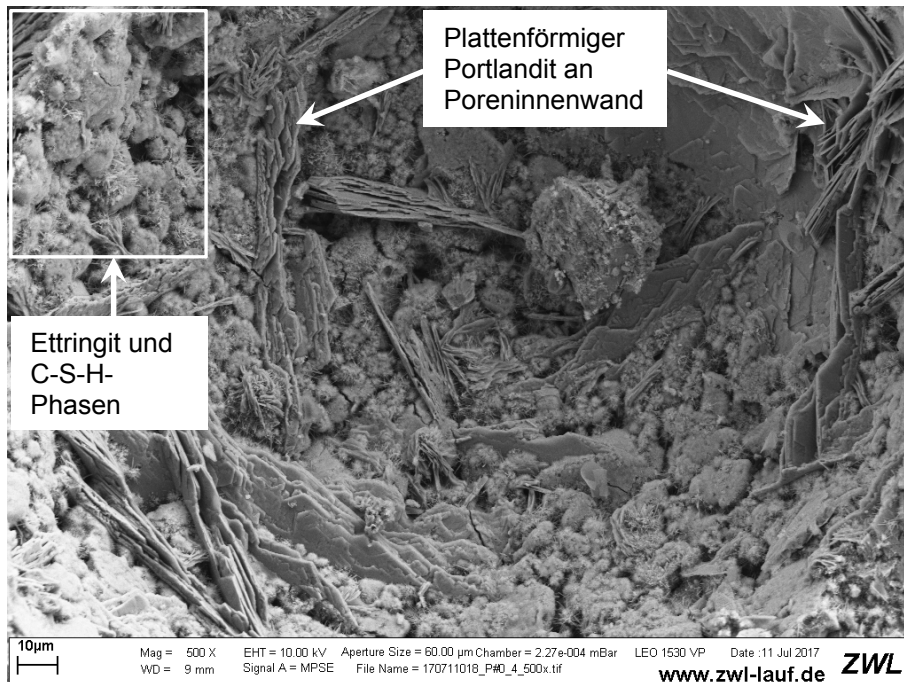


Bild 42: REM-Aufnahme der Bruchfläche einer typischen Dünnbettmörtel-Nullprobe in 500-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

Bild 43 zeigt eine typische Bruchoberfläche einer Dünnbettmörtel-Nullprobe in 1000-facher (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts) nach einer Abbindezeit von genau 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre. Es sind sowohl Ettringit-Nadeln, C-S-H-Phasen, als auch Portlandit als Hydratationsprodukte erkennbar.

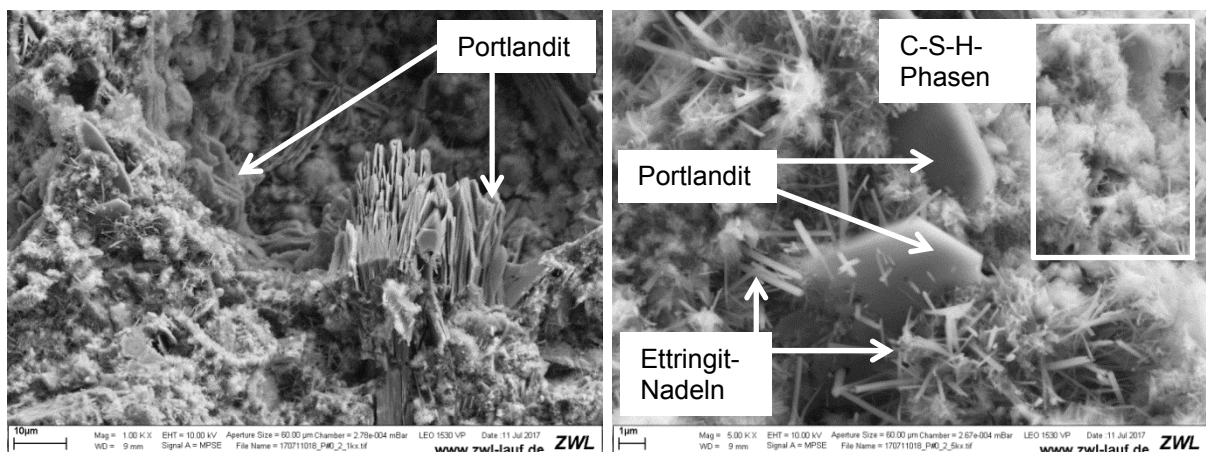


Bild 43: REM-Aufnahmen der Bruchoberfläche einer typischen Dünnbettmörtel-Nullprobe in 1000-facher (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts) nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

Im Falle der Dünnbettmörtel-Nullprobe (Bild 43, rechts) ist nadeliger Ettringit neben hexagonalen Portlandit-Tafeln erkennbar. Die sehr feinen Ettringit-Nadeln erreichen

dabei eine Länge von etwa 1 bis 3 μm und sind mit den C-S-H-Phasen und dem Portlandit vergesellschaftet. Die Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure zeigt eine vergleichsweise dichte Matrix und wirkt dadurch sehr kompakt (Bild 44). Auch hier lassen sich eingebettete Schaumglaskugeln erkennen.

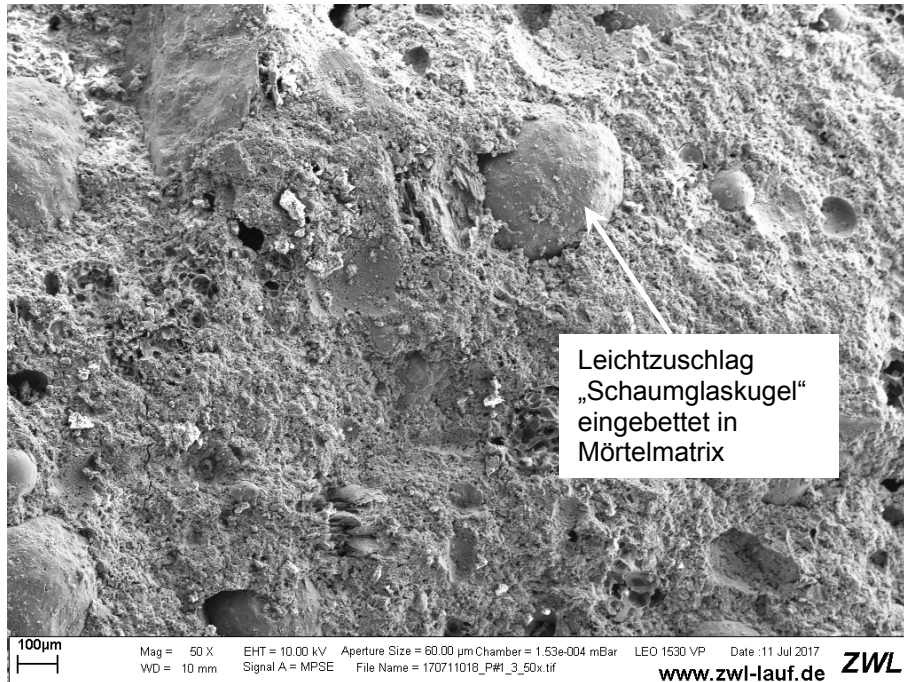


Bild 44: REM-Aufnahme der Bruchfläche einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure in 50-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

Im Falle der 1000-fachen Vergrößerung der kieselsäurehaltigen Probe (Bild 45) ist kein Portlandit zu erkennen, jedoch breitflächig-verteilte C-S-H-Phasen, die aus der puzzolanischen Reaktion des Portlandits mit der pyrogenen Kieselsäure resultieren. Die REM-Aufnahme bei 5000-facher Vergrößerung (rechts) zeigt einen dichten „Rasen“ aus zusätzlich entstandenen, festigkeitssteigernden C-S-H-Phasen, die mit Etringit-Nadeln verwachsen sind. Die Bildung der zusätzlichen C-S-H-Phasen kann auf die puzzolanische Reaktion zwischen dem Portlandit und dem amorphen Siliziumdioxid der pyrogenen Kieselsäure (Formel 1) zurückgeführt werden.

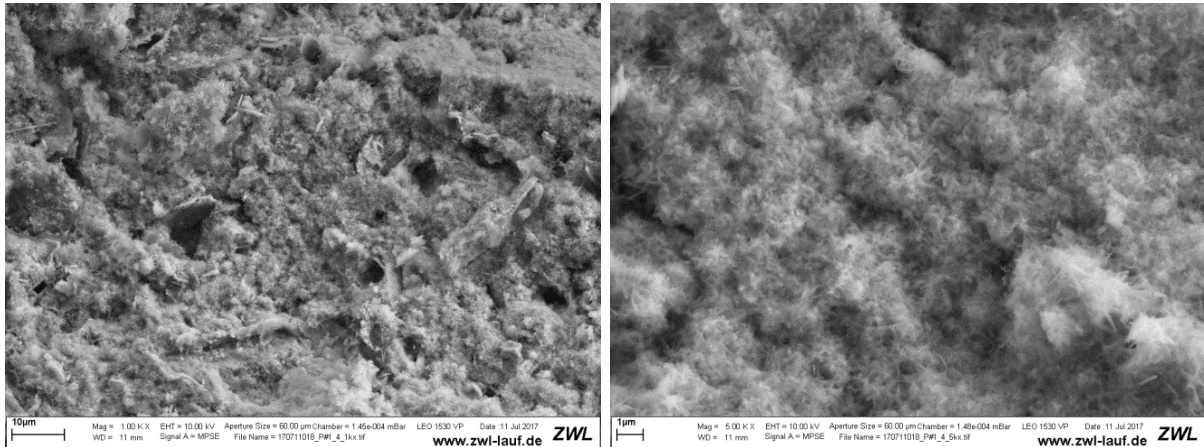


Bild 45: REM-Aufnahme der Bruchoberfläche einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure in 1000-facher (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts) nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

Die Bruchfläche der perlithaltigen Probe (Bild 46) besitzt im Vergleich zur Nullprobe (Bild 41) ebenfalls eine dichtere Matrix mit kleineren Porengrößen.

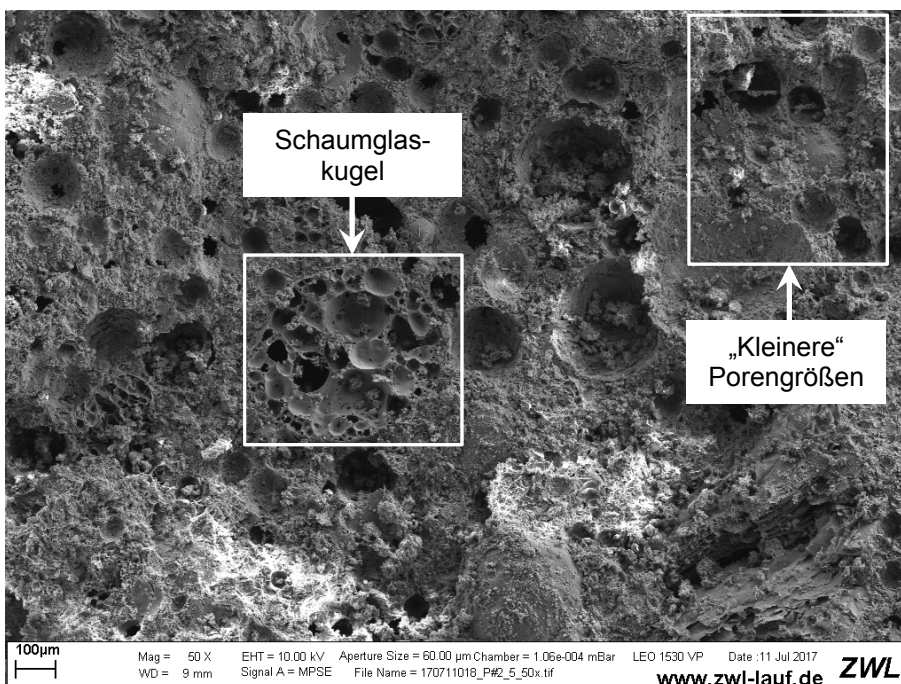


Bild 46: REM-Aufnahme der Bruchfläche einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit in 50-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

Im Falle der perlithaltigen Probe sind in der Bruchoberfläche u. a. Portlandit und nur vereinzelte C-S-H-Phasen vorhanden (Bild 47). Daraus kann geschlossen werden, dass die puzzolanische Reaktion zwischen dem expandierten Perlit und dem Port-

landit hier in einem sehr viel schwächeren Ausmaß stattgefunden hat, als bei der kieselsäurehaltigen Probe (Bild 45).

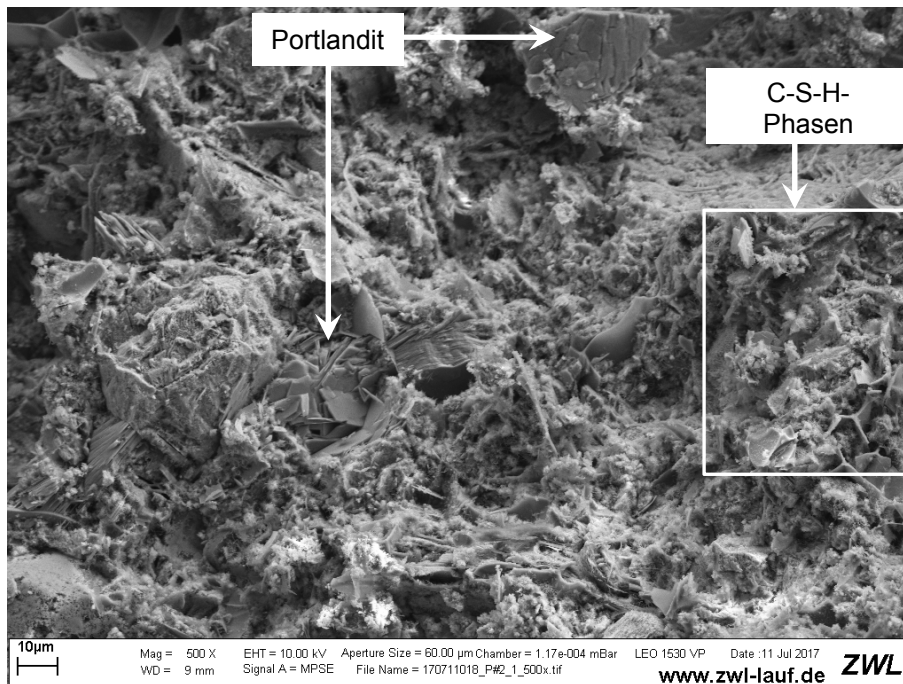


Bild 47: REM-Aufnahme der Bruchfläche einer Dünnbettmörtel-Probeprobe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit in 500-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre

4.5 Untersuchungen der Zementhydratation

Um eine Aussage über die Reaktionskinetik und Gefügeentwicklung der favorisierten Dünnbettmörtel-Mischungen aus Kapitel 4.4 (Tabelle 24 und 27) treffen zu können, wurden diese hinsichtlich ihres Abbindeverhaltens untersucht. Darüber hinaus erfolgte die Bestimmung der Erstarrungszeiten jeweils im Vergleich mit der Dünnbettmörtel-Nullprobe. Die untersuchten Dünnbettmörtel wurden in Laborluft-Atmosphäre abgebunden.

4.5.1 Isotherme Wärmeflusskalorimetrie

Die Dünnbettmörtel-Nullprobe sowie die durch Zusatzstoffe modifizierten Dünnbettmörtel-Probepben zeigen durchwegs eine relativ geringe Wärmeentwicklung zwischen 147 und 220 J/g über 72 Stunden Hydratationszeit (Bild 48, Tabelle 30). Die Kurvenverläufe der Proben mit Zugaben von 10 Vol.-% expandiertem Perlit und 10 Vol.-% expandiertem Alumosilikat der Sorte III sind weitgehend vergleichbar und verlaufen unterhalb der Kurve der Nullprobe. Sie zeigen auffällig niedrige Wärmemengen im

Bereich der „Beschleunigung“ (3) sowie unterschiedlich ausgeprägte „Schultern“ innerhalb der Abklingperiode (4) (etwa 15 bis 30 h). Die Kurven der beiden Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat der Sorte III verfügen jeweils über vergleichsweise starke Wärmeflussmaxima (Kohäsionspunkte) zu Beginn der Abklingperiode (4), welche sich auf die Dosierung von je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure zurückführen lassen. Darüber hinaus bewirkt die pyrogene Kieselsäure jeweils einen frühzeitigen Erstarrungsbeginn nach 2,5 Stunden. Bei der Nullprobe setzt dieser nach 7,5 Stunden ein.

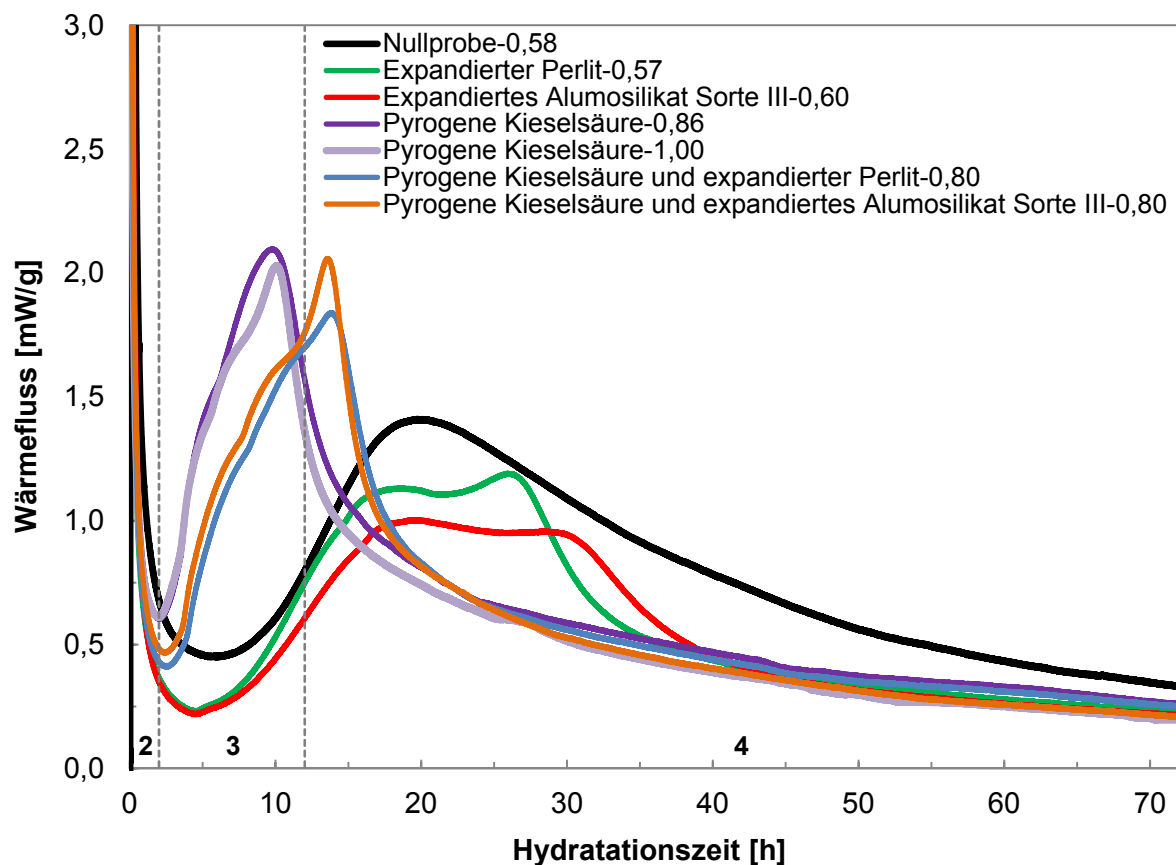


Bild 48: Kalorigramme modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit bzw. 10 Vol.-% expandiertem Aluminosilikat Sorte III bzw. 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure; außerdem mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III in Kombination bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen, in Abhängigkeit von der Hydratationszeit, im Vergleich mit der Nullprobe

Während der Induktions- und Startperiode (2) setzt die Dünnbettmörtel-Nullprobe mit 20,3 bzw. 9,0 J/g die im Vergleich größten Wärmemengen frei (Tabelle 30; Spalte 4/5). Die durch Zusatzstoff modifizierten Dünnbettmörtel-Proben produzieren wäh-

rend diesen Reaktionsphasen deutlich niedrigere Wärmemengen. Die beiden mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure modifizierten Proben und den w/m-Verhältnissen von 0,86 sowie 1,00 weisen während der Beschleunigungsperiode (3) die höchsten Wärmeflussmaxima (Bild 48) auf. Außerdem verfügen sie mit 56,3 bzw. 53,3 J/g (Tabelle 30) über die größten freigesetzten Wärmemengen innerhalb dieser Phase, da es hier zur Reaktion der pyrogenen Kieselsäure mit dem Calciumhydroxid der Nullprobe (Puzzolanität) sowie einer verstärkten Keimbildung von C-S-H-Phasen kommt. Der Erstarrungsbeginn beider Mischungen setzt bereits nach 2 Stunden ein. Im Bereich der Abklingperiode zeigen beide Proben zudem sehr schwach ausgeprägte Nebenmaxima zwischen 25 und 30 h bzw. 40 und 45 h.

Tabelle 30: Reaktionsphasen der Zementhydratation modifizierter Dünnbett-Frischmörtel-Proben mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit bzw. 10 Vol.-% expandiertem Alumosilikat Sorte III bzw. 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure mit unterschiedlichen w/m-Verhältnissen; außerdem mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III in Kombination in Abhängigkeit von der Hydratationszeit, im Vergleich mit der Nullprobe

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosie- rung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Reaktionsphasen				Gesamt- zeit bis 72 h
			Anteilige Reaktionszeit				
			1. „Start“ bis 15 Min.	2. „Induk- tion“ bis 120 Min.	3. „Beschleu- nigung“ bis 12 h	4. „Ab- klingen“ bis 72 h	
			Wärmemenge [J/g]				
Dünnbettmörtel	Null- probe	0,58	20,3	9,0	19,6	171,6	220
Expandierter Perlit	10	0,57	4,2	4,3	13,8	125,0	147
Expandiertes Alumosilikat Sorte III		0,60	4,7	5,0	12,1	118,2	140
Pyrogene Kieselsäure		0,86	10,7	5,6	56,3	113,8	186
Pyrogene Kieselsäure		1,00	11,8	5,3	53,3	96,9	167
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit	5 + 5	0,80	6,1	4,7	39,4	118,6	169
Pyrogene Kiesel- säure und expan- diertes Alumosili- kat Sorte III	5 + 5	0,80	4,0	5,1	42,7	111,8	164

4.5.2 Messung der Erstarrungszeiten

Mit Hilfe der Vicat-Methode war es möglich die Erstarrungszeiten (Beginn und Ende) der Dünnbettmörtel-Mischungen zu untersuchen. Der Erstarrungsbeginn der Dünnbettmörtel-Nullprobe erfolgt nach 15 h und endet nach 19,5 h. Für das Abbinden benötigt die Nullprobe demnach 4,5 h (Bild 49, Tabelle 31).

Tabelle 31: Erstarrungszeiten optimierter Dünnbett-Frischmörtel-Mischungen im Vergleich zur Nullprobe bestimmt nach der Vicat-Methode

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Erstarrungszeiten		
			Beginn	Ende	Gesamtzeit
[h:min:sec]					
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	14:53:15	19:27:00	04:33:45
Expandierter Perlit	10	0,57	07:10:26	12:09:11	04:58:45
Expandiertes Aluminosilikat Sorte III		0,60	14:33:39	18:51:27	04:18:28
Pyrogene Kieselsäure		0,86	04:59:41	09:10:47	04:11:06
Pyrogene Kieselsäure		1,00	05:52:30	09:54:36	04:02:06
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit	5 + 5	0,80	06:27:21	10:02:37	03:35:16
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Aluminosilikat Sorte III	5 + 5	0,80	06:28:22	09:51:25	03:23:03

Der solitäre Einbau bzw. die kombinierte Dosierung von Zusatzstoffen hat eine Veränderung der Erstarrungszeiten zur Folge. Im Falle der perlithaltigen Probe (10 Vol.-%) und den beiden Kombinationsmischungen aus pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie der pyrogenen Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat der Sorte III resultiert eine Beschleunigung des Erstarrungsbeginns um 8 bzw. jeweils 8,5 h. Die Perlit-haltige Probe (10 Vol.-%) bleibt dabei im Vergleich zur Nullprobe mit 5 h am längsten verarbeitbar (Gesamtzeit). Die beiden Kombinationsmischungen verfügen mit jeweils 3,5 h über die kürzeste Verarbeitungszeit. Im direkten Vergleich mit der Nullprobe zeigt nur die Mischung mit 10 Vol.-% expandiertem Aluminosilikat der Sorte III ähnliche Reaktionszeiten. Das expandierte Aluminosilikat bewirkt lediglich eine Beschleunigung des Erstarrungsbeginns um 20 Minuten und verkürzt die Verarbeitungszeit um 15 Minuten (Bild 49, Tabelle 31).

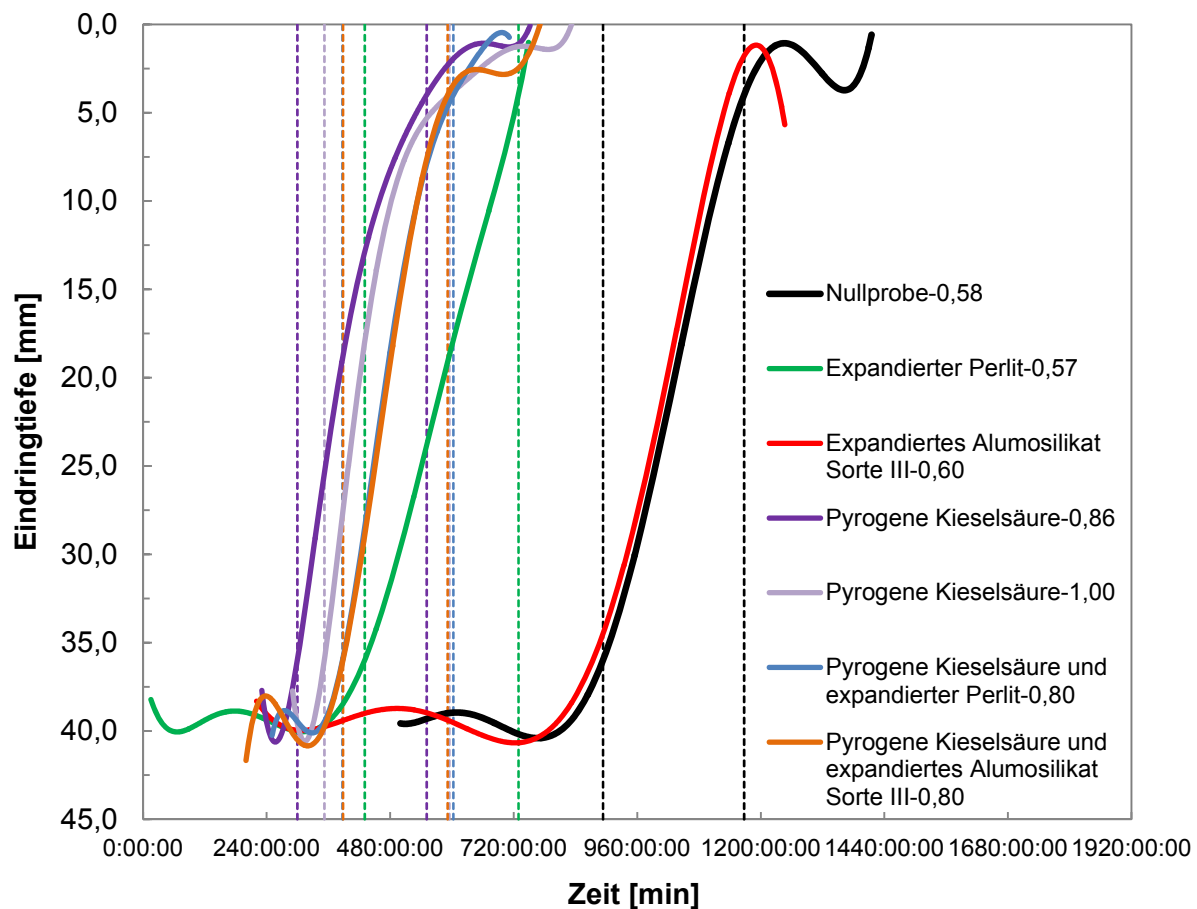


Bild 49: Eindringtiefen der Vicat-Nadel in Abhängigkeit von der Erstarrungszeit modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit, 10 Vol.-% expandiertem Aluminosilikat Sorte III und 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen; außerdem mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III in Kombination, im Vergleich mit der Nullprobe

Durch Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure mit den w/m-Verhältnissen 0,86 bzw. 1,00 wird der Erstarrungsbeginn um 10 bzw. 9 Stunden beschleunigt sowie die gesamte Abbindezeit um 10 bis 30 Minuten verkürzt. Der Zusatzstoff pyrogene Kieselsäure (10 Vol.-%) hat folglich keinen negativen Einfluss auf das Abbindeverhalten der Dünnbettmörtel-Mischung.

4.6 Finite-Elemente Berechnungen unterschiedlicher Wandaufbauten

Um die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äquiv}}$ monolithischer Wandausschnitte mit zugehörigen Mörtel-Fugen abzuschätzen, wurden für insgesamt drei in der Scherben-Wärmeleitfähigkeit variierende Hochlochziegel mit jeweils gleichem Lochmuster sowie zwei unterschiedlichen Füllmaterialien (Perlit $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und Calostat® $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,019 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) FE-Berechnungen durchgeführt und miteinander ver-

glichen (Tabelle 32). Die Berechnungen erfolgten sowohl für eine Dünnbettmörtel-Fuge mit einer Höhe von 3 mm, als auch für eine Dickbettmörtel-Fuge mit einer Höhe von 12 mm. Die Wärmeleitfähigkeiten wurden dabei wie folgt angenommen:

Dünnbettmörtel (Nullprobe): $\lambda_{10, tr.} = 0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; w/m-Verhältnis 0,58

Dünnbettmörtel mit 10 Vol.-% pyr. SiO₂: $\lambda_{10, tr.} = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; w/m-Verhältnis 1,00

Tabelle 32: Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.}$ von Hochlochziegeln sowie äquivalente Wärmeleitfähigkeiten von Wandausschnitten unterschiedlich verfüllter Ziegel mit unterschiedlichen Höhen der Mörtel-Fugen

Wand- baustoff	Scherben- Wärmeleit- fähigkeit $\lambda_{10, tr.}$ [W/(m·K)]	Äquivalente Wärmeleitfähigkeit							
		Wandausschnitt							
		Perlit + Dünnbettmörtel 3 mm mit $\lambda_{10, tr.} 0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	Calostat® + Dickbettmörtel 12 mm	Perlit + Dünnbettmörtel 3 mm mit $\lambda_{10, tr.} 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	Calostat® + Dickbettmörtel 12 mm	$\lambda_{\text{äquiv.}}$ [W/(m·K)]			
Hochloch- ziegel Sorte I	0,20	0,0708	0,0474	0,0757	0,0532	0,0701	0,0466	0,0729	0,0504
Hochloch- ziegel Sorte II	0,25	0,0771	0,0530	0,0818	0,0587	0,0763	0,0522	0,0790	0,0559
Hochloch- ziegel Sorte III	0,30	0,0831	0,0585	0,0877	0,0640	0,0823	0,0576	0,0849	0,0612

Aus Tabelle 32 wird ersichtlich, dass das Ziegel-Verfüllmaterial Perlit gegenüber Calostat® für jede Hochlochziegel-Sorte höhere äquivalente Wärmeleitfähigkeiten zur Folge hat. Vergleicht man die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der Wandausschnitte mit Dünnbettmörtel- bzw. Dickbettmörtel-Fugen so lässt sich feststellen, dass diese im Falle der Dickbettmörtel-Fugen jeweils höher liegen. Bild 50 zeigt die prozentualen Verbesserungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten für die Ausführungsbeispiele aus Tabelle 32. Hierfür ist die jeweilige Verbesserung in Abhängigkeit von der Mörtel-Fuge mit $\lambda_{10, tr.} = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ gegenüber dem Ausgangswert $\lambda_{10, tr.} = 0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ dargestellt. Durch Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure zum Dünnbettmörtel und einem w/m-Verhältnis von 1,00 resultiert, unter Einhaltung der Druckfestigkeitsklasse M 10, eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtel-

Systems von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ auf $0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um 29 %. Diese Minderung führt im Falle der Ausführung einer Dünnbettmörtel-Fuge in einer Wand (Tabelle 32) zu einer Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit eines Wandausschnitts zwischen 1,0 und 1,7 % (Bild 50). Erhöht man die Fugenstärke von Dünnbett- auf Dickbett-Fuge so resultiert eine Verbesserung zwischen 3,2 und 5,2 %.

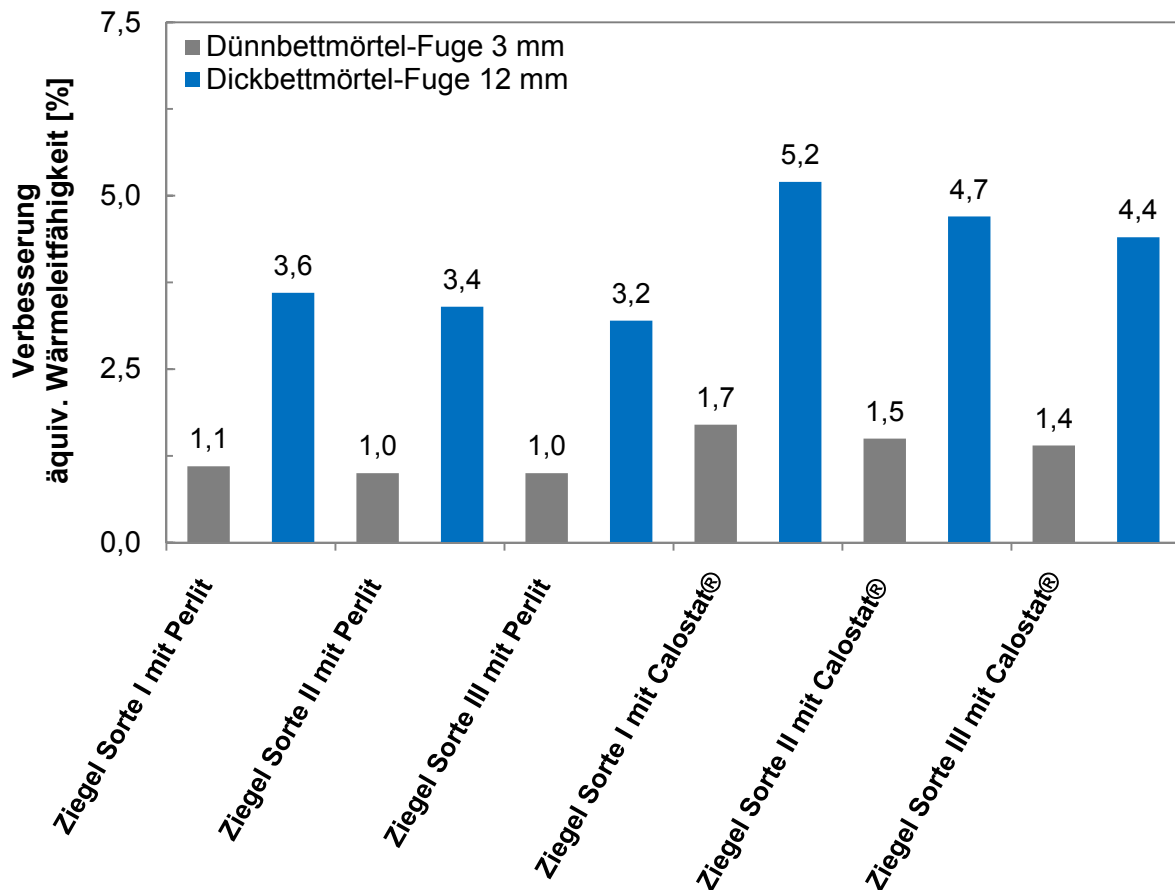


Bild 50: Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit eines Wandausschnitts in Abhängigkeit von der Hochlochziegel-Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichem Verfüllmaterial und einer Dünnbettmörtel-Fugenhöhe von 3 mm im Vergleich mit einer Dickbettmörtel-Fugenhöhe von 12 mm

Bild 51 zeigt die mittels FEM berechneten Isothermen eines Modell-Hochlochziegels mit zusätzlicher Mörtelfuge auf Ober- und Unterseite. Außerdem ist der Temperaturgradient zwischen Innen- und Außenseite der Wand dargestellt.

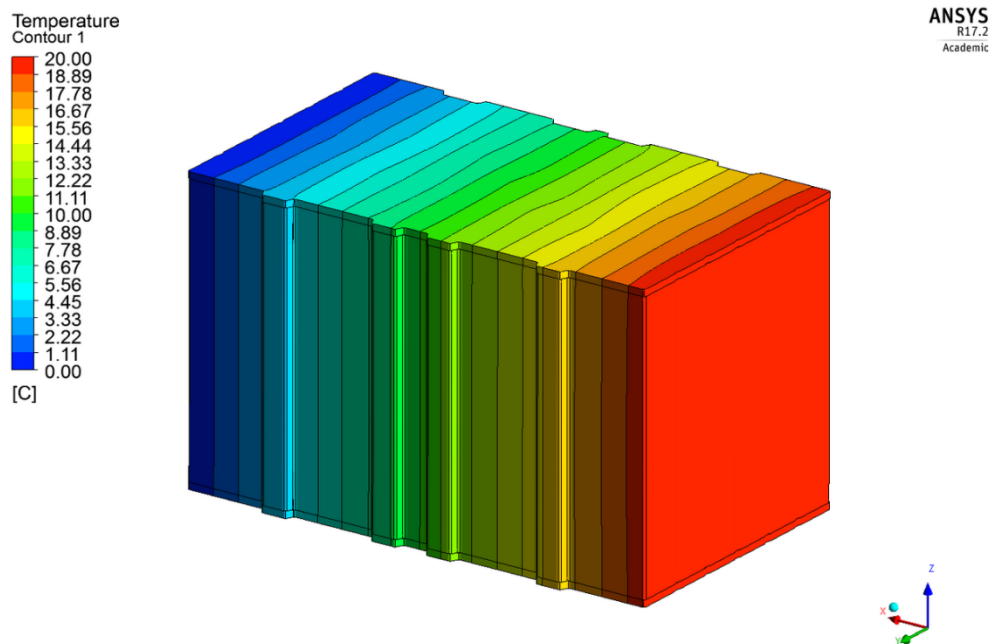


Bild 51: Isothermen eines Modell-Hochlochziegels mit zusätzlicher Dünnbettmörtelfuge mit einer Höhe von 1,5 mm in den Lagerfugen ($2 \times 1,5 \text{ mm} = 3 \text{ mm}$)

4.7 Anwendung der Ergebnisse auf einen Sockelputz

In weiteren Versuchen wurde geprüft, ob sich der durch Zugabe von pyrogener Kieselsäure zu Dünnbettmörtel ermittelte Effekt der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Druckfestigkeit auch auf andere zementhaltige Bindebaustoffe übertragen lässt. Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte an einem typischen Sockelputz der Festigkeitsklasse CS IV eines namhaften Herstellers.

Ergebnisse:

Die anteilige Substitution von Grobanteilen $\geq 125 \mu\text{m}$ des Sockelputzes durch pyrogene Kieselsäure führt zu einer Minderung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ und gleichzeitig zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit. Die Hydratationszeit betrug 28 Tage in Laborluft-Atmosphäre. Durch Zugabe von 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure wurde die Wärmeleitfähigkeit der Nullprobe von $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,45$ auf $0,32 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ um 28,8 % vermindert. Die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit ist mit einer Zunahme des Porenvolumens um 377 % im Bereich der Mesoporen zwischen 50 bis 2 nm erklärbar. Gleichzeitig erfolgt eine Anhebung der Druckfestigkeit von $\beta_D = 10,0$ auf $14,9 \text{ MPa}$ um 49 %. Eine Porengrößen-Verteilung im Bereich von 1000 bis 100 nm sowie Porengrößen kleiner 50 nm bewirken eine wärmetechnische Optimierung des Putzmörtels ohne die Druckfestigkeit abzusenken. Aus der Berechnung der Porenvolumen-Verhältnisse aus Mesoporen-Volumina kleiner 50 nm und den Makroporen-Volumina

im Bereich zwischen 1000 bis 100 nm, ergibt sich der eindeutige Zusammenhang: je höher das Porenvolumen-Verhältnis, desto erfolgreicher wird die Wärmeleitfähigkeit abgesenkt. Dabei bleibt die Druckfestigkeit konstant bzw. erhöht sich sogar in diesem Fall. Durch Röntgenanalysen (XRD) war es möglich, den druckfestigkeitssteigernden Effekt auf den aus der Literatur bekannten „Portlandit-Abbau“ zurückzuführen. Hierbei kommt es zu einer puzzolanischen Reaktion zwischen dem Portlandit und der pyrogenen Kieselsäure unter Ausbildung zusätzlicher druckfestigkeitserhöhender C-S-H-Phasen. Mit der Durchführung thermogravimetrischer Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei Vorhandensein von pyrogener Kieselsäure im Putzmörtel ein Portlandit-Abbau um 82 % im Vergleich zur Putzmörtel-Nullprobe erfolgt.

Damit wurde die Wirksamkeit des in dieser Arbeit für Dünnbettmörtel bei Zugabe von pyrogener Kieselsäure ermittelten Effektes, nämlich der Absenkung der Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender bzw. sogar verbesserter Druckfestigkeit, auch an einem weiteren zementhaltigen Bindebaustoff, dem Sockelputz nachgewiesen. Aufgrund des umfangreichen Datenmaterials, analog der hier präsentierten Dünnbettmörtel-Optimierung, wird auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet und stattdessen auf die zugehörige Publikation (Schmidt, et al., 2018a) verwiesen.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zur Minderung der Wärmeleitfähigkeit eines Dünnbettmörtels bei gleichbleibender bzw. sogar gesteigerter Druckfestigkeit durchgeführt. Als Ausgangspunkt (Nullprobe) diente ein Dünnbettmörtel mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, tr.} = 0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Das Hauptziel dieser Arbeit bestand darin, die Wärmeleitfähigkeit so weit wie möglich abzusenken, jedoch stets unter Einhaltung der Druckfestigkeitsklasse M 10 ($\beta_D \geq 10,0 \text{ MPa}$ nach 28 Tagen). Die Einhaltung der Druckfestigkeit ist von besonderer Bedeutung, da die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.}$ durch Dosierung „leichter“ Zusatzstoffe stets zu einer Absenkung der Druckfestigkeit führt. Die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit wird durch Dosierung spezieller Zusatzstoffe bewirkt. Monolithisch aufgebaute Wände, die mit einem entsprechend modifizierten Dünnbettmörtel mit einer Fugenstärke von 3 mm bzw. mit einem entsprechend modifizierten Dickbettmörtel mit einer Fugenstärke von 12 mm errichtet werden, zeichnen sich durch eine um 1,0 bis 1,7 % bzw. 3,2 bis 5,2 % verbesserte Wärmedämmung aus.

Zusatzstoff-Screening ohne Stoffraumrechnung (Vorversuche)

Durch ein erstes Zusatzstoff-Screening war es möglich die Wirkungsweise von insgesamt 20 ausgewählten Zusatzstoffen auf den verwendeten Dünnbettmörtel zu untersuchen. Die Auswahl begrenzte sich dabei primär auf anorganische Materialien, wobei mit den Dralon-Kurzschnittfasern und den Polypropylen-Spleissfasern auch zwei Kohlenwasserstoff-haltige Zusatzstoffe in das Screening integriert wurden. Bei diesen Vorversuchen wurde hauptsächlich die Veränderung der beiden werkstoff-technischen Parameter Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr.}$ und Druckfestigkeit nach einer Abbindezeit von 28 Tagen untersucht. Für die Herstellung der Dünnbettmörtel-Mischungen wurde das Mischungsverhältnis von Dünnbettmörtel und Zusatzstoff über die Schüttdichten berechnet. Das jeweils eingestellte w/m-Verhältnis orientierte sich an der Nullprobe und blieb vorerst unverändert. Die variierende Substitution der Zusatzstoffe zwischen 5 bis 20 Vol.-% bewirkte keine bzw. nur geringe Absenkung der Wärmeleitfähigkeit, aber in fast allen Fällen eine geringfügige bis deutliche Erhöhung der Druckfestigkeit. Da bei der Berechnung der Mörtel/Zusatzstoff-Verhältnisse weder das Volumen des Wassers, noch das Volumen der im Frischmörtel enthaltenen Luft berücksichtigt wurde und darüber hinaus das w/m-Verhältnis unverändert blieb, wurden im nächsten Schritt optimierte Dünnbettmörtel-Mischungen durch Anwendung einer Stoffraumrechnung hergestellt. Dazu war es notwendig eine Siebana-lyse der Fein- und Grobanteile in der Mörtelmischung, die Bestimmung der Feststoff-dichten der Siebrückstände und der Zusatzstoffe sowie die Bestimmung des Luftgehalts der Dünnbett-Frischmörtel-Nullproben durchzuführen. Dadurch war es möglich, eine aus den Einzelfractionen exakt zusammengesetzte Dünnbettmörtel-Nullprobe sowie modifizierte Proben herzustellen.

Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Die Charakterisierung der Ausgangsmaterialien erfolgte zunächst mit Hilfe der Auflichtmikroskopie, um einen ersten Eindruck über Struktur und Korn- bzw. Faserform zu erhalten. Im Anschluss wurde die Korngrößenanalyse der pulverförmigen Zusatzstoffe mittels Laserbeugung im Nassdispergier-Verfahren durchgeführt. Die Bestimmung der Feststoffdichten erfolgte mittels Helium-Gaspyknometrie, wodurch auch kleinste Poren bis in den 0,1 nm-Bereich zugänglich wurden. Die spezifischen Oberflächen der Ausgangsstoffe wurden standardmäßig durch Stickstoffadsorption nach der BET-Methode ermittelt. Bei dem ungesiebten, trockenen Dünnbettmörtel-Pulver

(Nullprobe) wurde ein d_{50} -Wert von 31,14 μm , eine Feststoffdichte von 2,27 g/cm^3 und eine spezifische Oberfläche von 1,60 m^2/g festgestellt. Im Vergleich dazu zeichnet sich der expandierte Perlit durch eine Korngröße von 25,65 μm , eine Feststoffdichte von 2,20 g/cm^3 und eine BET-Oberfläche von 2,92 m^2/g aus. Die pyrogene Kieselsäure verfügt mit 181,68 m^2/g über eine vergleichsweise sehr große BET-Oberfläche sowie mit 10,06 μm über einen sehr niedrigen d_{50} -Wert; die Feststoffdichte wurde mit 1,96 g/cm^3 bestimmt. Die XRF- sowie XRD- Analysen des ungesiebten Dünnbettmörtel-Trockenpulvers zeigen die typischen Hauptbestandteile eines Zementklinkers. Von besonderem Interesse sind hierbei die XRF-Analysen der Siebfractionen. Im Falle der pyrogenen Kieselsäure besteht diese zu fast 100 Ma.-% aus amorphem Siliziumdioxid, die über eine vergleichsweise erhöhte Reaktivität verfügt. In den XRD-Analysen von pygener Kieselsäure, expandiertem Perlit und expandiertem Alumosilikat der Sorte III ist im XRD-Diagramm im Bereich zwischen 15 bis 35 $^{\circ}2\theta$ eine deutliche Anhebung des Untergrunds erkennbar (röntgenamorpher Anteil).

Die Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie der drei genannten Zusatzstoffe bestätigt die besonderen Eigenschaften der pyrogenen Kieselsäure, da diese mit 14,70 cm^3/g das vergleichsweise höchste Porenvolumen der drei eingesetzten Zusatzstoffe besitzt. Die pyrogene Kieselsäure zeigt außerdem einen markanten Porendurchmesser von $d_p = 25$ nm im Bereich der Mesoporen sowie einen hohen Anteil an Poren mit einem Durchmesser größer 4 μm . Die breite Verteilung der Porendurchmesser ist aufgrund von Kieselsäure-Agglomeraten unterschiedlicher Größe nachvollziehbar. Der expandierte Perlit sowie das expandierte Alumosilikat der Sorte III verfügen dagegen praktisch über keine bzw. nur sehr wenige Mesoporen.

Zusatzstoff-Screening mit Stoffraumrechnung – Teil I

Die vorgestellten Arbeiten zeigen, dass durch geeignete Zugabe ausgewählter Zusatzstoffe sowohl eine wärmetechnische, als auch eine festigkeitssteigernde Optimierung von Dünnbettmörtel möglich ist. Durch Anwendung der Stoffraumrechnung mit gezielter Substitution von Mörtel-Grobanteilen ≥ 125 μm mit 10 Vol.-% pygener Kieselsäure, konnte die Wärmeleitfähigkeit der Nullprobe von zunächst $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21$ auf 0,17 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um 19 % vermindert werden. Gleichzeitig wurde die Festigkeit von 10,3 auf 11,9 MPa um 15,5 % erhöht. Dieser Effekt ist auf die puzzolanische Reaktivität der pyrogenen Kieselsäure mit Portlandit zurückzuführen. Durch XRD-Analysen

war es möglich, den Portlandit-Abbau bei Zugabe von pyrogener Kieselsäure qualitativ nachzuweisen; die zugehörigen Portlandit-Intensitäten liegen unterhalb der Intensitäten der Nullprobe und nehmen im Hydratationszeitraum ab. Mittels thermogravimetrischer Untersuchungen wurde quantitativ ermittelt, dass im Verlauf einer Abbindezeit von 28 Tagen ein Portlandit-Abbau um 55 % stattgefunden hat. Die angefertigten REM-Aufnahmen bestätigen die Ergebnisse aus der XRD- und TG-Analyse. Auf den Bruchoberflächen der kieselsäurehaltigen Dünnbettmörtel-Proben konnte kein Portlandit nachgewiesen werden. Die durch Zugabe von pyrogener Kieselsäure herbeigeführte Minderung der Wärmeleitfähigkeit ist mit einer Zunahme des Porenvolumens um 244 % im Porengrößenbereich zwischen 50 bis 2 nm erklärbar.

Durch Zugabe von 10 Vol.-% expandiertem Perlit kann die 28 Tage-Druckfestigkeit im Vergleich zur Nullprobe von 10,3 auf 20,5 MPa um 99 % erhöht werden. Dieser Effekt ist auf das vergleichsweise niedrigere w/m-Verhältnis von 0,57 zurückzuführen sowie auf die niedrigere Dünnbettmörtel-Porosität von 49,4 %. Von besonderem Interesse ist außerdem der nahezu gleiche Medianwert der Poren mit etwa 0,3 μm in den perlit- und kieselsäurehaltigen Dünnbettmörtel-Proben.

Die Zugabe von expandiertem Alumosilikat der Sorte III bewirkt eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtels von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21$ auf 0,18 W/(m·K). Im Vergleich zur kieselsäurehaltigen Dünnbettmörtel-Probe lässt sich hier keine Zunahme des Porenvolumens im Mesoporen-Bereich, sondern ein gleichbleibendes Porenvolumen im Bereich größer 4 μm bis zur Messobergrenze von 210 μm ermitteln.

Zusatzstoff-Versuchsreihen mit Stoffraumrechnung – Teil II

Die gezielte Substitution von Mörtel-Grobanteilen mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und einem w/m-Verhältnis von 1,00 bewirkt eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr.}} = 0,21$ auf 0,15 W/(m·K) um 28,6 %. Diese Absenkung kann mit einer Zunahme des Porenvolumens um 626 % im Bereich der Mesoporen zwischen 50 bis 2 nm erklärt werden. Gleichzeitig lagen die gemessenen Druckfestigkeiten der modifizierten Proben in der gewünschten Druckfestigkeitsklasse M 10. Dieser Effekt ist ungewöhnlich und lässt sich auf die puzzolanische Reaktivität der pyrogenen Kieselsäure mit Portlandit unter zusätzlicher Bildung von C-S-H-Phasen zurückführen. Mittels Röntgenanalysen (XRD) wurde qualitativ nachgewiesen, dass die Portlandit-Intensitäten bei Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure über den gesamten

Hydratationszeitraum in Laborluft-Atmosphäre zeitlich abnehmend sowie niedriger liegen, als bei der Nullprobe ohne Zugabe von pyrogener Kieselsäure. Mit TG-Untersuchungen wurde ein Portlandit-Gehalt in der Dünnbettmörtel-Nullprobe von 10,28 Ma.-% ermittelt. Die Dosierung von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure führt zu einer puzzolanischen Reaktion mit Portlandit-Abbau von 10,28 auf 8,02 Ma.-%, entsprechend um 22 %. Die angefertigten REM-Aufnahmen bestätigen die Ergebnisse aus den Röntgen- (XRD) und TG-Analysen. Um das Abbindeverhalten modifizierter Dünnbettmörtel-Proben genauer zu verstehen, wurde dieses sowohl in Laborluft-Atmosphäre, als auch unter CO₂-Ausschluss zeitlich erfasst. Der Portlandit-Abbau erfolgt unter CO₂-Ausschluss vergleichsweise sehr viel stärker als in Laborluft-Atmosphäre. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass unter CO₂-Ausschluss und einer relativen Luftfeuchtigkeit von annähernd 100 % eine vollständige Hydratation sowie ungestörte puzzolanische Reaktion der pyrogenen Kieselsäure mit Portlandit abläuft. In normaler Laborluft-Atmosphäre und einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 60 % erfolgt dagegen eine unvollständige Hydratation bzw. gestörte puzzolanische Reaktion durch Carbonatisierung des Portlandits als Parallelreaktion. Diese verläuft für alle Dünnbettmörtel-Proben unter CO₂-Ausschluss vergleichsweise schwach sowie zeitlich abnehmend. In Laborluft-Atmosphäre zeigt sich das genaue Gegenteil, nämlich eine vergleichsweise erhöhte Carbonatbildung in Abhängigkeit von der Zeit.

Bei anteiliger Substitution des Dünnbettmörtel-Grobanteils über 125 µm durch eine Zusatzstoff-Kombination aus jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit resultiert eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtels von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ auf $0,19$ W/(m·K) um 9,5 %. Auch hier lässt sich die Absenkung der Wärmeleitfähigkeit durch Zunahme des Mesoporen-Volumens um 204 % erklären. Die Druckfestigkeit lag allerdings nicht in der gewünschten Druckfestigkeitsklasse M 10.

Die Zusatzstoff-Kombination aus jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat führt ebenfalls zu einer wärmetechnischen Optimierung des Dünnbettmörtels von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ auf $0,18$ W/(m·K) um 14,3 %. Der Effekt ist auf eine Erhöhung des Mesoporen-Volumens um 291 % durch Zugabe der pyrogenen Kieselsäure zurückzuführen. Der so modifizierte Dünnbettmörtel erfüllt ebenfalls die Druckfestigkeitsklasse M 10. Aus der Berechnung der Porenvolumen-Verhältnisse aus Mesoporen-Volumina kleiner 50 nm und den Makroporen-Volumina im Bereich

zwischen 1000 bis 100 nm, ergibt sich der eindeutige Zusammenhang: je höher das Porenvolumen-Verhältnis, desto erfolgreicher wird die Wärmeleitfähigkeit abgesenkt.

Untersuchungen der Zementhydratation

Die Dünnbettmörtel-Nullprobe mit dem w/m-Verhältnis von 0,58 setzt während der Beschleunigungsperiode eine Wärmemenge von 19,6 J/g frei. Die beiden kieselsäurehaltigen Dünnbettmörtel-Proben mit den w/m-Verhältnissen von 0,86 und 1,00 weisen während der Beschleunigungsperiode die höchsten Wärmeflussmaxima auf und verfügen mit 56,3 bzw. 53,3 J/g über die im Vergleich größten freigesetzten Wärmemengen innerhalb dieser Phase. Dieses Verhalten ist nachvollziehbar, da es in der Beschleunigungsperiode zur Reaktion der pyrogenen Kieselsäure (Puzzolanität) mit dem Calciumhydroxid sowie einer verstärkten Keimbildung von C-S-H-Phasen kommt. Die Bildung stabiler C-S-H-Phasen aus Portlandit und pyrogener Kieselsäure bewirken den deutlichen Anstieg des Wärmeflusses.

Der Erstarrungsbeginn der Dünnbettmörtel-Nullprobe wurde mittels Vicat-Methode nach 15 h festgestellt und endet nach 19,5 h. Für das Abbinden benötigt die Nullprobe demnach 4,5 h. Durch Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure mit den w/m-Verhältnissen 0,86 bzw. 1,00 wird der Erstarrungsbeginn um etwa 10 h beschleunigt sowie die gesamte Abbindezeit um etwa 30 Minuten verkürzt. Der Zusatzstoff pyrogene Kieselsäure (10 Vol.-%) hat folglich keinen negativen Einfluss auf das Abbinden der Dünnbettmörtel-Mischung.

Finite-Elemente Berechnungen unterschiedlicher Wandaufbauten

Die Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure (w/m-Verhältnis 1,00) bewirkt eine Minderung der Wärmeleitfähigkeit des Dünnbettmörtel-Systems von $\lambda_{10, tr.} = 0,21$ auf $0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ um 29 % unter Einhaltung der Druckfestigkeitsklasse M 10. Diese Absenkung der Wärmeleitfähigkeit führt im Falle einer Dünnbettmörtel-Fuge der Höhe 3 mm zu einer Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit zwischen 1,0 und 1,7 %. Erhöht man die Lagerfugen-Stärke auf 12 mm (Dickbettmörtel-Fuge), so resultiert eine Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit zwischen 3,2 und 5,2 %.

Übertragung der Ergebnisse auf einen Putzmörtel (Sockelputz)

Aus zusätzlichen Untersuchungen mit einem Sockelputz ging hervor, dass der wärmedämmende und zugleich festigkeitssteigernde Effekt der Kieselsäure-Dosierung vom Dünnbettmörtel-System auf ein Putzmörtel-System übertragen werden kann. Die Untersuchungen lassen auch darauf schließen, dass die mäßige Zugabe von pyrogener Kieselsäure zwischen 5 bis 10 Vol.-% zu allen portlandzementhaltigen Bindebaustoffen stets zu einer Absenkung der Wärmeleitfähigkeit führt. Dabei gelten im Vergleich zum Dünnbettmörtel-System die gleichen Zusammenhänge. Monolithisch aufgebaute Wände, die mit entsprechend modifizierten Mauer- und Putzmörteln errichtet werden, zeichnen sich durch eine vergleichsweise bessere Wärmedämmung aus.

6 Literaturverzeichnis

Zur besseren Übersicht wurde das Literaturverzeichnis in zwei Teile unterteilt. Das Unterkapitel 6.1 enthält u.a. die Normen des Deutschen Instituts für Normung e. V. Die Normen der Internationalen Organisation für Normung sind im Unterkapitel 6.2 aufgeführt.

6.1 Literatur

- Abd Elaty, M. A., Ghazy, M. F. 2014:** Performance of Portland cement mixes containing silica fume and mixed with lime-water, *HBRC Journal* - 10, 3, S. 247–257.
- Al-Sibahy, A., Edwards, R. 2012a:** Mechanical and thermal properties of novel lightweight concrete mixtures containing recycled glass and metakaolin, *Construction and Building Materials* - 31, S. 157–167.
- Al-Sibahy, A., Edwards, R. 2012b:** Thermal behaviour of novel lightweight concrete at ambient and elevated temperatures - Experimental, modelling and parametric studies, *Construction and Building Materials* - 31, S. 174–187.
- Arandigoyen, M., Alvarez, J. I. 2007:** Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars, *Cement and Concrete Research* - 37, 5, S. 767–775.
- Arora, A., Sant, G., Neithalath, N. 2016:** Ternary blends containing slag and interground/blended limestone: - Hydration, strength, and pore structure, *Construction and Building Materials* - 102, S. 113–124.
- Ashour, T., Wieland, H., Georg, H. et al. 2010:** The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings, *Materials & Design* - 31, 10, S. 4676–4685.
- Baquerizo, L. G., Matschei, T., Scrivener, K. L. et al. 2014:** Methods to determine hydration states of minerals and cement hydrates, *Cement and Concrete Research* - 65, S. 85–95.
- Baquerizo, L. G., Matschei, T., Scrivener, K. L. et al. 2015:** Hydration states of AFm cement phases, *Cement and Concrete Research* - 73, S. 143–157.
- Bazant, M. Z., Bažant, Z. P. 2012:** Theory of sorption hysteresis in nanoporous solids - Part II Molecular condensation, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* - 60, 9, S. 1660–1675.
- Bažant, Z. P., Bazant, M. Z. 2012:** Theory of sorption hysteresis in nanoporous solids - Part I, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* - 60, 9, S. 1644–1659.
- Beaudoin J. J. 2002:** A discussion on, "The use of nitrogen adsorption to assess the microstructure of cement paste", *Cement and Concrete Research* - 32, S. 831–832.
- Belie, N. de, Kratky, J., van Vlierberghe, S. 2010:** Influence of pozzolans and slag on the microstructure of partially carbonated cement paste by means of water vapour and nitrogen sorption experiments and BET calculations, *Cement and Concrete Research* - 40, 12, S. 1723–1733.
- Bellmann, F., Sowoidnich, T., Ludwig, H.-M. et al. 2015:** Dissolution rates during the early hydration of tricalcium silicate, *Cement and Concrete Research* - 72, S. 108–116.
- Benedix, R. 2006:** *Bauchemie - Einführung in die Chemie für Bauingenieure*, 3. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, S. 311.
- Bergold, S. T., Götz-Neunhoeffler, F., Neubauer, J. 2016:** Interaction of silicate and aluminate reaction in a synthetic cement system: Implications for the process of alite hydration, *Cement and Concrete Research* - 93, S. 32–44.
- Berodier, E., Scrivener, K. 2015:** Evolution of pore structure in blended systems, *Cement and Concrete Research* - 73, S. 25–35.
- Bhattacharjee, B., Krishnamoorthy S. 2004:** Permeable porosity and thermal conductivity of construction materials, *Journal of Materials in Civil Engineering* - 4, 16, S. 322–330.

- Bier, T. 1986:** Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement pastes, Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustofftechnologie, S. 123–134.
- Bier, T. 1988:** Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton - Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe.
- Binici, H., Aksogan, O., Cagatay, I. H. et al. 2007:** The effect of particle size distribution on the properties of blended cements incorporating GGBFS and natural pozzolan (NP), Powder Technology - 177, 3, S. 140–147.
- Bizzozero, J., Scrivener, K. L. 2015:** Limestone reaction in calcium aluminate cement-calcium sulfate systems, Cement and Concrete Research - 76, S. 159–169.
- Bogas J. A., Gomes, A. 2014:** Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica—characterization and normalization, International Journal of Civil Engineering, Structure Concrete, S. 268–278.
- Bosanquet, C. H. 1944:** Wall effects in gas-temperature measurements, British TA Report - BR-507.
- Bragg, W. L., Bragg, W. H. 1918:** X-rays and crystal structure, 2. Auflage, London, G. Bell.
- Brameshuber, W., Graubohm, M. 2014:** Neues Mörtelsystem für Dünnbettmauerwerk - "Mörtelband", Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, das Mauerwerk - 18, 1, S. 2–14.
- Brás, A., Leal, M., Faria, P. 2013:** Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance, Construction and Building Materials - 49, S. 315–327.
- Brouwer, P. 2003:** Theory of XRF - Getting acquainted with the principles, PANalytical B. V., S. 1–71.
- Bullard, J. W., Jennings, H. M., Livingston, R. A. et al. 2011:** Mechanisms of cement hydration, Cement and Concrete Research - 41, 12, S. 1208–1223.
- Bundesverband der Gipsindustrie e. V. 2013:** GIPS-Datenbuch - Berlin, S. 16–19.
- Campell-Allen, D., Thorne C. P. 1963:** The thermal conductivity of concrete, Magazine of Concrete Research - 15, 43, S. 39–48.
- Celik, K., Meral, C., Petek Gursel, A. et al. 2015:** Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder, Cement and Concrete Composites - 56, S. 59–72.
- Cerbe, G., Hoffmann, H.-J. 2002:** Einführung in die Wärmelehre - Von der Thermodynamik zur technischen Anwendung, 13., verbesserte Auflage, S. 292–321.
- Chen, B., Liu, N. 2013:** A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties, Construction and Building Materials - 44, S. 691–698.
- Chen, J. J., Thomas, J. J., Taylor, H. F. W. et al. 2004:** Solubility and structure of calcium silicate hydrate, Cement and Concrete Research - 34, 9, S. 1499–1519.
- Chen, X., Wu, S., Zhou, J. 2014:** Experimental study and analytical model for pore structure of hydrated cement paste, Applied Clay Science - 101, S. 159–167.
- Cong, X., Kirkpatrick, R. J. 1996:** J. Am. Ceram. Soc. - 79, S. 1585.
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A., Moriconi, G. 2011:** Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles, Materials & Design - 32, 3, S. 1646–1650.
- Cuesta, A., Santacruz, I., Sanf elix, S. G. et al. 2015:** Hydration of C₄AF in the presence of other phases: A synchrotron X-ray powder diffraction study, Construction and Building Materials - 101, S. 818–827.
- Cultrone, G., Sebasti an, E., Huertas, M. O. 2005:** Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives - Mineralogical and textural changes, Cement and Concrete Research - 35, 12, S. 2278–2289.
- Dawood, E. T., Ramli, M. 2012:** Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, Construction and Building Materials - 28, 1, S. 193–200.

- Demirboğa, R., Gül, R. 2003:** Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures, *Energy and buildings* - 35, 11, S. 1155–1159.
- Demirboğa, R. 2007:** Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures, *Building and Environment* - 42, 7, S. 2467–2471.
- Demirboğa, R., Gül, R. 2003:** The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research* - 33, 5, S. 723–727.
- Demirboğa, R., Türkmen, İ., Burhan Karakoç, M. 2005:** Thermo-mechanical properties of concrete containing high-volume mineral admixtures, *Building and Environment* - 42, 1, S. 349–354.
- Di Bella, C., Wyrzykowski, M., Griffa, M. et al. 2015:** Application of microstructurally-designed mortars for studying early-age properties - Microstructure and mechanical properties, *Cement and Concrete Research* - 78, S. 234–244.
- Diamond, S. 1976:** Hydraulic Cement Pastes: their structure and properties, University of Sheffield, Cement and Concrete Ass. Wexham Springs, S. 2.
- Dinakar, P., Sethy, K. P., Sahoo, U. C. 2013:** Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag, *Materials & Design* - 43, S. 161–169.
- Dt. Bauchemie 2003:** Mörtelsysteme und Umwelt - Modifizierte mineralische Mörtelsysteme und Umwelt, 2. Ausgabe, Deutsche Bauchemie e. V., Sachstandsbericht, S. 18–37.
- Ectors, D., Neubauer, J., Götz-Neunhoffer, F. 2013:** The hydration of synthetic brownmillerite in presence of low Ca-sulfate content and calcite monitored by quantitative in-situ-XRD and heat flow calorimetry, *Cement and Concrete Research* - 54, S. 61–68.
- Espinosa, R. M., Franke, L. 2006:** Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherms of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research* - 36, 10, S. 1969–1984.
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I. et al. 2007:** Statistik - Der Weg zur Datenanalyse, 6., überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 69–70.
- Feldman, R. F., Sereda, P. J. 1969:** in 5th ISCC - Vol. 3, S. 36.
- Ferrari, L., Kaufmann, J., Winnefeld, F. et al. 2010:** Interaction of cement model systems with superplasticizers investigated by atomic force microscopy, zeta potential, and adsorption measurements, *Journal of colloid and interface science* - 347, 1, S. 15–24.
- Fick, A. 1855:** Über Diffusion, Poggendorff's Annalen der Physik, S. 59–86.
- Foley, E. M., Kim, J. J., Reda Taha, M. M. 2012:** Synthesis and nano-mechanical characterization of calcium-silicate-hydrate (C-S-H) made with 1.5 CaO/SiO₂ mixture, *Cement and Concrete Research* - 42, 9, S. 1225–1232.
- Fonseca, P. C., Jennings, H. M. 2010:** The effect of drying on early-age morphology of C–S–H as observed in environmental SEM, *Cement and Concrete Research* - 40, 12, S. 1673–1680.
- Franken Maxit 2015:** Maxit Mörtelpad - Produktdatenblatt, Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co., S. 1–4.
- Frølich, L., Wadsö, L., Sandberg, P. 2016:** Using isothermal calorimetry to predict one day mortar strengths, *Cement and Concrete Research* - 88, S. 108–113.
- Fylak, M. 2011:** Untersuchungen zum Verhalten von Portland- und Portlandkompositzementen - Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachgruppe Mineralogie / Geochemie - Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, S. 1–225.
- Gallucci, E., Zhang, X., Scrivener, K. L. 2013:** Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H), *Cement and Concrete Research* - 53, S. 185–195.
- Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A. et al. 2014a:** Aerogel-incorporated concrete: An experimental study, *Construction and Building Materials* - 52, S. 130–136.
- Gao, Y., Jiang, J., Schutter, G. de et al. 2014b:** Fractal and multifractal analysis on pore structure in cement paste, *Construction and Building Materials* - 69, S. 253–261.

- Gao, Y., Wu, K., Jiang, J. 2016:** Examination and modeling of fractality for pore-solid structure in cement paste: - Starting from the mercury intrusion porosimetry test, *Construction and Building Materials* - 124, S. 237–243.
- Garci Juenger M. C., Jennings, H. M. 2002:** Reply to the discussion on, "The use of nitrogen adsorption to assess the microstructure of cement paste", *Cement and Concrete Research* - 32, S. 833–834.
- Garrault, S., Nonat, A. 2001:** Hydrated Layer Formation on Tricalcium and Dicalcium Silicate Surfaces - Experimental Study and Numerical Simulations, *Langmuir* - 17, 26, S. 8131–8138.
- Geller, W. 2015:** Grundlagen für die Praxis - Kinetische Gastheorie, 5., ergänzte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 66–71.
- Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M. 2007:** Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cement and Concrete Composites* - 29, 7, S. 542–549.
- Götz-Neunhoeffler, F. 2006:** Modelle zur Kinetik der Hydratation von Calciumaluminatzement mit Calciumsulfat aus kristallchemischer und mineralogischer Sicht - Habilitationsschrift, Erlangen, S. 1–232.
- Groppweis, H. D., Scharfe, F. 2005:** Hochlochplanziegeldeckelnde Dünnbettmörtelauftragsschicht - Deutsches Patent DE19916117B4, Anmeldetag 9.4.1999, veröffentlicht 25.8.2005, Patentklassen (IPC) C04B24/38.
- Groppweis, H. D., Scharfe, F. 2008:** Trockenmörtel zur Herstellung von Frischmörtel zur deckelnden Dünnbettvermörtelung von Hochlochplanziegeln - Deutsches Patent DE19964421B4, Anmeldetag 9.4.1999, veröffentlicht 3.7.2008, Patentklassen (IPC) C04B40/00 und C04B24/38.
- Grote, K.-H., Feldhusen, J., Stephan, P. et al. 2014:** *Dubbel*: - Taschenbuch für den Maschinenbau, Wärmeübertragung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 184–191.
- Grudemo, A. 1954:** Discussion following the paper by J. D. Bernal on "The structure of cement hydration compounds", *Proc. 3rd Int. Symp. Chem. Cem.*, S. 247–253.
- Hamilton, R. L., Crosser, O. K. 1962:** Thermal conductivity of heterogeneous two component systems, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1.
- Harmathy, T. Z. 1970:** Thermal properties of concrete at elevated temperatures, *ASTM Journal of Materials* - 5, 1, S. 47–74.
- Häußler, K., Schlegel, E. 1995:** Calciumsilicat-Wärmedämmstoffe, *Freiberger Forschungsheft A* 834.
- HeidelbergCement AG 2011:** *Betontechnische Daten*, S. 137–139.
- Hein, P. 2016:** Einfluss von Diatomeenerde auf werkstofftechnische Ziegeleigenschaften, Bachelorarbeit im Arbeitskreis von Prof. Dr. Krcmar, Fakultät Werkstofftechnik, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm.
- Hertel, T., Neubauer, J., Götz-Neunhoeffler, F. 2016:** Study of hydration potential and kinetics of the ferrite phase in iron-rich CAC, *Cement and Concrete Research* - 83, S. 79–85.
- Hossain, K. M. A., Lachemi, M. 2007:** Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete, *Cement and Concrete Research* - 37, 5, S. 759–766.
- Jäger, A., Kuhlemann, C., Habian, E. et al. 2011:** Verklebung von Planziegelmauerwerk mit Polyurethanklebern, *Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, das Mauerwerk* - 15, 4, S. 223–231.
- Jakobsen, H. A. 2014:** *Chemical Reactor Modelling - Multiphase Reactive Flows - Elementary Kinetic Theory of Gases - Multicomponent Mixtures, Mass Diffusion Fluxes for Mixtures of Chemical Species, Combined Bulk and Knudsen Diffusion Fluxes: The Wilke-Bosanquet and Dusty Gas Models, Second Edition*, Springer Cham Heidelberg, New York, Dordrecht, London, S. 303–314.
- Jennings, H. M. 1986:** Aqueous Solubility Relationships for Two Types of Calcium Silicate Hydrate, *Journal American Ceramic Society* - 69, 8, S. 614–618.
- Jennings, H. M. 1999:** A model for the microstructure of calcium silicate hydrates in cement paste, *Cement and Concrete Research*, S. 101–116.

- Johannesson, B., Utgenannt, P. 2001:** Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar, *Cement and Concrete Research* - 31, 6, S. 925–931.
- Joseph, S. K., Xavier, A. S. 2014:** Effect of Starch Admixtures on Fresh and Hardened Properties of Concrete, *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*.
- Juilland, P., Gallucci, E. 2015:** Morpho-topological investigation of the mechanisms and kinetic regimes of alite dissolution, *Cement and Concrete Research* - 76, S. 180–191.
- Just, A., Middendorf, B. 2009:** Microstructure of high-strength foam concrete, *Materials Characterization* - 60, 7, S. 741–748.
- Kaden, R., Pöllmann, H. 2017:** Application of Heat Flow Calorimetry in Building Material Analysis - Poster Seminar "From the mine to the product" at the MLU Halle - Institute of Geosciences and Geography, Halle (Saale).
- Kalousek, G. L., Prebus, A. F. 1958:** Crystal Chemistry of Hydrous Calcium Silicates: III, Morphology and Other Properties of Tobermorite and Related Phases, *Journal American Ceramic Society* - 41, 4, S. 124–132.
- Kasten, D. 2001:** Dünnbettmörtel mit Leichtzuschlag, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, das Mauerwerk, 6, S. 1.
- Kaufmann, J. 2010:** Pore space analysis of cement-based materials by combined Nitrogen sorption – Wood's metal impregnation and multi-cycle mercury intrusion, *Cement and Concrete Composites* - 32, 7, S. 514–522.
- Kaufmann, J., Loser, R., Leemann, A. 2009:** Analysis of cement-bonded materials by multi-cycle mercury intrusion and nitrogen sorption, *Journal of colloid and interface science* - 336, 2, S. 730–737.
- Khan, M. I. 2002:** Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models, *Building and Environment* - 37, 6, S. 607–614.
- Khan, M. I., Bhattacharjee B. 1995:** Relationship between thermal conductivities of aggregate and concrete, Osmania University Hyderabad, India, *Civil engineering materials and structures*, S. 162–166.
- Kidokoro, T., Tomita, R. 1984:** Long-term experiments on the carbonation of artificial lightweight aggregate concrete, *Rev. 38th. Gen. Meet. Tokyo, May, Cem. Assoc. Jpn. (eds.)*, S. 284–287.
- Kim, K.-H., Jeon, S.-E., Kim, J.-K. et al. 2003:** An experimental study on thermal conductivity of concrete, *Cement and Concrete Research* - 33, 3, S. 363–371.
- Klausen, D., Hoscheid, R., Lieblang, P. 2013a:** Technologie der Baustoffe, Handbuch für Studium und Praxis - Beton, Entwerfen von Betonmischungen, 15. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S. 266–267.
- Klausen, D., Hoscheid, R., Lieblang, P. 2013b:** Technologie der Baustoffe, Handbuch für Studium und Praxis - Mörtel, Mauermörtel, 15. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S. 177.
- Klausen, D., Hoscheid, R., Lieblang, P. 2013c:** Technologie der Baustoffe, Handbuch für Studium und Praxis - Mörtel, Mauermörtel, 15. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S. 189–196.
- Knudsen, M. 1909:** The laws of the molecular current and the internal friction current of gases by channels, *Ann Phys (Leipzig)* 29, S. 75–130.
- Knudsen, M., Fisher, W. J. 1910:** The molecular and the frictional flow of gases in tubes, *Phys Rev* 31, S. 586–588.
- Koksal, F., Gencel, O., Kaya, M. 2015:** Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures, *Construction and Building Materials* - 88, S. 175–187.
- Kondo, R., Ueda, S. 1968:** 5th ICCO Tokyo - Vol. II, Tokyo (Japan), S. 203.

- Königsberger, M., Hellmich, C., Pichler, B. 2016:** Densification of C-S-H is mainly driven by available precipitation space, as quantified through an analytical cement hydration model based on NMR data, *Cement and Concrete Research* - 88, S. 170–183.
- Kou, S. C., Poon, C. S. 2012:** Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Construction and Building Materials* - 35, S. 69–76.
- Kupwade-Patil, K., Al-Aibani, A. F., Abdulsalam, M. F. et al. 2016:** Microstructure of cement paste with natural pozzolanic volcanic ash and Portland cement at different stages of curing, *Construction and Building Materials* - 113, S. 423–441.
- Kurdowski, W. 2014a:** *Cement and Concrete Chemistry - Phase Composition of Portland Cements, Tricalcium Silicate and Alite Paste*, Springer Science+Business Media B. V., Heidelberg, New York, London, S. 77–88.
- Kurdowski, W. 2014b:** *Cement and Concrete Chemistry - Silicate Hydration, Tricalcium Silicate Hydration*, Springer Science+Business Media B. V., Heidelberg, New York, London, S. 131–166.
- Kuzel, H.-J. 1984:** Ein leistungsfähiges Wärmeleitungs-Kalorimeter, *Friedrich-Alexander-Universität Erlangen*, TIZ-Fachberichte, 108, S. 46–51.
- Kuzel, H.-J., Pöllmann, H. 1991:** Hydration of C_3A in the presence of $Ca(OH)_2$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ and $CaCO_3$, *Cement and Concrete Research* - 21, S. 885–895.
- Lagaly, G., Tufar, W., Minihan, A. et al. 2005:** *Silicates*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, S. 14–23.
- Lanas, J., Alvarez-Galindo, J. I. 2003:** Masonry repair lime-based mortars - Factors affecting the mechanical behavior, *Cement and Concrete Research* - 33, 11, S. 1867–1876.
- Lawrence, R., Mays, T. J., Walker, P. et al. 2006:** Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis, *Thermochimica Acta* - 444, 2, S. 179–189.
- Lertwattanaruk, P., Makul, N., Siripattaraprat, C. 2012:** Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering, *Journal of environmental management* - 111, S. 133–141.
- Li, X., Xu, W., Wang, S. et al. 2014:** Effect of SO_3 and MgO on Portland cement clinker - Formation of clinker phases and alite polymorphism, *Construction and Building Materials* - 58, S. 182–192.
- Lim, S. K., Tan, C. S., Lim, O. Y. et al. 2013:** Fresh and hardened properties of lightweight foamed concrete with palm oil fuel ash as filler, *Construction and Building Materials* - 46, S. 39–47.
- Locher, F. W. 2000a:** *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Zementerhärtung*, Bluten, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 176–256.
- Locher, F. W. 2000b:** *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Hydratationsreaktionen*, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 198–258.
- Locher, F. W. 2000c:** *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Andere Hauptbestandteile des Zements*, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 89–108.
- Locher, F. W. 2000d:** *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins, Gefüge*, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 270–271.
- Locher, F. W. 2000e:** *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Zementklinker*, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 31–88.
- Locher, F. W. 2000f:** *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins*, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 259–378.
- Lv, Z., Chen, H. 2012:** Modeling of self-healing efficiency for cracks due to unhydrated cement nuclei in hardened cement paste, *Procedia Engineering* - 27, S. 281–290.
- Manns, W. 1975:** Über den Wassergehalt von Beton bei höheren Temperaturen - *Beton* 25, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, S. 26–30.
- Marshall, A. L. 1972:** The thermal properties of concrete, *Building Science* - 3, 7, S. 167–174.
- Martin, L. H. J., Winnefeld, F., Müller, C. J. et al. 2015:** Contribution of limestone to the hydration of calcium sulfoaluminate cement, *Cement and Concrete Composites* - 62, S. 204–211.

- Mason, E. A., Malinauskas, A. P. 1983:** Gas transport in porous media: the dusty-gas model, Chemical engineering monographs, Elsevier, Amsterdam, 17.
- Matschei, T., Lothenbach, B., Glasser, F. P. 2007a:** The AFm phase in Portland cement, Cement and Concrete Research - 37, 2, S. 118–130.
- Matschei, T., Lothenbach, B., Glasser, F. P. 2007b:** The role of calcium carbonate in cement hydration, Cement and Concrete Research - 37, 4, S. 551–558.
- Meffeh, H., Kebaili, O., Oucief, H. et al. 2013:** Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete, Journal of Cleaner Production - 54, S. 282–288.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E. 2004:** Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis, Thermochimica Acta - 420, 1-2, S. 135–140.
- Mortimer, C. E., Müller, U. 2003:** Chemie - Das Basiswissen der Chemie, 8., komplett überarbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 29.
- Mosquera, M. J., Silva, B., Prieto, B. et al. 2006:** Addition of cement to lime-based mortars: - Effect on pore structure and vapor transport, Cement and Concrete Research - 36, 9, S. 1635–1642.
- Mostafa, N. Y., Brown, P. W. 2005:** Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements - Isothermal conduction calorimetry, Thermochimica Acta - 435, 2, S. 162–167.
- Mota, B., Matschei, T., Scrivener, K. 2015:** The influence of sodium salts and gypsum on alite hydration, Cement and Concrete Research - 75, S. 53–65.
- Muller, A. C. A., Scrivener, K. L., Gajewicz, A. M. et al. 2013:** Use of bench-top NMR to measure the density, composition and desorption isotherm of C–S–H in cement paste, Microporous and Mesoporous Materials - 178, S. 99–103.
- Müller-Erlwein, E. 2015:** Chemische Reaktionstechnik - Chemie in der Praxis, 3., überarbeitete Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 248.
- Mun, K. J., So, S. Y., Soh, Y. S. 2007:** The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete, Construction and Building Materials - 21, 7, S. 1576–1582.
- Narattha, C., Thongsanitgarn, P., Chaipanich, A. 2015:** Thermogravimetry analysis, compressive strength and thermal conductivity tests of non-autoclaved aerated Portland cement–fly ash–silica fume concrete, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry - 122, 1, S. 11–20.
- Neroth, G., Vollenschaar, D. 2011a:** Wendehorst Baustoffkunde - Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz, 27. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, S. 383–402.
- Neroth, G., Vollenschaar, D. 2011b:** Wendehorst Baustoffkunde - Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz, 27. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, S. 324.
- Netzsch 2016:** Cement raw material - Application sheet, Ceramics - Building materials, Netzsch-Gerätebau GmbH.
- Nguyen, L. H., Beaucour, A.-L., Ortola, S. et al. 2014:** Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete, Construction and Building Materials - 51, S. 121–132.
- Nochaiya, T., Wongkeo, W., Chaipanich, A. 2010:** Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete, Fuel - 89, 3, S. 768–774.
- Nonat, A. 2004:** The structure and stoichiometry of C-S-H, Cement and Concrete Research - 34, 9, S. 1521–1528.
- Nonat, A., Lecoq, X. 1998:** The structure, stoichiometry and properties of C-S-H prepared by C₃S hydration under controlled conditions, in "NMR spectroscopy of cement based materials", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 197–207.
- Odeh, A. M., Abu-EI-Sha'r, W., Al-Ruzouq, R. 2006:** Gas transport through concrete slabs, Building and Environment - 41, 4, S. 492–500.

- Oertel, T., Helbig, U., Hutter, F. et al. 2014a:** Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research* - 58, S. 121–130.
- Oertel, T., Hutter, F., Helbig, U. et al. 2014b:** Amorphous silica in ultra-high performance concrete - First hour of hydration, *Cement and Concrete Research* - 58, S. 131–142.
- Ohm, G. S. 1827:** Die galvanische Kette - 1. Auflage, Staatsbibliothek zu Berlin - Preußischer Kulturbesitz, Riemann Verlag, Berlin.
- Oktaý, H., Yumrutaş, R., Akpolat, A. 2015:** Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes, *Construction and Building Materials* - 96, S. 217–225.
- Oltulu, M., Şahin, R. 2014:** Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders, *Construction and Building Materials* - 53, S. 658–664.
- Paya, J., Borrachero, M. V., Monzo, J. et al. 2000:** Enhanced conductivity measurements techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity, *Cement and Concrete Research* - 31, S. 41–49.
- Pöhler, K. 2016:** Fremdionenstabilisierte Dicalciumsilicate: Synthese und hydraulische Reaktionen - Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachgruppe Mineralogie / Geochemie - Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann.
- Pöllmann, H. 1984:** Die Kristallchemie der Neubildungen bei Einwirkung von Schadstoffen auf hydraulische Bindemittel - Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, S. 331.
- Pöllmann, H. 1989:** Mineralogisch-kristallographische Untersuchungen an Hydratationsprodukten der Aluminatphase hydraulischer Bindemittel - Habilitationsschrift, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, S. 285.
- Pöllmann, H. 2001:** Structure and performance of cements - Composition of cement phases, Second edition, J. Bensted und P. Barnes, S. 25–56.
- Pöllmann, H., Kaden, R. 2017:** Isoperibolic Heat Flow Calorimetry - Poster Seminar "From the mine to the product" at the MLU Halle - Institute of Geosciences and Geography, Halle (Saale).
- Pöllmann, H., Kuzel, H.-J., Meyer, H. W. 1991:** Heat-flow calorimetry in cement chemistry - Construction and Application of a low cost high-sensitive calorimeter, *Proc. 13th Int. Conf. on Cem. Micr.*, S. 254–264.
- Pöllmann, H., Kuzel, H.-J., Wenda, R. 1989:** Compounds with ettringite structure, *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen* - 2, 160, S. 133–158.
- Powers, T. C. 1947:** A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, *Proceedings Highway Research Board* - 27, S. 178–188.
- Powers, T. C. 1958:** Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, *Journal American Ceramic Society* - 41, 1, S. 1–6.
- Powers, T. C., Brownyard, T. L. 1946:** Studies on the physical properties of hardened Portland cement paste, *Journal American Ceramic Society* - 18, 2-8, S. 101–992.
- Powers, T. C., Brownyard, T. L. 1948:** Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste - *Bull. 22, Portland Cement Association, Chicago*, S. 992.
- Quantachrome® Instruments 2013:** User Guide - Mercury Porosimetry Analyzer - Operating Manual, PM 60, S. 118–140.
- Raab, B. 2010:** Synthese und Charakterisierung nanoskaliger hydraulisch hochreaktiver Phasen des Portland- und Tonerdezements - Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachgruppe Mineralogie / Geochemie - Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann, S. 1–293.
- Ramezaniánpour, A. M., Douglas Hooton, R. 2012:** Thaumassite sulfate attack in Portland and Portland-limestone cement mortars exposed to sulfate solution, *Construction and Building Materials* - 40, S. 162–173.
- Reschetilowski, W. 2015:** Einführung in die Heterogene Katalyse - Makrokinetik - Porendiffusion und Reaktion, Institut für Technische Chemie, Technische Universität Dresden, Deutschland, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 127–133.

- Richardson, I. G. 2004a:** Cem. Concr. Res. - 34, S. 1733.
- Richardson, I. G. 2004b:** Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H - Applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, β -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume, Cement and Concrete Research - 34, 9, S. 1733–1777.
- Richardson, I. G. 2007:** The calcium silicate hydrates, Cement and Concrete Research - 38, 2, S. 137–158.
- Richardson, I. G. 2014:** Model structures for C-(A)-S-H(I), Acta crystallographica Section B, Structural science, crystal engineering and materials - 70, Pt 6, S. 903–923.
- Richardson, I. G., Groves, G. W. 1992a:** Cem. Concr. Res. - 22, S. 1001.
- Richardson, I. G., Groves, G. W. 1992b:** Microstructure and microanalysis of hardened cement pastes involving ground granulated blast-furnace slag, Journal of Materials Science, 27, S. 6204–6212.
- Richardson, I. G., Groves, G. W. 1993a:** Cem. Concr. Res. - 23, S. 1001.
- Richardson, I. G., Groves, G. W. 1993b:** Microstructure and microanalysis of hardened ordinary Portland cement pastes, Journal of Materials Science, 28, S. 265–277.
- Romberg, H. 1978:** Zementsteinporen und Betoneigenschaften, Beton-Information - 18, S. 50–55.
- Rossen, J. E., Lothenbach, B., Scrivener, K. L. 2015:** Composition of C–S–H in pastes with increasing levels of silica fume addition, Cement and Concrete Research - 75, S. 14–22.
- Sadok, A., Zentar, R., Abriak, N.-E. 2016:** Determination of water demand of dredged sediment in concrete formulations, Universität Lille Nord de France.
- Salmang, H., Scholze, H. 2007:** Keramik - Herausgegeben von Rainer Telle, 7. vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 78–83.
- Scharfe, F., Groppe, H. D. 2015:** Trockenmörtelplatte sowie Verfahren und Verwendung einer Vorrichtung zu deren Herstellung - Deutsches Patent DE102013007800B4, Anmeldetag 7.5.2013, veröffentlicht 27.08.2015, Patentklassen (IPC) C04B40/00 (2006.01).
- Scherer, G. W., Zhang, J., Thomas, J. J. 2012:** Nucleation and growth models for hydration of cement, Cement and Concrete Research - 42, 7, S. 982–993.
- Scheydt, J. C. 2013:** Mechanismen der Korrosion bei ultrahochfestem Beton - Dissertation, KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruher Reihe Massivbau Baustofftechnologie Materialprüfung, 74, S. 1–280.
- Schießl, P. 1990:** Wirkung von Steinkohlenaschen in Beton, Beton, 40, S. 519–523.
- Schmidt, S. 2008:** Untersuchungen zum Verhalten von Zement bei Temperatureinwirkung, Diplomarbeit im Arbeitskreis von Prof. Dr. Wenda, Fakultät Werkstofftechnik, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, S. 1–95.
- Schmidt, S. 2012:** Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Mörtelprodukten, Masterarbeit im Arbeitskreis von Prof. Dr. Krcmar, Fakultät Werkstofftechnik, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, S. 1–101.
- Schmidt, S., Grotz, T., Pöllmann, H., Krcmar, W. 2018a:** Verbesserung der Wärmedämmung von Putzmörtel - Der Einfluss von pyrogener Kieselsäure auf werkstofftechnische Parameter von Außenputz unter besonderer Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit (Veröffentlichung eingereicht), ZKG - Zement Kalk Gips International, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.
- Schmidt, S., Klank, D. 2009:** Oberflächencharakterisierung als Ergänzung der Partikelgrößenbestimmung - Vortrag, 10.03.2009, Forschungs-Gesellschaft Verfahrenstechnik e. V. - Goslar.
- Schmidt, S., Krcmar, W. 2017:** Bindebaustoffmischung auf Zementbasis, Bindebaustoff und Verfahren zur Herstellung einer Bindebaustoffmischung - Anmeldung: 28.11.2017. DE, Patentschrift DE 10 2017 128 150.9.

- Schmidt, S., Krcmar, W., Pöllmann, H. 2013:** Optimierung werkstofftechnischer Kenngrößen von Dünnbettmörtel - Vortrag, 12.07.2013, 3. EnCN-Konferenz - Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Energie Campus Nürnberg (EnCN).
- Schmidt, S., Pöllmann, H., Krcmar, W. 2018b:** Verbesserung der Wärmedämmung von Dünnbettmörtel - Teil I: Untersuchungen zur Auswirkung unterschiedlicher Zusatzstoffe auf werkstofftechnische Parameter (Veröffentlichung eingereicht), ZKG - Zement Kalk Gips International, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.
- Schmidt, S., Sappa, D., Pöllmann, H., Krcmar, W. 2018c:** Verbesserung der Wärmedämmung von Dünnbettmörtel - Teil II: Der Einfluss ausgewählter Zusatzstoffe und deren Kombination auf werkstofftechnische Eigenschaften, insbesondere Porengrößenverteilung, Wärmeleitfähigkeit sowie Druckfestigkeit (Veröffentlichung eingereicht), ZKG - Zement Kalk Gips International, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.
- Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F. et al. 2015:** Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder, *Cement and Concrete Composites* - 55, S. 374–382.
- Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F. et al. 2016:** Early hydration of SCM-blended Portland cements - A pore solution and isothermal calorimetry study, *Cement and Concrete Research*.
- Schubert, P., Meyer, G. 2005a:** Dünnbettmauerwerk aus Plansteinen, Planelementen - Sachgerechte, qualitätssichernde Ausführung - Teil 1: Mauerwerk aus bindemittelgebundenen Steinen - Kalksandsteine (KS), Porenbetonsteine (P), Leichtbeton- (LB) und Betonsteine (B), Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, das Mauerwerk, S. 51–56.
- Schubert, P., Meyer, G. 2005b:** Dünnbettmauerwerk aus Plansteinen, Planelementen - Sachgerechte, qualitätssichernde Ausführung - Teil 2: Mauerwerk aus Planziegeln, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, das Mauerwerk, S. 57–60.
- Schubert, P., Meyer, U. 2006:** Ausführung von Planziegel-Mauerwerk mit Dünnbettmörtel, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, das Mauerwerk - 10, 5, S. 190–195.
- Scrivener, K. L. 1984:** The development of microstructure during the hydration of Portland cement - Dissertation, London.
- Scrivener, K. L., Juilland, P., Monteiro, P. J. M. 2015:** Advances in understanding hydration of Portland cement, *Cement and Concrete Research* - 78, S. 38–56.
- Scrivener, K. L., Kirkpatrick, R. J. 2007:** 12th ICCM Montreal - Session ST5, Plenary Lecture, Montreal.
- Scrivener, K. L., Nonat, A. 2011:** Hydration of cementitious materials, present and future, *Cement and Concrete Research* - 41, 7, S. 651–665.
- Senff, L., Hotza, D., Repette, W. L. et al. 2010:** Mortars with nano-SiO₂ and micro-SiO₂ investigated by experimental design, *Construction and Building Materials* - 24, 8, S. 1432–1437.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F. et al. 2011:** Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete, *Energy and buildings* - 43, 2-3, S. 671–676.
- Sercombe, J., Vidal, R., Gallé, C. et al. 2007:** Experimental study of gas diffusion in cement paste, *Cement and Concrete Research* - 37, 4, S. 579–588.
- Shi, C., Zhang, G., He, T. et al. 2016:** Effects of superplasticizers on the stability and morphology of ettringite, *Construction and Building Materials* - 112, S. 261–266.
- Shin, A. H.-C., Kodide, U. 2012:** Thermal conductivity of ternary mixtures for concrete pavements, *Cement and Concrete Composites* - 34, 4, S. 575–582.
- Simon, W., Harmann, D. 2006:** Trocken-Dünnbettmörtel und seine Verwendung - Deutsches Patent DE19841054C5, Anmeldetag 9.9.1998, veröffentlicht 12.1.2006, Patentklassen (IPC) C04B13/10.

- Sleiman, H., Perrot, A., Amziane, S. 2010:** A new look at the measurement of cementitious paste setting by Vicat test, *Cement and Concrete Research* - 40, 5, S. 681–686.
- Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Bergold, S. T. et al. 2016:** Effect of Carbon-Based Materials on the Early Hydration of Tricalcium Silicate, *Journal American Ceramic Society* - 99, 6, S. 2181–2196.
- Spieß, L., Teichert, G., Schwarzer, R. et al. 2009:** *Moderne Röntgenbeugung - Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, S. 1–580.
- Stahl, T., Brunner, S., Zimmermann, M. et al. 2012:** Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications, *Energy and buildings* - 44, S. 114–117.
- Stark, J. 2011:** Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis, *Cement and Concrete Research* - 41, 7, S. 666–678.
- Stark, J., Wicht, B. 2000a:** *Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff - Herstellung von Zementklinker, Sulfatträgeroptimierung, Zuzahlstoffe*, Herausgegeben vom F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, S. 55–79.
- Stark, J., Wicht, B. 2000b:** *Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff - Hydratation des Portlandzements*, Herausgegeben vom F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, S. 171–254.
- Stark, J., Wicht, B. 2000c:** *Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff - Porenraum*, Herausgegeben vom F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, S. 260–262.
- Stark, J., Wicht, B. 2000d:** *Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff - Zement, Herstellung von Zementklinker*, Herausgegeben vom F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, S. 36–54.
- Stark, J., Wicht, B. 2000e:** *Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff - Zement, Portlandzementklinker*, Herausgegeben vom F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, S. 4–35.
- Stark, J., Wicht, B. 2000f:** *Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff - Zementsteinmodelle*, Herausgegeben vom F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, S. 255–257.
- Stark, J., Wicht, B. 2013:** *Dauerhaftigkeit von Beton - 2.*, aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1–488.
- Steiger, R. W., Hurd, M. K. 1978:** Lightweight insulating concrete for floors and roof decks, *Concrete Construction* - 23, 7, S. 411–422.
- Stemmermann, P., Schweike, U., Garbev, K. et al. 2010:** Celitement - eine nachhaltige Perspektive für die Zementindustrie, *Cement International* - 5, 8, S. 52–66.
- Su, N., Hsu, K.-C., Chai, H.-W. 2001:** A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research* - 31, 12, S. 1799–1807.
- Sugrañez, R., Álvarez, J. I., Cruz-Yusta, M. et al. 2013:** Controlling microstructure in cement based mortars by adjusting the particle size distribution of the raw materials, *Construction and Building Materials* - 41, S. 139–145.
- Tajuelo Rodriguez, E., Richardson, I. G., Black, L. et al. 2015:** Composition, silicate anion structure and morphology of calcium silicate hydrates (C-S-H) synthesised by silica-lime reaction and by controlled hydration of tricalcium silicate (C₃S), *Advances in Applied Ceramics* - 114, 7, S. 362–371.
- Tavman, I. H. 1996:** Effective thermal conductivity of granular porous materials, *International Communications in Heat and Mass Transfer* - 23, 2, S. 169–176.
- Taylor, H. F. W. 1986:** 8th International Cartographic Conference Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Vol. I, S. 83.

- Taylor, H. F. W. 1990a:** Cement Chemistry - Hydrated aluminate, ferrite and sulphate phases - AFm phases, AFt phases, Academic Press Limited, London, S. 1–59.
- Taylor, H. F. W. 1990b:** Cement Chemistry - Hydration of the calcium silicate phases, Academic Press Limited, London, S. 128–152.
- Taylor, H. F. W. 1990c:** Cement Chemistry - Portland cement and its major constituent phase - The ferrite phase, Academic Press Limited, London, S. 28.
- Taylor, H. F. W. 1990d:** Cement Chemistry - Portland cement and its major constituent phases/High-temperature chemistry, Academic Press Limited, London, S. 1–59.
- Taylor, H. F. W. 1990e:** Cement Chemistry - Structures and properties of fresh and hardened Portland cement pastes, permeability and diffusion - Diffusion of ions and gases, Academic Press Limited, London, S. 274–275.
- Taylor, H. F. W. 1993:** Nanostructure of C-S-H: current status, *Adv. Cem. Based Mater* - 1, S. 38–46.
- Taylor, R., Richardson, I. G., Brydson, R. M. D. 2010:** Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement–ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag, *Cement and Concrete Research* - 40, 7, S. 971–983.
- Thamboo, J. A., Dhanasekar, M. 2016:** A comparative study of the compression behaviour of thin layer mortared and conventional masonry, Taylor & Francis Group, London, S. 1929–1937.
- Thamboo, J. A., Dhanasekar, M., Yan, C. 2011:** Thin bed masonry system: Review and future prospects, S. 1–10.
- Thomas, J. J., Biernacki, J. J., Bullard, J. W. et al. 2011:** Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development, *Cement and Concrete Research* - 41, 12, S. 1257–1278.
- Thommes, M., Kaneko, K., V. Neimark, A. et al. 2015:** Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry* - 87, 9-10.
- Tian, Y.-p., Pan, X.-l., Yu, H.-y. et al. 2015:** Formation mechanism and crystal simulation of Na₂O-doped calcium aluminate compounds, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* - 26, S. 849–858.
- Turanli, L., Uzal, B., Bektas, F. 2005:** Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements, *Cement and Concrete Research* - 35, 6, S. 1106–1111.
- Ullrich, P. 2015:** Untersuchung von Mechanismen und Kinetik des hydrothermalen Herstellungsprozesses von neuartigen hydraulischen Bindemitteln - Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachgruppe Mineralogie / Geochemie - Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann.
- UltraTest GmbH 2015:** Ultrasonic measurement system revolutionizes cement and gypsum R & D, ZKG - Zement Kalk Gips International, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, S. 26.
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R. et al. 2004:** The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete, *Cement and Concrete Research* - 34, 5, S. 845–848.
- Uzal, B., Turanlı, L. 2012:** Blended cements containing high volume of natural zeolites - Properties, hydration and paste microstructure, *Cement and Concrete Composites* - 34, 1, S. 101–109.
- VDZ 2008a:** Zement-Taschenbuch - Mörtelarten und Definitionen, 51. Ausgabe, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 581–587.
- VDZ 2008b:** Zement-Taschenbuch - Verfahrenstechnik, Klinkerherstellung, 51. Ausgabe, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 45–75.
- VDZ 2008c:** Zement-Taschenbuch - Verformungen bei Kurzzeitbelastung, 51. Ausgabe, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 339–345.
- VDZ 2014:** Zementverbrauch nach Verwendungsarten und Baubereichen - Entwicklungen des deutschen Zementmarkts in 2013, Arbeitskreis Zementprognose, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, S. 2–3.

- Wachter, A., Schäfer, R. 1997:** Verfahren zur Erstellung eines Mauerwerks aus Planziegeln und Zusammensetzung eines Mörtels - Deutsches Patent DE4443907C2, Anmeldetag 9.12.1994, veröffentlicht 20.2.1997, Patentklassen (IPC) E04B2/14.
- Wang, R., Meyer, C. 2012:** Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene, *Cement and Concrete Composites* - 34, 9, S. 975–981.
- Washburn, E. W. 1921:** The Dynamics of Capillary Flow, *Physical Review* - 17, 3, S. 273–283.
- Wenda, R. 1984:** Untersuchungen zur Kristallchemie der Hydratationsprodukte borathaltiger Zemente - Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Wenda, R. 2005a:** Technologie der Bindemittel I, Chemie und Mineralogie des Zementklinkers - Skriptum zur Vorlesung, Fakultät Werkstofftechnik, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, S. 1–49.
- Wenda, R. 2011b:** Technologie der Bindemittel I, Hydratation - Skriptum zur Vorlesung, Fakultät Werkstofftechnik, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, S. 1–99.
- Wistuba, S. P. 2008:** Einfluss der Na₂O-Dotierung von Tricalciumaluminat und Portlandzementklinker auf die Wechselwirkung mit Polycarboxylat-basierten Fließmitteln - Dissertation, Verlag Dr. Hut, München.
- Woermann, E. 1965:** Mikroskopie des Zementklinkers - Bilderatlas, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Wolter, A. 1985:** Einfluss des Ofensystems auf die Klinkereigenschaften, ZKG - Zement Kalk Gips International, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh - 38, 10, S. 612–614.
- Won, J.-P., Kang, H.-B., Lee, S.-J. et al. 2011:** Thermal characteristics of high-strength polymer-cement composites with lightweight aggregates and polypropylene fiber, *Construction and Building Materials* - 25, 10, S. 3810–3819.
- Wong, J. M., Glasser, F. P., Imbabi, M. S. 2007:** Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction, *Cement and Concrete Composites* - 29, 9, S. 647–655.
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Pimraksa, K. et al. 2012:** Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials, *Materials & Design* - 35, S. 434–439.
- Wu, Y., Wang, J.-Y., Monteiro, P. J. M. et al. 2015:** Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings, *Construction and Building Materials* - 87, S. 100–112.
- Ylmén, R., Jäglid, U., Steenari, B.-M. et al. 2009:** Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques, *Cement and Concrete Research* - 39, 5, S. 433–439.
- Yu, H.-y., Pan, X.-l., Wang, B. et al. 2012:** Effect of Na₂O on formation of calcium aluminates in CaO-Al₂O₃-SiO₂ system, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* - 22, S. 3108–3112.
- Yu, P., Kirkpatrick, R. J., Poe, B. et al. 1999:** *J. Am. Ceram. Soc.* - 82, S. 742.
- Yu, Z., Ye, G. 2013:** The pore structure of cement paste blended with fly ash, *Construction and Building Materials* - 45, S. 30–35.
- Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G. et al. 2014:** Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Composites* - 46, S. 99–108.
- Zeh, M., Stelzner, J. 2011:** Dünnbettmörtel und dessen Verwendung - Deutsches Patent DE102009058410B3, Anmeldetag 16.12.2009, veröffentlicht 29.12.2011, Patentklassen (IPC) C04B20/00.
- Zeh, M., Stelzner, J. 2012:** Dünnbettmörtel - Europäisches Patent EP2336095B1, Anmeldetag 11.11.2010, veröffentlicht 11.7.2012, Patentklassen (IPC) C04B28/02.
- Zeidler, E. 2013:** Springer-Taschenbuch der Mathematik - Begründet von I. N. Bronstein und K. A. Semendjaew, weitergeführt von G. Grosche, V. Ziegler und D. Ziegler, herausgegeben von E. Zeidler, 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, S. 11.

- Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. et al. 2012a:** Analysis of pore structure, contact angle and pore entrapment of blended cement pastes from mercury porosimetry data, *Cement and Concrete Composites* - 34, 9, S. 1053–1060.
- Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. et al. 2012b:** Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash, *Cement and Concrete Research* - 42, 1, S. 194–204.
- Zhang, B., Poon, C. S. 2015:** Use of Furnace Bottom Ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties, *Journal of Cleaner Production* - 99, S. 94–100.
- Zhi, Z., Ma, B., Jian, S. et al. 2016:** Research on the interface and microstructure of thin layer mortar - Wuhan University of technology, office of reformation of wall material and energy-efficient building, ZKG - Zement Kalk Gips International, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 4, S. 62–69.
- Zhou, J., Ye, G., van Breugel, K. 2010:** Characterization of pore structure in cement-based materials using pressurization–depressurization cycling mercury intrusion porosimetry (PDC-MIP), *Cement and Concrete Research* - 40, 7, S. 1120–1128.
- Zhou, Y., Ma, B., Huang, J. et al. 2017:** Influence of Ca/Si ratio of concrete pore solution on thaumasite formation, *Construction and Building Materials* - 153, S. 261–267.
- Ziegelindustrie International 2016:** Mortar pad production expanded - Franken Maxit GmbH & Co., Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 6, S. 56.
- Zimmermann, R. W. 1989:** Thermal conductivity of fluid-saturated rocks, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 3, S. 219–227.

6.2 Normen

In den Unterkapiteln 6.2.1 und 6.2.2 erfolgt eine Aufteilung der DIN- bzw. ISO-Normen.

6.2.1 DIN-Normen

- Deutsches Institut für Normung e. V. (2001):** DIN EN ISO 60 - Bestimmung der scheinbaren Dichte von Formmassen, die durch einen genormten Trichter abfließen können (Schüttdichte), Ausgabe: 2000-01, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2013):** DIN V 105 - Mauerziegel, Teil 6: Planziegel, Ausgabe: 2013-06, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2005):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Ausgabe: 2005-05, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2005):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 2: Chemische Analyse von Zement, Ausgabe: 2005-05, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2005):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit, Ausgabe: 2005-05, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1993):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 4: Quantitative Bestimmung der Bestandteile, Vornorm, Ausgabe: 1993-11, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2011):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 5: Prüfung der Puzzolanität von Puzzolanzementen, Ausgabe: 2011-06, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1990):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit, Ausgabe: 1990-03, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2008):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 7: Verfahren für die Probennahme und Probenauswahl von Zement, Ausgabe: 2008-02, Beuth Verlag GmbH, Berlin

- Deutsches Institut für Normung e. V. (2010):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 8: Hydratationswärme; Lösungsverfahren, Ausgabe: 2010-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2010):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 9: Hydratationswärme; Teiladiabatisches Verfahren, Ausgabe: 2010-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2006):** DIN EN 196 - Prüfverfahren für Zement, Teil 10: Bestimmung des Gehalts an wasserlöslichem Chrom, Ausgaben: 2006-10, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2004):** DIN EN 197 - Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Ausgabe: 2004-08, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2011):** DIN EN 413 - Putz- und Mauerbinder, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien, Ausgabe: 2011-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2012):** DIN EN 450 - Flugasche für Beton, Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien, Ausgabe: 2012-10, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2015):** DIN EN 459 - Baukalk, Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien, Ausgabe: 2003-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2006):** DIN EN 480 - Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren: Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit, Ausgabe: 2006-11, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2008):** DIN EN 934 - Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel, Teil 1: Gemeinsame Anforderungen, Ausgabe: 2008-04, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2008):** DIN EN 934 - Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel, Teil 3: Zusatzmittel für Mauermörtel – Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung, Ausgabe: 2012-09, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2010):** DIN EN 998 - Festlegung für Mörtel im Mauerwerksbau, Teil 1: Putzmörtel, Ausgabe: 2010-12, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2003):** DIN EN 998 - Festlegung für Mörtel im Mauerwerksbau, Teil 2: Mauermörtel, Ausgabe: 2003-03, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2002):** DIN EN 1008 - Zugabewasser für Beton, Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton, Ausgabe: 2002-10, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1998):** DIN 1015 - Prüfverfahren für Mörtel und Mauerwerk: Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel, Ausgabe: 1998-12, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2007):** DIN EN 1015 - Prüfverfahren für Mörtel und Mauerwerk, Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel, Ausgabe: 2007-05, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2007):** DIN 1052 - Prüfverfahren für Mauerwerk, Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit), Ausgabe: 2007-06, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1996):** DIN 1053 - Mauerwerk, Ausgabe: 1996-11, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1996):** DIN 1053 - Mauerwerk, Teil 1: Berechnung und Ausführung, Ausgabe: 1996-11, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1990):** DIN 1053 - Mauerwerk, Teil 3: Bewehrtes Mauerwerk, Berechnung und Ausführung, Ausgabe: 1990-02, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2011):** DIN 1053 - Mauerwerk, Teil 4: Fertigbauteile, Ausgabe: 2011-05, Beuth Verlag GmbH, Berlin

- Deutsches Institut für Normung e. V. (2002):** DIN 4226 - Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 4: Fertigbauteile, Ausgabe: 2002-02, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2014):** DIN ISO 9277 - Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption - BET-Verfahren, Ausgabe: 2014-01, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2004):** DIN 12504 - Prüfung von Beton in Bauwerken: Teil 4: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit, Ausgabe: 2004-12, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2015):** DIN EN 12620 - Gesteinskörnung für Beton, Ausgabe: 2015-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2001):** DIN EN 12667 - Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand, Ausgabe: 2001-05, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2014):** DIN EN 12878 - Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen - Anforderungen und Prüfverfahren, Ausgabe: 2014-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2015):** DIN EN 13139 - Gesteinskörnungen für Mörtel, Ausgabe: 2015-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2002):** DIN EN 13055 - Leichte Gesteinskörnungen, Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel, Ausgabe: 2002-08, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2017):** DIN 18550 – Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen, Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 19314-1 für Außenputze, Ausgabe: 2017-03, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1999):** DIN 18555 - Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln, Teil 9: Festmörtel, Bestimmung der Fugendruckfestigkeit, Ausgabe: 1999-09, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2007):** DIN V 18580 - Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften, Ausgabe: 2007-03, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2004):** DIN V 20000 - Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken, Teil 412: Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2, Ausgabe: 2004-03, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2005):** DIN 51005 – Thermische Analyse (TA) - Begriffe, Ausgabe: 2005-08, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2005):** DIN 51006 – Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen, Ausgabe: 2005-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1979):** DIN EN 51043 - Trass: Anforderungen, Prüfung, Ausgabe: 1979-08, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1993):** DIN 66131 - Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmett und Teller (BET); Grundlagen, Ausgabe: 1993-07, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1993):** DIN 66133 - Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion, Ausgabe: 1993-06, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2003):** DIN 66137 - Bestimmung der Dichte fester Stoffe, Teil 1: Grundlagen, Ausgabe: 2003-11, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2003):** DIN 66137 - Bestimmung der Dichte fester Stoffe, Teil 2: Gaspyknometrie, Ausgabe: 2003-12, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2012):** DIN 66139 – Porengrößenanalyse – Darstellung von Porengrößenverteilungen, Ausgabe: 2012-03, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Deutsches Institut für Normung e. V. (1987): DIN 66165 - Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse: Teil 1: Grundlagen, Ausgabe: 1987-04, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Deutsches Institut für Normung e. V. (1987): DIN 66165 - Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse: Teil 2: Durchführung, Ausgabe: 1987-04, Beuth Verlag GmbH, Berlin

6.2.2 ISO-Normen

International Organization for Standardization (2005): ISO 15901 - Evaluation of pore size distribution and porosimetry of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption, Part 1: Mercury porosimetry, First edition: 2005-12, ISO copyright office, Genf/Schweiz

International Organization for Standardization (2007): ISO 15901 Evaluation of pore size distribution and porosimetry of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption, Part 2: Analysis of mesopores and macropores by gas adsorption, First edition: 2007-04, ISO copyright office, Genf/Schweiz

International Organization for Standardization (2005): ISO 15901 Evaluation of pore size distribution and porosimetry of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption, Part 3: Analysis of micropores by gas adsorption, First edition: 2005-12, ISO copyright office, Genf/Schweiz

International Organization for Standardization (2009): ISO 13320 Particle size analysis: Laser diffraction methods, First edition: 2009-10, ISO copyright office, Genf/Schweiz

International Organization for Standardization (2000): ISO 13320 Partikelgrößenanalyse: Laserbeugungsverfahren: Allgemeine Grundlagen: 2000-03, ISO copyright office, Genf/Schweiz

7 Anhang

In den folgenden Unterkapiteln ist das Bilder- und Tabellenverzeichnis, verwendete Formeln im Anhang, stereomikroskopische Aufnahmen der Ausgangs- bzw. Zusatzstoffe, Einzeldaten der experimentellen Methoden sowie REM-Aufnahmen vollständig erfasst.

7.1 Bilderverzeichnis

Bild 1:	Aufbringen von Dünnbettmörtel auf eine Planziegel-Mauer mithilfe eines Mörtelschlittens (links) © Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co., 2012); Vermauern von Planziegeln mit Dünnbettmörtel (rechts) (Archiv Schmidt, 2012)	1
Bild 2:	Im Jahr 2015 wurde das Mörtelpad von der Firma Franken Maxit dem Baustoffmarkt zur Verfügung gestellt (© Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co., 2016)	4
Bild 3:	Reaktionsablauf in einem Drehrohrofen mit Vorcalciniierung nach (Volter, 1985)	14
Bild 4:	Polymorphie des reinen C_3S nach (Stark, et al., 2000e; Taylor, 1990c)	17
Bild 5:	Idiomorphe Alitkristalle (Anschliff) (Wenda, 2005a)	18
Bild 6:	Polymorphie des C_2S nach (Stark, et al., 2000e; Taylor, 1990d)	18
Bild 7:	Belitkristalle (REM-Aufnahme) als gerundete Körner, Korn-Durchmesser zwischen 20 und 40 μm (links) (Wenda, 2005a); typischer Belit in gekreuzter Zwillings-Lamellenstruktur (H_2O -Ätzung) (rechts) (Woermann, 1965)	19
Bild 8:	Alit mit Belitkernen in differenzierter Grundmasse (weiß: Ferrit, grau: Aluminat) (Wenda, 2005a)	20
Bild 9:	1,4 nm-Tobermorit-Struktur: Projektionsebene (210) (links); Projektionsebene (010) (rechts). Die Calcium-Lagen sind in hellgrauer Farbe dargestellt (Chen, et al., 2004)	31
Bild 10.1:	REM-Aufnahme: Portlandit und C-S-H-Phasen in Zementstein (CEM I)	33
Bild 10.2:	Struktur von Portlandit (Wenda, 2005a)	34
Bild 11:	Poren-Größenbereiche von Feststoffen sowie Reichweite der Messverfahren nach (Romberg, 1978; Stark, et al., 2000f)	44
Bild 12:	Probenzelle (0,5 cm^3 Zellenvolumen) befüllt mit Dünnbettmörtel-Bruchstücken (links); Untersuchung einer Pulverprobe (rechts)	61
Bild 13:	Stahlform mit Aufsetzkasten zur Herstellung von Mörtelprismen (links); Silikonform zur Herstellung von Wärmeleitplatten (rechts)	62
Bild 14:	Versuchsaufbau zur Untersuchung des Portlandit-Abbaus unter CO_2 -Ausschluss in N_2 -Atmosphäre bzw. an Laborluft-Atmosphäre (Carbonatisierung)	68
Bild 15:	Fotografien der im Screening verwendeten Zusatzstoffe	74
Bild 16:	Zusatzstoff-Screening in Dünnbettmörtel; Korrelation der 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ von Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Zugabe zwischen 5 bis 20 Vol.-% im Vergleich zur Nullprobe (Tab. A-1)	76

Bild 17:	Röntgendiffraktogramm des ungesiebten Dünnbettmörtel-Trockenpulvers	82
Bild 18:	Röntgendiffraktogramme der Zusatzstoffe pyrogene Kieselsäure, expandierter Perlit und expandiertes Alumosilikat Sorte III	82
Bild 19.1:	Spezifisches Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 205 μm bis 20 nm für die ungesiebte Trockenmörtel-Probe und eingesetzte Zusatzstoffe	84
Bild 19.2:	Kumulatives Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 205 μm bis 20 nm für die ungesiebte Trockenmörtel-Probe und eingesetzte Zusatzstoffe	84
Bild 20:	Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben mit jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff (Tab. A-7)	87
Bild 21:	Zusatzstoff-Screening in Dünnbettmörtel; Korrelation der 7 und 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr}}$ von Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Zugabe mit jeweils 10 Vol.-% im Vergleich zur Nullprobe	90
Bild 22.1:	Kumulatives Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben	92
Bild 22.2:	Spezifisches Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben	92
Bild 23.1:	Kumulatives Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und optimierte Dünnbettmörtel-Proben	94
Bild 23.2:	Spezifisches Porenvolumen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser im Bereich von 210 μm bis 20 nm für die Dünnbettmörtel-Nullprobe und optimierte Dünnbettmörtel-Proben	94
Bild 24:	Korrelation von 28 Tage-Druckfestigkeiten und Porositäten ausgehärteter Dünnbettmörtel-Mischungen nach Dosierung von jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff im Vergleich zur Nullprobe	95
Bild 25:	Kumulatives Porenvolumen von Dünnbettmörtel-Proben mit den Zusatzstoffen expandierter Perlit, expandiertes Alumosilikat Sorte III und pyrogene Kieselsäure im Vergleich mit der Nullprobe im Porengrößenbereich $< 75 \text{ nm}$ in Abhängigkeit von jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff-Dosierung	96
Bild 26:	Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit, einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Alumosilikat Sorte III sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 2, 7 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre	98
Bild 27:	Masseverlust in Abhängigkeit von der Temperatur (TG) einer Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit je 10 Vol.-% Zusatzstoff nach einem Abbindezeitraum von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre (Bild A-4)	100

-
- Bild 28:** Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben bei Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie 5, 10 und 15 Vol.-% expandiertem Perlit bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen (Tab. A-14) **104**
- Bild 29:** Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben nach der kombinierten Zugabe von 5 bis 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und 5 bis 10 Vol.-% expandiertem Perlit bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen (Tab. A-14) **105**
- Bild 30:** Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper für die Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben nach der kombinierten Zugabe von jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen (Tab. A-14) **106**
- Bild 31:** Korrelation der 7 Tage- und 28 Tage-Druckfestigkeiten mit den 28 Tage-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr}$ modifizierter Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit vom w/m-Verhältnis mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III im Vergleich zur Nullprobe **110**
- Bild 32.1:** Kumulatives Porenvolumen modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III in Abhängigkeit vom Porendurchmesser zwischen 210 μm bis 20 nm, bei angepassten w/m-Verhältnissen, im Vergleich mit der Nullprobe (Bilder A-5) **114**
- Bild 32.2:** Spezifisches Porenvolumen modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III in Abhängigkeit vom Porendurchmesser zwischen 210 μm bis 20 nm, bei angepassten w/m-Verhältnissen, im Vergleich mit der Nullprobe (Bilder A-6, Tab. A-17) **114**
- Bild 33:** Kumulatives Porenvolumen von Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure sowie jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III, im Porengrößenbereich kleiner 75 nm, im Vergleich mit der Nullprobe **116**
- Bild 34:** Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre (links) sowie unter CO_2 -Ausschluss (rechts) (Bilder A-7) **119**
- Bild 35:** Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre (links) sowie unter CO_2 -Ausschluss (rechts) (Bilder A-8) **120**
- Bild 36:** Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Aluminosilikat Sorte III im Probenalter von 2, 7 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre (Bild A-9) **121**
- Bild 37:** Thermogravimetrische Untersuchungen von Dünnbettmörtel-Nullproben im Vergleich mit Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% Zusatzstoff nach 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, die in Laborluft-Atmosphäre hydratisiert wurden (Bild A-10) **123**

-
- Bild 38:** Thermogravimetrische Untersuchungen von Dünnbettmörtel-Nullproben im Vergleich mit Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% Zusatzstoff nach 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, die unter CO₂-Ausschluss im Exsikkator in N₂-Atmosphäre hydratisiert wurden (Bild A-11) **123**
- Bild 39:** Vergleich der Portlandit-Bildung in einer Dünnbettmörtel-Nullprobe mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit und einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure nach einer Erhärtungszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre sowie unter CO₂-Ausschluss im Exsikkator in N₂-Atmosphäre **127**
- Bild 40:** CaCO₃-Gehalte [Ma.-%] einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit und einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nach einer Erhärtungszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre sowie unter CO₂-Ausschluss (N₂) **128**
- Bild 41:** REM-Aufnahme der Bruchfläche einer typischen Dünnbettmörtel-Nullprobe in 50-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre **130**
- Bild 42:** REM-Aufnahme der Bruchfläche einer typischen Dünnbettmörtel-Nullprobe in 500-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre **131**
- Bild 43:** REM-Aufnahmen der Bruchoberfläche einer typischen Dünnbettmörtel-Nullprobe in 1000-facher (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts) nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre **131**
- Bild 44:** REM-Aufnahme der Bruchfläche einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure in 50-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre **132**
- Bild 45:** REM-Aufnahme der Bruchoberfläche einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure in 1000-facher (links) und 5000-facher Vergrößerung (rechts) nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre **133**
- Bild 46:** REM-Aufnahme der Bruchfläche einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit in 50-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre **133**
- Bild 47:** REM-Aufnahme der Bruchfläche einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit in 500-facher Vergrößerung nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre **134**
- Bild 48:** Kalorigramme modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit bzw. 10 Vol.-% expandiertem Alumosilikat Sorte III bzw. 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure; außerdem mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III in Kombination bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen, in Abhängigkeit von der Hydratationszeit, im Vergleich mit der Nullprobe **135**
- Bild 49:** Eindringtiefen der Vicat-Nadel in Abhängigkeit von der Erstarrungszeit modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit, 10 Vol.-% expandiertem Alumosilikat Sorte III und 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen; außerdem mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III in Kombination, im Vergleich mit der Nullprobe **138**

Bild 50:	Verbesserung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit von der Hochlochziegel-Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichem Verfüllmaterial für eine Dünnbettmörtel-Fugenhöhe von 3 mm im Vergleich mit einer Dickbettmörtel-Fugenhöhe von 12 mm	140
Bild 51:	Isothermen eines Modell-Hochlochziegels mit zusätzlicher Dünnbett-Mörtelfuge mit einer Höhe von 1,5 mm in den Lagerfugen (2 x 1,5 mm = 3 mm)	141

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiele für Mörtelarten (VDZ, 2008a)	7
Tabelle 2.1:	Zuordnung der nach DIN 1053 geforderten Mörtelgruppen zu den Mörtel Eigenschaften nach DIN EN 998-2 entsprechend der deutschen Anwendungsnorm DIN V 20000-412 (VDZ, 2008a)	10
Tabelle 2.2:	Zusätzliche Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeit von Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften nach DIN V 18580 (VDZ, 2008a)	11
Tabelle 3:	Zemente nach DIN EN 197-1	12
Tabelle 4:	Kurzschreibweise oxidischer Verbindungen	13
Tabelle 5:	Bezeichnung von Klinkermineralien und Zementbestandteilen. Anteile der Haupt- und Nebenklinkerphasen sowie Sulfatträger nach (Locher, 2000e; Stark, et al., 2000e; Taylor, 1990d)	15
Tabelle 6:	Fremdioneneinbau in die Hauptklinkerphasen	16
Tabelle 7:	Einfluss des Na ₂ O-Gehaltes auf die Polymorphie des C ₃ A	20
Tabelle 8:	Phasen des Systems CaSO ₄ -H ₂ O mit Eigenschaften (Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013)	22
Tabelle 9:	Mögliche Hydratationsprodukte (u. a. wichtige AFt- und AFm-Phasen) von Portlandzement (Fylak, 2011)	31
Tabelle 10:	Poren-Art und Porengrößenbereiche nach ISO 15901	45
Tabelle 11:	Zusammensetzung der Dünnbettmörtel-Mischungen am Beispiel mit je 10 Vol.-% Zusatzstoff	56
Tabelle 12:	Messparameter zur Durchführung der Röntgenbeugung	59
Tabelle 13:	Relevante Zementphasen und weitere Bestandteile für die Phasenanalyse der Ausgangs- bzw. Zusatzstoffe	59
Tabelle 14:	Beispiel für die Herstellung von 2,00 l Dünnbettmörtel-Mischung (Nullprobe) mittels Stoffraumrechnung mit einem w/m-Verhältnis von 0,58	64
Tabelle 15:	Relevante Zementphasen, Hydratationsprodukte und weitere Bestandteile für die Phasenanalyse der Dünnbettmörtel-Proben sowie Ausgangs- bzw. Zusatzstoffe	69
Tabelle 16:	Gerätespezifische Einstellungen für die Durchführung von Thermoanalysen (TG / DTG)	69
Tabelle 17:	Besondere Merkmale der verwendeten Zusatzstoffe	75

Tabelle 18:	Korngrößen, Feststoffdichten und spezifische Oberflächen von ungesiebttem Dünnbettmörtel-Pulver, Dünnbettmörtel-Siebrückständen sowie eingesetzten Zusatzstoffen (Tab. A-2 bis A-4)	78
Tabelle 19:	Röntgenfluoreszenzanalysen und Glühverluste GV (950 °C) des ungesiebtten Trockenmörtels (Nullprobe, Spalte 2) sowie der Siebrückstände ($x_1 < 63 \mu\text{m}$ bis $x_6 \geq 500 \mu\text{m}$)	80
Tabelle 20:	Röntgenfluoreszenzanalysen und Glühverluste GV (950 °C) der Zusatzstoffe pyrogene Kieselsäure, expandierter Perlit und expandiertes Alumosilikat Sorte III	81
Tabelle 21:	Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie für ungesiebttes Trockenmörtel-Pulver sowie eingesetzte Zusatzstoffe	83
Tabelle 22:	Wassersorptionsvermögen hydrophiler Zusatzstoffe	85
Tabelle 23:	Siebanalyse (Mittelwerte) von insgesamt 18 Dünnbettmörtel-Säcken je 15 kg (Tab. A-2)	86
Tabelle 24:	Werkstofftechnische Parameter (BET-Oberflächen, E-Moduln, Dreipunkt-Biegezug- und Druckfestigkeiten sowie Wärmeleitfähigkeiten und Trockenrohddichten) modifizierter Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit von der Zusatzstoff-Dosierung im Vergleich zur Nullprobe (Tab. A-8)	88
Tabelle 25.1:	Porenanalysen modifizierter Dünnbettmörtel-Proben im Vergleich mit der Dünnbettmörtel-Nullprobe (Tab. A-9)	91
Tabelle 25.2:	Porenanalysen modifizierter Dünnbettmörtel-Proben im Vergleich mit der Dünnbettmörtel-Nullprobe (Tab. A-9)	93
Tabelle 26:	Thermogravimetrie bis 1000 °C mit Massenabnahmen, Restmassen, Massenverlusten sowie berechneten Wasserverlusten bzw. Portlandit-Massen und Kohlendioxidverlusten bzw. Calciumcarbonat-Massen modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen mit jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nach einer Abbindezeit von jeweils 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre	102
Tabelle 27:	Mittelwerte von BET-Oberfläche, dynamischem E-Modul, Dreipunkt-Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Trockenrohddichte von Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit vom w/m-Verhältnis und steigenden Zusatzstoff-Zugaben im Vergleich mit Dünnbettmörtel-Nullproben. Die Zusatzstoffe pyrogene Kieselsäure, expandierter Perlit und expandiertes Alumosilikat Sorte III wurden zwischen 5 bis 15 Vol.-% sowohl einzeln, als auch in Kombinationen zugemischt (Tab. A-15)	108
Tabelle 28:	Porenanalyse mittels Quecksilberporosimetrie, Gasadsorption und Gaspyknometrie, Porenvolumen-Verhältnisse aus Mesoporen-Volumina (0,05 bis 0,02 μm) und Makroporen-Volumina (1,0 bis 0,1 μm) sowie Korrelation von Porositäten, Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten ausgehärteter Dünnbettmörtel-Mischungen bestehend aus 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III im Vergleich mit der Nullprobe (Tabelle 27, Tab. A-16)	113

Tabelle 29.1:	Thermogravimetrie bzw. Restmassen und Massenverluste sowie berechnete Wasserverluste bzw. Portlandit-Massen und Kohlendioxidverluste bzw. Calciumcarbonat-Massen nach Formel 60 bzw. 62 einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit und einer modifizierten Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Vergleich zur Dünnbettmörtel-Nullprobe nach einer Erhärtungszeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen, hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre sowie unter CO ₂ -Ausschluss (N ₂) (Bilder 37 und 38, Bilder A-10 und A-11)	124
Tabelle 29.2:	Fortsetzung Tabelle 29.1	125
Tabelle 30:	Reaktionsphasen der Zementhydratation modifizierter Dünnbett-Frischmörtel-Proben mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit bzw. 10 Vol.-% expandiertem Alumosilikat Sorte III bzw. 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure mit unterschiedlichen w/m-Verhältnissen; außerdem mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit bzw. je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III in Kombination in Abhängigkeit von der Hydratationszeit, im Vergleich mit der Nullprobe	136
Tabelle 31:	Erstarrungszeiten optimierter Dünnbett-Frischmörtel-Mischungen im Vergleich zur Nullprobe bestimmt nach der Vicat-Methode	137
Tabelle 32:	Scherben-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, tr.}$ von Hochlochziegeln sowie äquivalente Wärmeleitfähigkeiten unterschiedlich verfüllter Ziegel mit unterschiedlichen Höhen der Mörtel-Fugen	139

7.3 Formeln

Berechnung der empirischen Varianz und Standardabweichung nach Formel A-1 bzw. A-2 (Fahrmeir, et al., 2007):

$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{n} [(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{A-1})$$

\tilde{s}^2 : Varianz der Werte x_1, \dots, x_n

\bar{x} : Mittelwert

$$\tilde{s} = + \sqrt{\tilde{s}^2} \quad (\text{A-2})$$

\tilde{s} : Standardabweichung

7.4 Ergebnisse

Tabelle A-1.1: Berechnete Einzel- und Mittelwerte der Druckfestigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten sowie berechnete Standardabweichungen von abgebundenen Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings ohne Stoffraumrechnung (Vorversuche). Markierte (durchgestrichene) Einzelwerte weichen um mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert ab und wurden daher verworfen

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Probenalter [d]	Druckfestigkeit					Wärmeleitfähigkeit			
			Bruchlast		Einzelwert	Mittelwert	Standardabweichung	Einzelwert	Mittelwert	Standardabweichung	
			F_f [kN]		β_B [MPa]		\tilde{s}	$\lambda_{10, tr.}$ [W/(m·K)]		\tilde{s}	
Dünnbettmörtel	Nullprobe	7	8,59	8,92	5,37	5,58	5,5	0,13	0,21	0,21	0,01
			8,63	9,17	5,40	5,73			0,21		
			8,66	8,95	5,41	5,59			0,20		
		28	16,19	16,05	10,12	10,03	10,1	0,06	-		
			16,17	16,12	10,11	10,07			-		
			15,95	16,24	9,97	10,15			0,21		
Hohlglasskugeln Sorte I	5	7	15,67	15,39	9,79	9,62	10,0	0,27	0,20	0,21	0,01
			16,36	16,63	10,23	10,39			-		
			16,11	16,17	10,07	10,11			-		
		28	17,88	15,23	11,18	9,52	10,7	0,61	0,21		
			16,95	17,72	10,60	11,08			-		
			10,81	17,52	6,76	10,95			0,21		
	10	28	16,99	18,87	10,62	11,79	11,7	0,83	0,21	0,21	0,00
			17,28	19,77	10,80	12,36			0,21		
			16,84	20,31	10,53	12,70			0,22		
	15	7	9,60	9,90	6,00	6,19	6,0	0,13	-	0,19	0,00
			9,59	9,48	5,99	5,92			-		
			9,38	9,21	5,86	5,76			0,20		
		28	12,96	13,80	8,10	8,63	8,4	0,19	0,19		
			13,14	13,19	8,21	8,25			0,19		
			13,46	13,66	8,41	8,54			-		
20	28	15,04	16,09	9,40	10,06	9,8	0,32	0,20	0,20	0,00	
		16,20	15,52	10,13	9,70			0,20			
		14,88	15,99	9,30	10,00			0,20			
Hohlglasskugeln Sorte II	10	28	18,51	16,65	11,57	10,41	11,3	0,42	0,21	0,21	0,00
			17,69	18,37	11,06	11,48			0,22		
			18,34	18,48	11,46	11,55			0,22		
	20	28	17,70	17,34	11,06	10,84	10,7	0,17	0,21	0,21	0,00
			17,08	16,95	10,68	10,59			0,20		
			17,09	16,90	10,68	10,56			0,21		

Tabelle A-1.2: Fortsetzung Tab. A-1.1

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Probenalter	Druckfestigkeit					Wärmeleitfähigkeit			
			Bruchlast		Einzelwert		Mittelwert	Standardabweichung	Einzelwert	Mittelwert	Standardabweichung
			F_f		β_B						
			[Vol.-%]	[d]	[kN]	[MPa]	[W/(m·K)]				
Phenolharzkugeln	5	7	10,17	10,09	6,36	6,31	6,3	0,07	0,20	0,21	0,00
			9,87	10,07	6,17	6,30			-		
			10,04	9,88	6,28	6,18			0,20		
		28	14,71	13,82	9,19	8,64	8,9	0,26	-		
			13,65	14,05	8,53	8,78			0,21		
			14,73	14,24	9,21	8,90			-		
	10	28	21,57	20,88	13,48	13,05	12,7	0,55	0,24	0,24	0,00
			20,29	20,25	12,68	12,66			0,24		
			18,72	19,80	11,70	12,38			0,17		
	15	7	8,81	9,52	5,51	5,95	5,9	0,22	-	0,20	0,00
			9,71	9,30	6,07	5,81			-		
			9,76	8,05	6,10	5,03			0,19		
		28	13,30	14,11	8,31	8,82	8,7	0,43	0,20		
			15,01	14,28	9,38	8,92			-		
			13,75	12,91	8,60	8,07			0,20		
	20	28	17,87	17,00	11,17	10,63	10,7	0,64	0,21	0,21	0,00
			10,40	15,46	6,50	9,66			0,20		
			16,50	18,39	10,31	11,50			0,21		
Kaolin (China Clay)	5	7	16,56	17,57	10,35	10,98	11,2	0,43	0,23	0,22	0,01
			18,23	18,55	11,39	11,60			-		
			18,38	18,31	11,49	11,44			-		
		28	20,37	19,13	12,73	11,96	12,4	0,49	0,22		
			20,24	20,78	12,65	12,99			0,22		
			20,26	18,51	12,66	11,57			-		
	15	7	17,82	17,10	11,14	10,69	10,8	0,21	0,22	0,22	0,01
			17,53	17,40	10,96	10,88			-		
			16,88	16,91	10,55	10,57			0,23		
		28	23,06	21,21	14,41	13,26	13,4	0,65	0,18		
			21,84	21,95	13,65	13,72			-		
			19,61	21,15	12,25	13,22			-		
Expandiertes Aluminosilikat Sorte I	10	28	15,83	16,57	9,90	10,36	10,9	0,71	0,22	0,22	0,00
			17,07	17,43	10,67	10,90			0,23		
			19,21	18,51	12,01	11,57			0,22		
	20	28	14,96	15,11	9,35	9,44	9,8	0,24	0,20	0,20	0,00
			16,33	15,98	10,21	9,99			0,20		
			15,74	12,95	9,84	8,10			0,21		

Tabelle A-1.3: Fortsetzung Tab. A-1.2

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Probenalter [d]	Druckfestigkeit					Wärmeleitfähigkeit			
			Bruchlast		Einzelwert		Mittelwert	Standardabweichung	Einzelwert	Mittelwert	Standardabweichung
			F_r		β_B						
			[kN]		[MPa]		[W/(m·K)]				
Expandiertes Aluminosilikat Sorte II	5	7	18,67	19,02	11,67	11,89	11,7	0,38	-	0,25	0,00
			17,61	19,14	11,00	11,96			0,25		
			16,76	19,30	10,48	12,06			-		
		28	23,07	23,49	14,42	14,68	13,8	0,69	0,24		
			20,35	22,92	12,72	14,32			0,25		
			21,56	21,48	13,48	13,42			-		
	15	7	13,78	14,88	8,61	9,30	8,8	0,33	-	0,21	0,01
			13,72	14,32	8,58	8,95			0,22		
			9,68	13,35	6,05	8,34			0,21		
		28	19,77	20,37	12,35	12,73	12,0	0,61	-		
			18,04	14,52	11,28	9,08			0,21		
			17,95	19,65	11,22	12,28			-		
Expandiertes Aluminosilikat Sorte III	5	7	17,97	18,50	11,23	11,56	11,3	0,27	-	0,24	0,00
			18,14	18,28	11,34	11,43			0,24		
			17,32	18,66	10,83	11,66			0,25		
		28	24,76	24,08	15,47	15,05	15,4	0,30	-		
			25,06	24,55	15,66	15,35			0,25		
			24,07	25,37	15,04	15,86			-		
	15	7	15,01	13,68	9,38	8,55	9,0	0,30	-	0,22	0,00
			14,05	14,76	8,78	9,23			0,22		
			8,14	14,36	5,09	8,97			-		
		28	19,23	19,27	12,02	12,05	12,2	0,26	0,22		
			15,18	19,99	9,49	12,49			-		
			19,00	19,99	11,88	12,50			0,22		
Kieselgur	5	7	17,66	17,49	11,04	10,93	10,9	0,32	0,24	0,26	0,01
			16,62	17,00	10,39	10,62			0,27		
			17,89	18,12	11,18	11,33			-		
		28	24,48	24,40	15,30	15,25	15,3	0,13	-		
			24,60	24,36	15,37	15,23			0,26		
			24,15	24,82	15,10	15,51			-		
	15	7	15,04	15,11	9,40	9,44	9,5	0,08	0,26	0,26	0,00
			15,37	15,02	9,61	9,39			0,26		
			15,25	10,14	9,53	6,34			0,26		
		28	17,59	16,85	11,00	10,53	11,0	0,29	0,21		
			18,31	17,81	11,44	11,13			0,22		
			17,20	17,53	10,75	10,95			-		

Tabelle A-1.4: Fortsetzung Tab. A-1.3

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Probenalter [d]	Druckfestigkeit					Wärmeleitfähigkeit			
			Bruchlast		Einzelwert		Mittelwert	Standardabweichung \tilde{s}	Einzelwert	Mittelwert	Standardabweichung \tilde{s}
			F_f [kN]	β_B [MPa]	β_B [MPa]	β_B [MPa]					
Ziegel- mehl	5	7	14,99	15,91	9,37	9,94	8,9	0,41	0,26	0,26	0,00
			13,53	14,86	8,46	9,29			-		
			14,12	13,41	8,83	8,38			0,26		
		28	22,99	21,37	14,37	13,36	14,0	0,66	-		
			23,95	22,19	14,97	13,87			-		
			23,02	20,86	14,39	13,04			0,25		
	15	7	15,40	15,24	9,63	9,53	9,6	0,12	0,28	0,29	0,01
			15,18	15,74	9,49	9,84			-		
			15,22	15,52	9,51	9,70			-		
		28	22,51	22,95	14,07	14,35	14,3	0,12	-		
			20,47	22,88	12,79	14,30			-		
			23,08	22,84	14,42	14,28			0,28		
Dralon- Kurz- schnitt- fasern	5	7	11,70	12,02	7,31	7,51	7,5	0,18	0,20	0,24	0,01
			12,02	12,47	7,51	7,79			0,19		
			12,23	11,60	7,65	7,25			0,23		
		28	17,37	16,74	10,85	10,46	10,6	0,29	-		
			17,07	17,55	10,67	10,97			-		
			16,12	16,90	10,08	10,56			0,25		
	10	28	15,79	17,15	9,87	10,72	10,5	0,34	0,23	0,22	0,00
			17,09	17,47	10,68	10,92			0,22		
			16,59	16,67	10,37	10,42			0,22		
	15	7	10,49	10,40	6,55	6,50	6,5	0,09	-	0,21	0,01
			10,62	10,26	6,64	6,41			0,22		
			10,42	10,18	6,51	6,36			0,22		
28		12,87	13,49	8,04	8,43	8,0	0,31	-			
		13,15	12,74	8,22	7,96			0,20			
		12,63	11,90	7,90	7,44			-			
Glaswolle- Filz (zerkleinert)	5	7	18,22	18,17	11,39	11,36	11,1	0,27	0,23	0,24	0,01
			17,16	18,24	10,73	11,40			0,25		
			17,30	17,82	10,81	11,14			-		
		28	23,93	23,36	14,96	14,60	14,7	0,25	-		
			24,03	23,74	15,02	14,84			-		
			23,38	22,88	14,61	14,30			0,24		
	15	7	17,14	16,61	10,71	10,38	10,5	0,34	-	0,23	0,00
			17,10	15,14	10,69	9,46			-		
			17,36	15,85	10,85	9,91			0,23		
		28	20,10	20,96	12,56	13,10	12,9	0,24	0,23		
			16,03	20,66	10,02	12,91			-		
			20,17	21,00	12,61	13,13			0,23		

Tabelle A-1.5: Fortsetzung Tab. A-1.4

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Probenalter [d]	Druckfestigkeit					Wärmeleitfähigkeit			
			Bruchlast		Einzelwert		Mittelwert	Standardabweichung \tilde{s}	Einzelwert $\lambda_{10, tr}$	Mittelwert	Standardabweichung \tilde{s}
			F_r [kN]		β_B [MPa]						
Polypropylen-Spleissfasern	5	7	20,22	19,26	12,64	12,04	12,4	0,28	-	0,25	0,00
			20,53	18,74	12,83	11,74			0,25		
			19,65	19,66	12,28	12,29			-		
		28	19,72	24,04	12,33	15,02	15,4	0,30	-		
			24,29	25,01	15,18	15,63			0,25		
			24,62	25,36	15,39	15,85			0,25		
	15	7	26,62	25,57	16,64	15,98	16,1	0,34	-	0,27	0,00
			26,24	25,35	16,40	15,84			-		
			25,12	25,25	15,70	15,78			0,27		
		28	31,67	31,21	19,79	19,51	18,9	0,88	0,24		
			28,01	29,92	17,50	18,70			0,27		
			31,65	28,89	19,78	18,06			-		
Glasplättchen	5	7	8,65	8,62	5,40	5,39	5,5	0,11	0,19	0,20	0,01
			8,97	9,09	5,61	5,68			-		
			8,78	8,94	5,49	5,59			0,20		
		28	13,33	14,36	8,33	8,98	8,7	0,29	0,20		
			13,72	14,07	8,58	8,79			-		
			13,38	14,55	8,36	9,09			-		
	15	7	8,70	8,56	5,44	5,35	5,4	0,12	-	0,19	0,01
			8,28	8,81	5,18	5,51			0,19		
			8,52	8,84	5,32	5,52			0,19		
		28	12,67	12,76	7,92	7,98	8,0	0,14	-		
			12,53	13,03	7,83	8,14			0,20		
			12,60	13,16	7,88	8,22			-		

Tabelle A-2.1: Siebanalysen und Feststoffdichten verwendeter Dünnbettmörtel-Säcke „a bis d“. Mit „ x_i “ als Mittelwerte aus insgesamt 18 Einzelbestimmungen (Dünnbettmörtel-Säcke „a bis r“)

Siebfraction / Maschenweite	Masse		Masse		Feststoff- dichte	Volumen		
	x_i	m_{x_i}		Feinanteil		Grobanteil	V_i	
		[μm]	[kg]	[Ma.-%]		$m_{x_1+x_2+x_3}$		$m_{x_4+x_5+x_6}$
				[Ma.-%]		[g/cm ³]		
$x_1 < 63$		5,88	38,11	73	27	3,24	1,82	28,50
$x_2 < 90$		3,42	22,16			3,19	1,07	16,81
$x_3 < 125$		1,97	12,77			3,00	0,66	10,32
$x_4 < 250$		0,66	4,26			2,09	0,31	4,93
$x_5 < 500$		2,86	18,52			1,38	2,07	32,42
$x_6 \geq 500$		0,65	4,18			1,44	0,45	7,02
$\Sigma x_i < 1000$		15,43	100,00	100		2,42	6,37	100,00
$a_1 < 63$		6,34	42,90	78	22	3,02	2,10	31,84
$a_2 < 90$		4,10	27,74			3,02	1,36	20,55
$a_3 < 125$		1,02	6,87			2,81	0,36	5,47
$a_4 < 250$		0,44	3,01			1,90	0,23	3,54
$a_5 < 500$		2,46	16,64			1,11	2,22	33,60
$a_6 \geq 500$		0,42	2,84			1,28	0,33	4,99
$\Sigma a_i < 1000$		14,78	100,00	100		2,24	6,60	100,00
$b_1 < 63$		6,33	42,42	77	23	3,08	2,06	35,18
$b_2 < 90$		3,24	21,73			3,04	1,06	18,21
$b_3 < 125$		1,89	12,70			2,87	0,66	11,28
$b_4 < 250$		0,31	2,07			1,72	0,18	3,06
$b_5 < 500$		2,56	17,17			1,84	1,39	23,79
$b_6 \geq 500$		0,58	3,90			1,18	0,50	8,47
$\Sigma b_i < 1000$		14,91	100,00	100		2,55	5,85	100,00
$c_1 < 63$		5,61	37,11	78	22	3,05	1,84	28,38
$c_2 < 90$		3,67	24,31			3,00	1,23	18,95
$c_3 < 125$		2,46	16,25			2,89	0,85	13,14
$c_4 < 250$		0,29	1,94			1,99	0,15	2,28
$c_5 < 500$		2,46	16,26			1,24	1,98	30,63
$c_6 \geq 500$		0,62	4,13			1,45	0,43	6,63
$\Sigma c_i < 1000$		15,11	100,00	100		2,33	6,48	100,00
$d_1 < 63$		6,62	44,01	80	20	3,07	2,16	33,02
$d_2 < 90$		3,10	20,60			3,02	1,02	15,67
$d_3 < 125$		2,26	15,01			2,80	0,81	12,35
$d_4 < 250$		0,22	1,45			1,66	0,13	2,01
$d_5 < 500$		2,43	16,15			1,16	2,10	32,11
$d_6 \geq 500$		0,42	2,78			1,32	0,32	4,83
$\Sigma d_i < 1000$		15,04	100,00	100		2,30	6,54	100,00

Tabelle A-2.2: Fortsetzung Tab. A-2.1; Siebanalysen und Feststoffdichten verwendeter Dünnbettmörtel-Säcke „e bis j“

Siebfraction / Maschenweite	Masse		Masse		Feststoff- dichte	Volumen		
	x_i	m_{x_i}		Feinanteil		Grobanteil	V_i	
		$m_{x_1+x_2+x_3}$	$m_{x_4+x_5+x_6}$	[Ma.-%]		ρ_i	[l]	[Vol.-%]
[μm]	[kg]	[Ma.-%]	[Ma.-%]		[g/cm ³]	[l]	[Vol.-%]	
$e_1 < 63$	4,67	52,51	78	22	3,06	1,53	39,15	
$e_2 < 90$	2,00	22,50			2,99	0,67	17,18	
$e_3 < 125$	0,25	2,83			2,50	0,10	2,58	
$e_4 < 250$	0,17	1,93			1,66	0,10	2,66	
$e_5 < 500$	1,45	16,28			1,18	1,23	31,61	
$e_6 \geq 500$	0,35	3,95			1,32	0,27	6,83	
$\Sigma e_i < 1000$	8,89	100,00	100		2,28	3,90	100,00	
$f_1 < 63$	8,37	41,78	74	26	3,05	2,74	29,53	
$f_2 < 90$	3,82	19,07			3,02	1,27	13,64	
$f_3 < 125$	2,61	13,02			2,83	0,92	9,92	
$f_4 < 250$	0,45	2,23			1,67	0,27	2,89	
$f_5 < 500$	3,81	19,00			1,13	3,37	36,28	
$f_6 \geq 500$	0,98	4,89			1,36	0,72	7,74	
$\Sigma f_i < 1000$	20,04	100,00	100		2,16	9,29	100,00	
$g_1 < 63$	7,06	46,31	74	26	3,06	2,31	34,00	
$g_2 < 90$	2,83	18,57			3,04	0,93	13,72	
$g_3 < 125$	1,46	9,57			2,89	0,51	7,43	
$g_4 < 250$	0,77	5,03			2,07	0,37	5,45	
$g_5 < 500$	2,34	15,36			1,20	1,95	28,65	
$g_6 \geq 500$	0,79	5,17			1,08	0,73	10,75	
$\Sigma g_i < 1000$	15,25	100,00	100		2,24	6,80	100,00	
$h_1 < 63$	2,95	19,72	67	33	3,05	0,97	13,85	
$h_2 < 90$	3,71	24,76			3,04	1,22	17,47	
$h_3 < 125$	3,37	22,49			2,96	1,14	16,27	
$h_4 < 250$	1,42	9,48			2,59	0,55	7,85	
$h_5 < 500$	2,59	17,29			1,13	2,29	32,70	
$h_6 \geq 500$	0,94	6,26			1,13	0,83	11,86	
$\Sigma h_i < 1000$	14,98	100,00	100		2,14	6,99	100,00	
$i_1 < 63$	8,55	57,38	74	26	3,06	2,80	44,36	
$i_2 < 90$	1,72	11,55			2,98	0,58	9,17	
$i_3 < 125$	0,79	5,30			2,65	0,30	4,74	
$i_4 < 250$	0,45	3,04			1,79	0,25	4,02	
$i_5 < 500$	2,88	19,29			1,43	2,01	31,94	
$i_6 \geq 500$	0,51	3,44			1,41	0,36	5,78	
$\Sigma i_i < 1000$	14,91	100,00	100		2,36	6,31	100,00	
$j_1 < 63$	7,50	50,44	74	26	3,12	2,41	37,83	
$j_2 < 90$	2,42	16,25			3,01	0,80	12,63	
$j_3 < 125$	1,09	7,31			2,86	0,38	5,98	
$j_4 < 250$	0,66	4,41			1,92	0,34	5,36	
$j_5 < 500$	2,68	18,04			1,30	2,07	32,48	
$j_6 \geq 500$	0,53	3,55			1,45	0,36	5,73	
$\Sigma j_i < 1000$	14,87	100,00	100		2,34	6,36	100,00	

Tabelle A-2.3: Fortsetzung Tab. A-2.2; Siebanalysen und Feststoffdichten verwendeter Dünnbettmörtel-Säcke „k bis p“

Siebfraktion / Maschenweite	Masse		Masse		Feststoff- dichte	Volumen			
	x_i	m_{x_i}		Feinanteil		Grobanteil	ρ_i	V_i	
		[μm]	[kg]	[Ma.-%]		$m_{x_1+x_2+x_3}$		$m_{x_4+x_5+x_6}$	[g/cm ³]
$k_1 < 63$		3,31	23,68	71	29	3,09	1,07	17,48	
$k_2 < 90$		4,47	31,97			3,07	1,46	23,81	
$k_3 < 125$		2,08	14,89			2,93	0,71	11,59	
$k_4 < 250$		0,49	3,53			1,99	0,25	4,05	
$k_5 < 500$		3,04	21,71			1,34	2,27	37,02	
$k_6 \geq 500$		0,59	4,23			1,60	0,37	6,04	
$\Sigma k_i < 1000$		13,98	100,00	100		2,28	6,12	100,00	
$l_1 < 63$		5,57	45,57	68	32	3,04	1,83	34,25	
$l_2 < 90$		1,84	15,08			2,98	0,62	11,55	
$l_3 < 125$		0,93	7,63			2,77	0,34	6,29	
$l_4 < 250$		1,00	8,19			2,26	0,44	8,26	
$l_5 < 500$		2,36	19,29			1,32	1,79	33,42	
$l_6 \geq 500$		0,52	4,24			1,55	0,33	6,24	
$\Sigma l_i < 1000$		12,22	100,00	100		2,28	5,35	100,00	
$m_1 < 63$		6,84	45,91	68	32	3,03	2,26	34,80	
$m_2 < 90$		2,30	15,42			2,95	0,78	11,99	
$m_3 < 125$		1,03	6,91			2,76	0,37	5,74	
$m_4 < 250$		1,15	7,69			2,30	0,50	7,65	
$m_5 < 500$		2,88	19,34			1,49	1,94	29,79	
$m_6 \geq 500$		0,70	4,72			1,08	0,65	10,02	
$\Sigma m_i < 1000$		14,91	100,00	100		2,29	6,50	100,00	
$n_1 < 63$		3,31	23,68	71	29	3,09	1,07	17,48	
$n_2 < 90$		4,47	31,97			3,07	1,46	23,81	
$n_3 < 125$		2,08	14,89			2,93	0,71	11,59	
$n_4 < 250$		0,49	3,53			1,99	0,25	4,05	
$n_5 < 500$		3,04	21,71			1,34	2,27	37,02	
$n_6 \geq 500$		0,59	4,23			1,60	0,37	6,04	
$\Sigma n_i < 1000$		13,98	100,00	100		2,28	6,12	100,00	
$o_1 < 63$		3,73	25,80	72	28	3,05	1,22	19,13	
$o_2 < 90$		4,82	33,31			3,01	1,60	25,01	
$o_3 < 125$		1,84	12,74			2,89	0,64	9,97	
$o_4 < 250$		0,65	4,52			1,68	0,39	6,08	
$o_5 < 500$		2,80	19,37			1,30	2,15	33,58	
$o_6 \geq 500$		0,62	4,26			1,55	0,40	6,23	
$\Sigma o_i < 1000$		14,46	100,00	100		2,26	6,40	100,00	
$p_1 < 63$		3,72	26,76	71	29	3,04	1,22	19,51	
$p_2 < 90$		2,75	19,77			3,03	0,91	14,45	
$p_3 < 125$		3,42	24,62			2,91	1,18	18,76	
$p_4 < 250$		0,50	3,56			1,94	0,26	4,07	
$p_5 < 500$		2,95	21,21			1,26	2,34	37,29	
$p_6 \geq 500$		0,57	4,08			1,52	0,37	5,93	
$\Sigma p_i < 1000$		13,91	100,00	100		2,22	6,28	100,00	

Tabelle A-2.4: Fortsetzung Tab. A-2.3; Siebanalysen und Feststoffdichten verwendeter Dünnbettmörtel-Säcke „q bis r“

Siebfraction / Maschenweite	Masse		Masse		Feststoff- dichte	Volumen		
	m_{xi}		Feinanteil	Grobanteil		ρ_i	V_i	
	x_i		$m_{x1+x2+x3}$	$m_{x4+x5+x6}$			[g/cm ³]	[l]
[μm]	[kg]	[Ma.-%]	[Ma.-%]					
q ₁ < 63	6,84	45,91	68	32	3,03	2,26	34,80	
q ₂ < 90	2,30	15,42			2,95	0,78	11,99	
q ₃ < 125	1,03	6,91			2,76	0,37	5,74	
q ₄ < 250	1,15	7,69			2,30	0,50	7,65	
q ₅ < 500	2,88	19,34			1,49	1,94	29,79	
q ₆ ≥ 500	0,70	4,72			1,08	0,65	10,02	
$\Sigma q_i < 1000$	14,91	100,00	100		2,29	6,50	100,00	
r ₁ < 63	2,64	17,40	73	27	3,08	0,86	12,92	
r ₂ < 90	4,57	30,11			3,06	1,49	22,50	
r ₃ < 125	3,90	25,69			2,97	1,31	19,81	
r ₄ < 250	0,56	3,70			2,12	0,26	3,98	
r ₅ < 500	2,97	19,57			1,26	2,36	35,63	
r ₆ ≥ 500	0,54	3,54			1,57	0,34	5,16	
$\Sigma r_i < 1000$	15,17	100,00	100		2,29	6,63	100,00	

Tabelle A-3: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Feststoffdichten sowie berechnete Standardabweichungen vom ungesiebteten Dünnbettmörtel-Pulver sowie Zusatzstoffen

Nullprobe / Zusatzstoff	Feststoffdichte				Standardabweichung \tilde{s}
	Einzelwert			Mittelwert	
	ρ_i				
	[g/cm ³]				
	Probe 1	Probe 2	Probe 3		
Dünnbettmörtel-Pulver ungesiebt	2,2770	2,2768	2,2641	2,27	0,0074
Hohlgaskugeln Sorte I	0,1203	0,1203	0,1202	0,12	0,0001
Hohlgaskugeln Sorte II	0,4747	0,4731	0,4701	0,47	0,0023
Phenolharzkugeln	0,6110	0,6180	0,6162	0,62	0,0036
Kaolin (China Clay)	2,6476	2,6477	2,6488	2,65	0,0007
Expandiertes Alumosilikat Sorte I	0,7899	0,7899	0,7891	0,79	0,0005
Expandiertes Alumosilikat Sorte II	0,8628	0,8526	0,8596	0,86	0,0052
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	0,8210	0,8156	0,8194	0,82	0,0028
Kieselgur	2,2468	2,2433	2,2452	2,25	0,0018
Ziegemehl	2,4443	2,4437	2,4427	2,44	0,0008
Dralon-Kurzschnittfasern	1,1819	1,1811	1,1811	1,18	0,0005
Glaswolle-Filz (zerkleinert)	2,6540	2,6667	2,6897	2,67	0,0181
Polypropylen-Spleissfasern	0,9296	0,9372	0,9197	0,93	0,0088
Glasplättchen	2,1975	2,1950	2,2000	2,20	0,0025
Glashohlkugeln	0,1315	0,1315	0,1313	0,13	0,0001
Schmelzkammer-Granulat	2,6233	2,6227	2,6262	2,62	0,0019
Bimsmehl Sorte I	2,3947	2,4069	2,4061	2,40	0,0068
Bimsmehl Sorte II	2,3277	2,3281	2,3235	2,33	0,0025
Expandierter Perlit	2,1911	2,2032	2,2160	2,20	0,0125
Pyrogene Kieselsäure	1,9406	1,9657	1,9667	1,96	0,0148
Vermiculit	2,0113	2,0146	2,0129	2,01	0,0017

Tabelle A-4: Einzel- und berechnete Mittelwerte der spezifischen Oberflächen sowie berechnete Standardabweichungen von ungesiebttem Dünnbettmörtel-Pulver und Siebrückständen sowie Zusatzstoffen

Nullprobe / Zusatzstoff	Spezifische Oberfläche nach BET			Standard- abweichung \bar{s}
	Einzelwert		Mittelwert	
	a_{si}			
	Probe 1	Probe 2	[m ² /g]	
Dünnbettmörtel-Pulver ungesiebt	1,623	1,577	1,60	0,033
x ₁ < 63	1,251	1,269	1,26	0,013
x ₂ < 90	1,268	1,360	1,31	0,065
x ₃ < 125	1,490	1,445	1,47	0,032
x ₄ < 250	2,026	2,035	2,03	0,006
x ₅ < 500	1,269	1,269	1,27	0,000
x ₆ ≥ 500	2,800	2,748	2,77	0,037
Hohlglaskugeln Sorte I	3,163	3,258	3,21	0,067
Hohlglaskugeln Sorte II	4,439	4,128	4,28	0,220
Phenolharzkugeln	-	-	-	-
Kaolin (China Clay)	12,471	12,602	12,54	0,093
Expandiertes Alumosilikat Sorte I	2,048	2,030	2,04	0,013
Expandiertes Alumosilikat Sorte II	2,386	2,275	2,33	0,078
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	3,097	2,673	2,89	0,300
Kieselgur	323,692	326,402	325,05	1,916
Ziegelmehl	10,919	10,792	10,86	0,090
Dralon-Kurzschnittfasern	-	-	-	-
Glaswolle-Filz (zerkleinert)	-	-	-	-
Polypropylen-Spleissfasern	-	-	-	-
Glasplättchen	0,744	0,759	0,75	0,011
Glashohlkugeln	2,093	1,886	1,99	0,146
Schmelzkammer-Granulat	0,563	0,546	0,55	0,012
Bimsmehl Sorte I	2,469	2,509	2,49	0,028
Bimsmehl Sorte II	7,391	7,218	7,30	0,122
Expandierter Perlit	2,835	3,013	2,92	0,126
Pyrogene Kieselsäure	181,549	181,810	181,68	0,185
Vermiculit	8,159	8,367	8,26	0,147

Tabelle A-5: Einzelwerte sowie berechneter Mittelwert der Frischmörtel-Luftgehalte in den verwendeten Dünnbettmörtel-Säcken „a bis r“

Dünnbettmörtel-Säcke x_i	Luftgehalt [Vol.-%]
a	21,50
b	22,00
c	21,00
d	21,50
e	20,00
f	20,50
g	22,00
h	21,50
i	18,00
j	18,50
k	19,50
l	21,00
m	19,00
n	18,00
o	21,50
p	19,50
q	20,50
r	19,50
Mittelwert	20,28

Tabelle A-6: Dünnbettmörtel-Rezepturen des Zusatzstoff-Screenings (Stoffraumrechnung) von Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierten Dünnbettmörtel-Mischungen mit jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff bei angepassten w/m-Verhältnissen. Die Zielmassen (Trockengewichte) sind jeweils auf exakt 1 kg berechnet sowie in [Ma.-%] angegeben

Siebfraktion Maschen- weite	Dünnbettmörtel Nullprobe		Expandiertes Alumosilikat Sorte II		Glashohl- kugeln		Bimsmehl Sorte I		Vermiculit		
	-		10 Vol.-%								
	w/m-Verhältnis										
	0,58		0,60		0,62		0,56		0,57		
x_i [μm]	Masse m_{xi}										
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	
$x_1 < 63$	380,83	38,08	390,66	39,07	403,14	40,31	366,71	36,67	372,50	37,25	
$x_2 < 90$	221,50	22,15	227,22	22,72	234,48	23,45	213,29	21,33	216,65	21,67	
$x_3 < 125$	127,58	12,76	130,88	13,09	135,06	13,51	122,85	12,29	124,79	12,48	
$x_4 < 250$	42,75	4,27	34,00	3,40	35,08	3,51	31,91	3,19	32,42	3,24	
$x_5 < 500$	185,23	18,52	147,30	14,73	152,01	15,20	138,27	13,83	140,45	14,05	
$x_6 \geq 500$	42,10	4,21	33,47	3,35	34,54	3,45	31,42	3,14	31,92	3,19	
Zusatzstoff	-	-	36,48	3,65	5,68	0,57	95,55	9,55	81,27	8,13	
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	
Wasser	583,33		598,39		617,51		561,70		570,57		
Siebfraktion Maschen- weite	Schmelz- kammer- Granulat		Bimsmehl Sorte II		Expandierter Perlit		Expandiertes Alumosilikat Sorte III		Pyrogene Kieselsäure		
	10 Vol.-%										
	w/m-Verhältnis										
	0,56		0,56		0,57		0,60		0,86		
x_i [μm]	Masse m_{xi}										
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	
$x_1 < 63$	363,53	36,35	367,74	36,77	369,65	36,97	391,32	39,13	373,25	37,32	
$x_2 < 90$	211,44	21,14	213,89	21,39	215,00	21,50	227,61	22,76	217,09	21,71	
$x_3 < 125$	121,79	12,18	123,20	12,32	123,84	12,38	131,10	13,11	125,04	12,50	
$x_4 < 250$	31,64	3,16	32,00	3,20	32,17	3,22	34,05	3,41	32,48	3,25	
$x_5 < 500$	137,07	13,71	138,66	13,87	139,38	13,94	147,55	14,76	140,73	14,07	
$x_6 \geq 500$	31,15	3,11	31,51	3,15	31,67	3,17	33,53	3,35	31,98	3,20	
Zusatzstoff	103,40	10,34	93,01	9,30	88,28	8,83	34,84	3,48	79,42	7,94	
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	
Wasser	556,83		563,28		566,21		599,41		860,00		

Tabelle A-7.1: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper sowie berechnete Massenverluste nach 28 Tagen in [Ma.-%] für abgebundene Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masse- verlust 28 d [Ma.-%]
			2 d	7 d	14 d	28 d	
			m _x [g]				
Dünnbettmörtel	Null- probe	0,58	269,46	244,86	-	-	19,96
			269,72	245,12	-	-	
			276,56	251,35	-	-	
			278,60	251,52	243,98	221,63	
			278,66	250,88	243,35	222,77	
			269,24	241,14	233,91	212,84	
Mittelwerte			273,71	247,48	240,41	219,08	
Expandiertes Aluminosilikat Sorte II	10	0,60	297,80	249,40	-	-	18,55
			298,20	247,60	-	-	
			298,40	250,20	-	-	
			290,60	251,80	243,47	239,36	
			293,30	255,80	245,98	240,64	
			293,50	256,20	246,42	241,55	
Mittelwerte			295,30	251,83	245,29	240,52	
Glashohlkugeln	10	0,62	274,08	250,20	-	-	18,18
			273,42	249,39	-	-	
			274,40	250,30	-	-	
			266,87	240,97	226,67	216,72	
			267,40	243,59	232,99	223,51	
			267,79	241,27	233,04	224,12	
Mittelwerte			270,66	245,95	230,90	221,45	
Bismehl Sorte I	10	0,56	313,10	273,20	-	-	18,81
			315,70	276,40	-	-	
			313,30	276,40	-	-	
			315,00	273,70	263,97	257,08	
			314,80	272,10	260,29	255,03	
			312,80	271,50	261,84	253,00	
Mittelwert			314,12	273,88	262,03	255,04	
Vermiculit	10	0,57	323,70	279,90	-	-	21,70
			323,90	275,80	-	-	
			324,60	279,20	-	-	
			309,70	267,40	253,82	249,69	
			307,40	265,60	253,98	247,69	
			308,00	264,50	253,01	245,44	
Mittelwerte			316,22	272,07	253,60	247,61	

Tabelle A-7.2: Fortsetzung Tab. A-7.1

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masse- verlust 28 d [Ma.-%]
			2 d	7 d	14 d	28 d	
			m _x [g]				
Schmelzkammer-Granulat	10	0,56	308,80	264,10	-	-	17,26
			307,30	260,50	-	-	
			310,20	262,90	-	-	
			319,90	277,80	266,48	260,97	
			319,70	280,70	267,88	261,30	
			317,70	277,50	263,68	256,93	
Mittelwerte			313,93	270,58	266,01	259,73	
Bimsmehl Sorte II	10	0,56	320,30	278,30	-	-	18,13
			317,00	277,00	-	-	
			320,20	278,80	-	-	
			326,40	284,60	274,83	264,88	
			326,60	284,00	274,90	263,51	
			325,60	282,20	271,07	264,20	
Mittelwerte			322,68	280,82	273,60	264,20	
Expandierter Perlit	10	0,57	338,40	298,60	-	-	17,51
			339,10	297,00	-	-	
			334,60	291,90	-	-	
			341,20	300,70	289,04	280,38	
			339,70	302,30	291,41	279,14	
			339,00	298,90	287,02	278,59	
Mittelwerte			338,67	298,23	289,16	279,37	
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	10	0,60	243,80	217,80	-	-	18,80
			243,30	217,47	-	-	
			243,80	217,17	-	-	
			251,80	218,90	212,98	201,80	
			253,60	218,80	216,05	201,90	
			253,30	216,50	212,21	201,10	
Mittelwerte			248,27	218,07	213,75	201,60	
Pyrogene Kieselsäure	10	0,86	312,20	266,40	-	-	24,18
			322,60	278,20	-	-	
			321,40	277,30	-	-	
			324,00	271,50	251,55	243,45	
			324,90	275,70	258,43	247,35	
			322,20	274,90	256,27	239,84	
Mittelwerte			321,22	274,00	255,42	243,55	

Tabelle A-8.1: Einzel- und berechnete Mittelwerte der spezifischen Oberflächen sowie berechnete Standardabweichungen abgebundener Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierter Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Spezifische Oberfläche nach BET			
			Einzelwert		Mittelwert	Standardabweichung
			a_s			
			[m ² /g]		s̄	
Probe 1	Probe 2					
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	17,456	17,228	17,34	0,1140
Expandiertes Aluminosilikat Sorte II	10	0,60	9,565	-	9,57	-
Glashohlkugeln		0,62	8,885	-	8,89	-
Bimsmehl Sorte I		0,56	12,254	-	12,25	-
Vermiculit		0,57	8,320	-	8,32	-
Schmelzkammer-Granulat		0,56	9,493	-	9,49	-
Bimsmehl Sorte II		0,56	10,089	-	10,09	-
Expandierter Perlit		0,57	8,298	9,172	8,74	0,3568
Expandiertes Aluminosilikat Sorte III		0,60	17,334	-	17,33	-
Pyrogene Kieselsäure		0,86	18,010	18,026	18,02	0,0065

Tabelle A-8.2: Massen und Abmaße (Längen, Breiten und Höhen von Dünnbettmörtel-Normprismen), berechnete Volumina und Trockenrohdichten; Schalllaufzeiten; berechnete Einzel- und Mittelwerte dynamischer E-Moduln von abgebundenen Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierten Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Probenalter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Trockenrohdichte	Schalllaufzeit	E-Modul	
											Einzelwert	Mittelwert
	[Vol.-%]		[d]	m	l	b	h	V	ρ	t	$E_{dyn.}$	
				[g]		[mm]		[cm ³]	[g/cm ³]	[μ s]	[GPa]	
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	7	244,86	160,05	40,02	40,71	260,76	0,94	68,2	5,17	5,3
				245,12	160,05	40,11	40,42	259,48	0,94	68,3	5,19	
				251,35	160,03	40,21	40,32	259,45	0,97	67,5	5,45	
			28	221,63	159,83	39,92	39,60	252,66	0,88	69,5	4,64	4,4
				222,77	159,84	40,64	40,75	264,68	0,84	71,0	4,27	
				212,84	159,56	39,87	40,39	256,95	0,83	70,0	4,30	
Expandiertes Alumo-silikat Sorte II		0,60	7	249,40	160,57	39,99	39,74	255,18	0,98	67,9	5,47	5,5
				247,60	160,06	39,97	40,06	256,29	0,97	67,4	5,45	
				250,20	159,94	40,04	40,11	256,86	0,97	67,7	5,44	
			28	239,36	159,77	39,87	40,49	257,92	0,93	67,2	5,25	5,3
				240,64	159,86	39,92	40,64	259,35	0,93	67,0	5,28	
				241,55	160,31	39,97	40,60	260,15	0,93	67,4	5,25	
Glashohlkugeln		0,62	7	250,20	160,46	40,24	40,72	262,93	0,95	69,3	5,10	5,0
				249,39	160,13	40,04	40,55	259,99	0,96	70,0	5,02	
				250,30	158,12	40,30	40,38	257,31	0,97	69,9	4,98	
			28	216,72	159,65	39,87	40,15	255,56	0,85	69,2	4,51	4,6
				223,51	159,89	39,93	40,15	256,33	0,87	70,0	4,55	
				224,12	160,03	40,57	40,57	263,40	0,85	68,6	4,63	
Bimsmehl Sorte I	10	0,56	7	273,20	160,29	39,82	40,97	261,50	1,04	66,0	6,16	6,3
				276,40	160,20	40,01	40,99	262,73	1,05	65,0	6,39	
				276,40	160,27	40,10	40,20	258,36	1,07	65,6	6,39	
			28	257,08	160,05	39,83	39,96	254,74	1,01	67,1	5,74	5,7
				255,03	159,86	39,96	40,35	257,76	0,99	67,1	5,62	
				253,00	159,82	39,90	39,70	253,16	1,00	66,6	5,75	
Vermiculit		0,57	7	279,90	160,19	40,03	40,28	258,29	1,08	67,9	6,03	6,1
				275,80	160,22	40,00	40,26	258,02	1,07	67,9	5,95	
				279,20	159,93	40,05	39,83	255,12	1,09	67,2	6,20	
			28	249,69	159,69	39,87	39,67	252,57	0,99	68,1	5,44	5,4
				247,69	159,58	39,85	39,14	248,90	1,00	67,4	5,58	
				245,44	159,69	39,89	39,59	252,19	0,97	68,8	5,24	
Schmelzkammer-Granulat		0,56	7	264,10	160,11	40,02	39,70	254,38	1,04	65,9	6,13	6,2
				260,50	160,45	39,97	39,86	255,63	1,02	65,0	6,21	
				262,90	160,39	39,93	40,25	257,78	1,02	65,5	6,12	
			28	260,97	160,04	39,87	40,53	258,61	1,01	66,2	5,90	5,7
				261,30	159,55	39,99	40,39	257,70	1,01	68,0	5,58	
				256,93	159,91	39,96	40,12	256,37	1,00	67,2	5,67	

Tabelle A-8.3: Fortsetzung Tab. A-8.2

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Trocken- roh- dichte	Schall- lauf- zeit	E-Modul		
				m	l	b	h	V	ρ	t	Einzel- wert	Mittel- wert	
	[Vol.-%]		[d]	[g]	[mm]			[cm ³]	[g/cm ³]	[μ s]	E _{dyn.} [GPa]		
Bimsmehl Sorte II	10	0,56	7	278,30	159,99	40,02	39,92	255,60	1,09	64,9	6,62	6,6	
				277,00	160,20	40,07	39,89	256,06	1,08	65,4	6,49		
				278,80	160,42	40,00	40,14	257,57	1,08	65,1	6,57		
			28	264,88	160,02	39,91	39,81	254,24	1,04	64,3	6,45		6,4
				263,51	159,82	39,87	39,64	252,59	1,04	64,7	6,37		
				264,20	159,94	40,11	39,84	255,58	1,03	65,0	6,26		
Expandier- ter Perlit		0,57	7	298,60	159,90	40,14	39,58	254,04	1,18	61,1	8,05	7,7	
				297,00	159,92	40,05	39,74	254,53	1,17	62,6	7,62		
				291,90	159,84	40,21	39,91	256,51	1,14	62,0	7,56		
			28	280,38	159,85	39,93	39,78	253,91	1,10	61,5	7,46		7,5
				279,14	159,66	39,91	39,95	254,56	1,10	60,7	7,59		
				278,59	159,78	39,86	39,79	253,42	1,10	61,4	7,44		
Expandier- tes Alumo- silikat Sorte III	0,60	7	217,80	159,84	40,22	39,20	252,01	0,86	73,1	4,13	4,1		
			211,47	160,11	39,93	39,01	249,40	0,85	73,1	4,07			
			217,17	160,06	39,76	39,76	253,03	0,86	73,7	4,05			
		28	201,80	159,82	40,12	39,60	253,91	0,79	70,5	4,08		4,0	
			201,90	160,06	39,93	39,26	250,92	0,80	72,0	3,98			
			201,10	159,95	40,15	39,05	250,78	0,80	71,1	4,06			
Pyrogene Kiesel- säure	0,86	7	266,40	160,07	39,92	39,72	253,81	1,05	70,5	5,41	5,6		
			278,20	159,49	39,79	40,47	256,83	1,08	69,1	5,77			
			277,30	160,36	39,90	40,48	259,01	1,07	69,3	5,73			
		28	243,45	159,54	39,78	39,94	253,48	0,96	73,0	4,59		4,9	
			247,35	159,70	39,80	40,27	255,96	0,97	70,0	5,03			
			239,84	159,14	39,77	40,15	254,11	0,94	69,5	4,95			

Tabelle A-8.4: Berechnete Einzel- und Mittelwerte der Drei-Punkt-Biegezugfestigkeiten und Druckfestigkeiten sowie berechnete Standardabweichungen von Druckfestigkeiten von abgebundenen Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierten Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings (Stoffraumrechnung). Markierte (durchgestrichene Einzelwerte) weichen um mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert ab und wurden verworfen

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Probenalter [d]	Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit			Druckfestigkeit					
				Bruchlast F_f [kN]	Einzelwert β_B [MPa]	Mittelwert	Bruchlast F_f [kN]		Einzelwert β_D [MPa]		Mittelwert	Standardabweichung \bar{s}
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	7	0,63	1,48	1,3	12,41	12,87	7,76	8,04	8,0	0,41
				0,55	1,28		11,95	12,27	7,47	7,67		
				0,53	1,23		13,25	13,93	8,28	8,70		
			28	0,88	2,05	2,5	8,74	16,33	5,46	10,20	10,3	0,28
				1,16	2,72		16,78	15,73	10,49	9,83		
				1,14	2,67		17,05	16,46	10,66	10,29		
Expandiertes Aluminosilikat Sorte II	0,60	0,60	7	0,45	1,05	1,2	17,34	17,14	10,84	10,71	11,0	0,22
				0,50	1,16		18,08	12,64	11,30	7,90		
				0,58	1,36		17,30	17,78	10,81	11,11		
			28	1,46	3,40	3,0	18,65	17,95	11,66	11,22	11,7	0,29
				1,29	3,02		19,01	19,33	11,88	12,08		
				1,12	2,62		18,19	18,72	11,37	11,70		
Glashohlkugeln	0,62	0,62	7	0,87	2,04	1,8	10,85	11,97	6,78	7,48	6,8	0,42
				0,73	1,71		9,03	10,06	5,64	6,29		
				0,70	1,64		11,22	10,32	7,01	6,45		
			28	1,27	2,96	2,3	15,60	14,74	9,75	9,21	9,6	0,21
				0,84	1,96		15,75	15,42	9,84	9,64		
				0,84	1,97		15,67	15,35	9,79	9,59		
Bimsmehl Sorte I	10	0,56	7	0,75	1,75	1,8	11,48	17,65	7,47	11,03	12,0	0,77
				0,85	1,99		20,37	17,61	12,73	11,01		
				0,76	1,79		19,76	20,22	12,35	12,64		
			28	1,62	3,78	3,4	23,38	22,85	14,61	14,28	14,5	0,32
				1,66	3,88		23,23	22,91	14,52	14,32		
				1,11	2,59		24,03	22,35	15,02	13,97		
Vermiculit	0,57	0,57	7	0,85	1,98	1,9	19,23	18,89	12,02	11,81	11,9	0,07
				0,77	1,79		19,13	18,92	11,96	11,83		
				0,81	1,90		19,09	18,99	11,93	11,87		
			28	1,53	3,58	3,5	18,16	20,49	11,35	12,80	12,0	0,60
				1,48	3,47		20,04	17,74	12,53	11,09		
				1,43	3,34		19,41	19,11	12,13	11,94		
Schmelzkammergranulat	0,56	0,56	7	0,73	1,71	1,6	18,01	17,62	11,25	11,01	11,2	0,08
				0,79	1,84		17,78	17,95	11,11	11,22		
				0,54	1,27		12,67	17,84	7,92	11,15		
			28	1,48	3,47	3,7	19,70	21,97	12,34	13,73	14,2	0,28
				1,94	4,55		22,92	23,37	14,33	14,60		
				1,29	3,02		22,88	22,84	14,30	14,28		

Tabelle A-8.5: Fortsetzung Tab. A-8.4

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter [d]	Drei-Punkt- Biegezugfestigkeit			Druckfestigkeit					
				Bruch- last F _f [kN]	Einzel- wert β _B [MPa]	Mittel- wert	Bruchlast		Einzelwert		Mittel- wert	Stand- abweichung s̄
							F _f [kN]	β _D [MPa]				
Bimsmehl Sorte II	10	0,56	7	0,70	1,65	1,6	21,30	20,79	13,31	12,99	12,9	0,26
				0,51	1,18		20,16	20,21	12,60	12,63		
				0,90	2,09		21,06	20,73	13,16	12,96		
			28	1,67	3,90	4,1	24,39	25,43	15,24	15,89	15,1	0,54
				1,79	4,18		22,74	21,85	14,21	13,65		
				1,78	4,17		24,12	24,49	15,07	15,31		
Expandier- ter Perlit	10	0,57	7	0,86	2,01	1,9	25,99	27,36	16,24	17,10	16,9	0,48
				0,98	2,28		27,95	20,38	17,47	12,74		
				0,60	1,39		26,14	27,46	16,34	17,16		
			28	2,32	5,44	5,6	32,74	32,97	20,46	20,61	20,5	0,31
				2,37	5,55		33,31	33,04	20,82	20,65		
				2,44	5,70		32,92	31,76	20,58	19,85		
Expandier- tes Alumo- silikat Sorte III	10	0,60	7	0,46	1,07	1,0	10,44	11,75	6,53	7,35	7,2	0,30
				0,37	0,87		11,75	11,42	7,34	7,14		
				0,44	1,03		10,53	11,79	6,58	7,37		
			28	1,31	3,06	2,7	14,78	15,05	9,24	9,41	9,0	0,35
				1,03	2,41		13,71	14,85	8,57	9,28		
				1,16	2,72		13,64	14,61	8,53	9,13		
Pyrogene Kiesel- säure	10	0,86	7	0,61	1,44	1,2	13,68	17,85	8,55	11,16	8,7	0,53
				0,39	0,90		13,08	14,66	8,18	9,16		
				0,52	1,21		12,91	15,03	8,07	9,39		
			28	1,12	2,63	2,0	19,86	18,18	12,41	11,36	11,9	0,70
				0,79	1,85		16,97	18,08	10,64	11,30		
				0,68	1,60		20,26	18,46	12,66	11,54		

Tabelle A-8.6: Massen und Abmaße (Längen, Breiten und Höhen von Dünnbettmörtel-Prüfkörpern zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten), Einzel- und Mittelwerte sowie berechnete Standardabweichungen von Wärmeleitfähigkeiten sowie berechnete Einzel- und Mittelwerte von Trockenrohdichten abgebundener Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierter Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Wärmeleitfähigkeit			Trocken- rohdichte	
								Einzel- wert	Mittel- wert	Stan- dard- abwei- chung	Einzel- wert	Mittel- wert
								$\lambda_{10, tr.}$			ρ	
[Vol.-%]	[d]	[g]	[mm]	[W/(m·K)]	[g/cm ³]							
Dünnbett- mörtel	Null- probe	0,58	7	218,17	100,48	100,13	22,13	0,224	0,21	0,01	0,98	0,85
				196,70	99,33	99,33	24,92	0,199			0,80	
				211,91	98,45	98,20	26,62	0,200			0,82	
			137,05	99,10	99,09	15,82	0,199	0,88				
			225,58	102,05	102,52	26,51	0,210	0,82				
			193,71	101,65	101,66	22,82	0,204	0,81				
Expandier- tes Alumo- silikat Sorte II	0,60	7	251,50	99,64	99,54	29,38	0,223	0,22	0,00	0,87	0,85	
			224,17	100,49	100,38	25,91	0,221			0,86		
			260,74	99,14	99,35	30,79	0,229			0,85		
		223,72	99,98	99,97	26,46	0,216	0,85					
		246,07	101,91	101,76	28,15	0,227	0,84					
		240,74	102,64	102,47	27,07	0,223	0,84					
Glashohl- kugeln	0,62	7	206,02	100,07	100,39	25,83	0,209	0,22	0,01	0,80	0,81	
			238,93	99,54	99,56	29,38	0,221			0,83		
			199,97	98,30	99,05	25,04	0,216			0,82		
		206,36	99,43	99,15	25,62	0,213	0,81					
		194,42	99,65	99,73	23,82	0,225	0,82					
		191,95	99,32	99,26	24,82	0,206	0,78					
Bimsmehl Sorte I	10	0,56	7	257,91	100,58	100,34	27,40	0,231	0,23	0,00	0,92	0,92
				259,24	102,95	102,74	26,85	0,237			0,92	
				267,56	102,17	102,08	27,81	0,238			0,93	
		232,36	98,49	98,40	25,95	0,234	0,93					
		252,09	102,16	102,00	26,19	0,232	0,90					
		266,68	100,01	99,90	29,02	0,233	0,93					
Vermiculit	0,57	7	257,57	102,27	102,15	26,30	0,234	0,23	0,01	0,94	0,93	
			242,67	99,67	99,61	26,03	0,237			0,94		
			256,15	101,89	101,32	26,27	0,240			0,94		
		233,81	100,53	100,31	25,33	0,231	0,92					
		224,69	98,56	98,44	25,58	0,225	0,91					
		260,26	99,22	99,51	28,65	0,229	0,92					
Schmelz- kammer- Granulat	0,56	7	233,09	100,53	100,34	25,19	0,227	0,24	0,01	0,91	0,93	
			203,26	98,17	97,95	22,92	0,229			0,92		
			260,35	102,92	102,74	26,87	0,236			0,92		
		220,28	98,11	98,18	23,77	0,237	0,96					
		240,87	101,98	101,59	24,53	0,244	0,95					
		230,19	100,03	99,80	24,25	0,239	0,95					

Tabelle A-8.7: Fortsetzung Tab. A-8.6

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter [d]	Masse	Länge	Breite	Höhe	Wärmeleitfähigkeit			Trocken- rohddichte	
				m	l	b	h	Einzel- wert	Mittel- wert	Stand- abwei- chung	Einzel- wert	Mittel- wert
				[g]	[mm]	[mm]	[mm]	$\lambda_{10, tr.}$	\bar{s}	ρ	[g/cm ³]	
Bimsmehl Sorte II	10	0,56	7	241,96	100,05	99,75	25,70	0,236	0,25	0,01	0,94	0,96
				283,57	99,72	99,80	30,25	0,239			0,94	
				246,80	100,88	101,22	25,50	0,248			0,95	
			28	255,60	102,77	102,54	25,11	0,248			0,96	
				244,56	100,76	100,65	24,78	0,252			0,97	
				270,43	101,78	102,16	26,80	0,256			0,97	
Expandier- ter Perlit		0,57	7	272,64	102,50	102,57	26,67	0,254	0,25	0,00	0,97	0,99
				266,60	102,14	101,67	25,97	0,258			0,99	
				275,72	99,09	99,09	28,41	0,250			0,98	
			28	285,34	101,52	101,95	27,80	0,257			0,99	
				255,78	98,02	97,71	26,76	0,246			0,99	
				248,92	98,23	98,11	25,94	0,250			0,99	
Expandier- tes Alumo- silikat Sorte III	0,60	7	211,45	98,31	98,11	26,22	0,173	0,18	0,01	0,72	0,73	
			197,68	101,92	101,41	28,63	0,177			0,72		
			210,59	101,08	100,89	26,59	0,175			0,72		
		28	181,10	101,62	101,38	27,46	0,184			0,74		
			212,88	97,81	97,95	27,44	0,181			0,75		
			194,00	101,87	101,65	27,34	0,187			0,74		
Pyrogene Kiesel- säure	0,86	7	208,66	102,15	102,17	24,86	0,168	0,17	0,00	0,81	0,82	
			216,68	101,08	100,56	25,78	0,179			0,82		
			228,95	98,48	98,68	28,43	0,172			0,83		
		28	241,21	98,99	99,18	30,23	0,169			0,82		
			222,87	101,08	100,96	26,58	0,172			0,82		
			206,55	100,68	100,64	25,22	0,165			0,81		

Tabelle A-9: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Feststoffdichten sowie berechnete Standardabweichungen von abgebundenen, aufgemahlene Dünnbettmörtel-Proben des Zusatzstoff-Screenings (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Feststoffdichte				
			Einzelwert			Mittel- wert	Standard- abweichung
			ρ_i				
			[g/cm ³]				
			Probe 1	Probe 2	Probe 3		
Dünnbettmörtel	Null- probe	0,58	2,0886	2,0826	2,0811	2,08	0,003
Expandiertes Alumosilikat Sorte II	10	0,60	2,2123	2,2161	2,2158	2,21	0,002
Glashohlkugeln		0,62	2,0845	2,0792	2,0775	2,08	0,003
Bimsmehl Sorte I		0,56	2,0956	2,0950	2,0948	2,10	0,000
Vermiculit		0,57	2,1310	2,1312	2,1307	2,13	0,000
Schmelzkammer- Granulat		0,56	2,0734	2,0679	2,0663	2,07	0,003
Bimsmehl Sorte II		0,56	2,1355	2,1351	2,1348	2,14	0,000
Expandierter Perlit		0,57	2,0569	2,0562	2,0557	2,06	0,000
Expandiertes Alumosilikat Sorte III		0,60	2,1255	2,1257	2,1264	2,13	0,000
Pyrogene Kieselsäure		0,86	1,7954	1,8052	1,8149	1,81	0,007

Tabelle A-10: Dünnbettmörtel-Rezepturen von modifizierten Dünnbettmörtel-Mischungen nach Stoffraumrechnung durch Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen. Die Zielmassen (Trockengewichte) sind jeweils auf exakt 1 kg berechnet sowie in [Ma.-%] angegeben

Siebfraktion Maschen- weite	Pyrogene Kieselsäure									
	10 Vol.-%									
	w/m-Verhältnis									
	1,00		1,10		1,20		1,40		1,65	
x_i	Masse									
$[\mu\text{m}]$	m_{xi}									
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]
$x_1 < 63$	373,26	37,33	373,25	37,33	373,25	37,32	373,25	37,33	373,26	37,33
$x_2 < 90$	217,09	21,71	217,09	21,71	217,08	21,71	217,10	21,71	217,08	21,71
$x_3 < 125$	125,05	12,50	125,04	12,50	125,05	12,50	125,06	12,51	125,06	12,51
$x_4 < 250$	32,48	3,25	32,47	3,25	32,49	3,25	32,47	3,25	32,47	3,25
$x_5 < 500$	140,73	14,07	140,74	14,07	140,74	14,07	140,74	14,07	140,73	14,07
$x_6 \geq 500$	31,99	3,20	31,99	3,20	31,98	3,20	31,97	3,20	31,98	3,20
Pyrogene Kieselsäure	79,41	7,94	79,42	7,94	79,42	7,94	79,41	7,94	79,41	7,94
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00
Wasser	1000,00		1100,00		1200,00		1400,00		1650,00	

Tabelle A-11: Dünnbettmörtel-Rezepturen von modifizierten Dünnbettmörtel-Mischungen nach Stoffraumrechnung bei Zugabe von 5, 10 und 15 Vol.-% expandiertem Perlit bei angepassten w/m-Verhältnissen. Die Zielmassen (Trockengewichte) sind jeweils auf exakt 1 kg berechnet sowie in [Ma.-%] angegeben

Siebfraktion Maschenweite	Expandierter Perlit					
	5 Vol.-%		10 Vol.-%		15 Vol.-%	
	w/m-Verhältnis					
	0,73		0,87		1,00	
x_i	Masse					
$[\mu\text{m}]$	m_{xi}					
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]
$x_1 < 63$	375,70	37,57	369,65	36,97	364,31	36,43
$x_2 < 90$	217,09	21,71	215,01	21,50	211,89	21,19
$x_3 < 125$	125,88	12,59	123,84	12,38	122,05	12,21
$x_4 < 250$	37,43	3,74	32,16	3,22	27,11	2,71
$x_5 < 500$	162,19	16,22	139,38	13,94	117,45	11,74
$x_6 \geq 500$	36,86	3,69	31,67	3,17	26,69	2,67
Expandierter Perlit	44,86	4,49	88,28	8,83	130,51	13,05
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00
Wasser	731,05		870,02		1000,00	

Tabelle A-12: Dünnbettmörtel-Rezepturen von modifizierten Dünnbettmörtel-Mischungen nach Stoffraumrechnung bei Zugabe von insgesamt 10 und 15 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit in Kombination bei unterschiedlichen w/m-Verhältnissen. Die Zielmassen (Trockengewichte) sind jeweils auf exakt 1,00 kg berechnet sowie in [Ma.-%] angegeben

Siefbraktion Maschenweite	Pyrogene Kieselsäure mit expandiertem Perlit							
	5 Vol.-% + 5 Vol.-%							
	w/m-Verhältnis							
	0,70		0,80		1,00		1,22	
x_i [µm]	Masse							
	m_{xi}							
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]
$x_1 < 63$	371,44	37,14	371,44	37,14	371,42	37,14	371,44	37,14
$x_2 < 90$	216,04	21,60	216,04	21,60	216,04	21,60	216,03	21,60
$x_3 < 125$	124,44	12,44	124,45	12,44	124,45	12,44	124,44	12,44
$x_4 < 250$	32,32	3,23	32,32	3,23	32,33	3,23	32,32	3,23
$x_5 < 500$	140,05	14,01	140,06	14,01	140,06	14,01	140,05	14,00
$x_6 \geq 500$	31,83	3,18	31,83	3,18	31,83	3,18	31,84	3,18
Pyrogene Kieselsäure	39,52	3,95	39,51	3,95	39,52	3,95	39,53	3,95
Expandierter Perlit	44,35	4,43	44,35	4,44	44,36	4,44	44,36	4,44
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00
Wasser	699,99		800,01		999,96		1220,01	

Siefbraktion Maschenweite	Pyrogene Kieselsäure mit expandiertem Perlit					
	5 Vol.-% + 10 Vol.-%		7,5 Vol.-% + 7,5 Vol.-%		10 Vol.-% + 5 Vol.-%	
	w/m-Verhältnis					
	1,35		1,53		1,70	
x_i [µm]	Masse					
	m_{xi}					
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]
$x_1 < 63$	366,03	36,60	366,92	36,69	367,79	36,78
$x_2 < 90$	212,90	21,29	213,42	21,34	213,91	21,39
$x_3 < 125$	122,64	12,26	122,93	12,29	123,23	12,32
$x_4 < 250$	27,24	2,72	27,29	2,73	27,37	2,74
$x_5 < 500$	118,01	11,80	118,28	11,83	118,58	11,86
$x_6 \geq 500$	26,82	2,68	26,88	2,69	26,95	2,69
Pyrogene Kieselsäure	38,94	3,89	58,55	5,85	78,25	7,82
Expandierter Perlit	87,41	8,74	65,73	6,57	43,93	4,39
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00
Wasser	1350,00		1530,03		1699,97	

Tabelle A-13: Dünnbettmörtel-Rezepturen von modifizierten Dünnbettmörtel-Mischungen nach Stoffraumrechnung mit Zugaben von jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III in Kombination und unterschiedlichen w/m-Verhältnissen. Die Zielmassen (Trockengewichte) sind jeweils auf exakt 1 kg berechnet sowie in [Ma.-%] angegeben

Siebfraktion Maschenweite	Pyrogene Kieselsäure mit expandiertem Alumosilikat Sorte III					
	5 Vol.-% + 5 Vol.-%					
	w/m-Verhältnis					
	0,70		0,80		0,90	
	x_i [μm]	Masse				
m_{xi}						
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]
$x_1 < 63$	382,07	38,21	382,08	38,21	382,07	38,21
$x_2 < 90$	222,23	22,22	222,23	22,22	222,23	22,22
$x_3 < 125$	128,00	12,80	128,01	12,80	128,01	12,80
$x_4 < 250$	33,25	3,32	33,24	3,32	33,25	3,32
$x_5 < 500$	144,06	14,41	144,06	14,41	144,06	14,41
$x_6 \geq 500$	32,75	3,27	32,74	3,27	32,74	3,27
Pyrogene Kieselsäure	40,65	4,06	40,65	4,06	40,64	4,06
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	17,00	1,70	17,01	1,70	17,01	1,70
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00
Wasser	700,00		800,00		900,00	
Siebfraktion Maschenweite	Pyrogene Kieselsäure mit expandiertem Alumosilikat Sorte III					
	5 Vol.-% + 5 Vol.-%					
	w/m-Verhältnis					
	1,00		1,10		1,20	
	x_i [μm]	Masse				
m_{xi}						
	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]	[g]	[Ma.-%]
$x_1 < 63$	382,08	38,21	382,07	38,21	382,07	38,21
$x_2 < 90$	222,23	22,22	222,22	22,22	222,23	22,22
$x_3 < 125$	128,00	12,80	128,00	12,80	128,01	12,80
$x_4 < 250$	33,25	3,32	33,25	3,33	33,24	3,32
$x_5 < 500$	144,06	14,41	144,06	14,41	144,06	14,41
$x_6 \geq 500$	32,73	3,27	32,74	3,27	32,74	3,27
Pyrogene Kieselsäure	40,64	4,06	40,65	4,07	40,65	4,07
Expandiertes Alumosilikat Sorte III	17,01	1,70	17,00	1,70	17,00	1,70
Σ	1000,00	100,00	1000,00	100,00	1000,00	100,00
Wasser	1000,00		1100,03		1199,99	

Tabelle A-14.1: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper sowie berechnete Massenverluste nach 28 Tagen in [Ma.-%] für abgebundene Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierte Dünnbettmörtel-Proben nach Stoffraumrechnung mit Zugabe von 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und unterschiedlichen w/m-Verhältnissen

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masse- verlust 28 d [Ma.-%]
			2 d	7 d	14 d	28 d	
			m _{xi} [g]				
Dünnbettmörtel	Null- probe	0,58	269,46	244,86	-	-	19,96
			269,72	245,12	-	-	
			276,56	251,35	-	-	
			278,60	251,52	243,98	221,63	
			278,66	250,88	243,35	222,77	
			269,24	241,14	233,91	212,84	
Mittelwerte			273,71	247,48	240,41	219,08	
Pyrogene Kieselsäure	10	1,00	318,13	274,33	-	-	25,90
			319,76	277,26	-	-	
			320,80	275,35	-	-	
			312,43	272,89	256,16	234,80	
			313,38	267,47	254,52	232,43	
			307,15	265,89	250,65	233,62	
Mittelwerte			315,28	272,20	253,78	233,62	
Pyrogene Kieselsäure	10	1,10	320,81	288,23	-	-	27,12
			321,20	286,17	-	-	
			317,25	280,22	-	-	
			320,31	289,34	266,71	240,36	
			318,61	289,54	265,75	234,18	
			309,23	278,28	247,47	220,53	
Mittelwerte			317,90	285,30	259,98	231,69	
Pyrogene Kieselsäure	10	1,20	313,49	277,02	-	-	34,06
			313,84	275,48	-	-	
			307,84	270,02	-	-	
			307,38	271,54	225,05	206,04	
			309,25	262,37	235,66	201,98	
			309,11	273,65	230,72	205,56	
Mittelwerte			310,15	271,68	230,48	204,53	
Pyrogene Kieselsäure	10	1,40	295,76	239,86	-	-	36,16
			295,63	240,91	-	-	
			299,40	238,25	-	-	
			285,37	230,74	217,33	183,44	
			285,45	241,20	208,66	185,34	
			285,59	239,74	227,96	188,95	
Mittelwerte			291,20	238,45	217,98	185,91	
Pyrogene Kieselsäure	10	1,65	288,37	237,44	-	-	40,65
			287,92	237,49	-	-	
			286,40	246,92	-	-	
			285,53	223,60	213,84	169,46	
			286,93	217,12	207,35	172,19	
			286,26	210,16	200,76	169,16	
Mittelwerte			286,90	228,79	207,32	170,27	

Tabelle A-14.2: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper sowie berechnete Massenverluste nach 28 Tagen in [Ma.-%] für abgebundene Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierte Dünnbettmörtel-Proben nach Stoffraumrechnung mit Zugaben von 5, 10 und 15 Vol.-% expandiertem Perlit und unterschiedlichen w/m-Verhältnissen

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masse-
			2 d	7 d	14 d	28 d	verlust
			m _{xi} [g]				28 d [Ma.-%]
Expandierter Perlit	5	0,73	318,00	279,46	-	-	26,45
			315,65	273,48	-	-	
			316,12	273,35	-	-	
			307,05	259,80	240,22	228,68	
			308,72	259,77	237,04	229,56	
			310,66	260,83	240,29	231,71	
Mittelwerte			312,70	267,78	239,18	229,98	
Expandierter Perlit	10	0,87	319,84	255,27	-	-	31,01
			322,13	255,54	-	-	
			318,45	250,10	-	-	
			317,20	255,46	241,21	220,93	
			312,57	250,46	238,23	217,42	
			317,57	255,18	236,87	219,70	
Mittelwerte			317,96	253,67	238,77	219,35	
Expandierter Perlit	15	1,00	320,77	249,46	-	-	37,36
			322,45	256,06	-	-	
			321,36	261,22	-	-	
			312,03	234,18	209,86	198,46	
			315,35	240,24	207,48	198,80	
			313,18	231,35	216,58	199,46	
Mittelwerte			317,52	245,42	211,31	198,91	

Tabelle A-14.3: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper sowie berechnete Massenverluste nach 28 Tagen in [Ma.-%] für abgebundene Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierte Dünnbettmörtel-Proben nach Stoffraumrechnung mit Zugabe von jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit in Kombination und unterschiedlichen w/m-Verhältnissen

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masse- verlust 28 d [Ma.-%]
			2 d	7 d	14 d	28 d	
			m _{xi} [g]				
Dünnbettmörtel	Null- probe	0,58	269,46	244,86	-	-	19,96
			269,72	245,12	-	-	
			276,56	251,35	-	-	
			278,60	251,52	243,98	221,63	
			278,66	250,88	243,35	222,77	
			269,24	241,14	233,91	212,84	
Mittelwerte			273,71	247,48	240,41	219,08	
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	5 + 5	0,70	309,59	302,16	-	-	12,29
			311,56	299,34	-	-	
			306,53	291,61	-	-	
			318,80	292,67	279,13	270,20	
			318,14	296,97	283,44	262,32	
			318,04	294,38	280,00	272,28	
Mittelwerte			309,23	296,19	280,86	268,27	
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	5 + 5	0,80	326,97	274,19	-	-	18,03
			327,50	277,42	-	-	
			321,84	273,71	-	-	
			316,46	279,41	263,43	251,76	
			323,60	274,96	264,89	254,31	
			218,86	277,24	269,88	254,38	
Mittelwerte			305,87	276,16	266,07	253,48	
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	5 + 5	1,00	304,29	261,86	-	-	27,74
			299,53	260,49	-	-	
			296,61	258,10	-	-	
			292,56	243,60	235,58	217,16	
			277,10	230,66	216,78	205,88	
			291,32	232,43	229,07	213,38	
Mittelwerte			293,57	247,86	227,14	212,14	
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	5 + 5	1,22	302,73	283,02	-	-	40,32
			304,10	264,01	-	-	
			302,51	266,32	-	-	
			295,30	236,10	215,77	137,77	
			299,61	233,69	219,22	199,41	
			296,69	244,96	216,42	200,23	
Mittelwerte			300,16	254,68	217,14	179,14	

Tabelle A-14.4: Fortsetzung Tab. A-14.3

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masse-
			2 d	7 d	14 d	28 d	verlust
			m _{xi} [g]				28 d [Ma.-%]
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	5 + 10	1,35	298,89	259,26	-	-	16,57
			304,67	254,00	-	-	
			300,96	259,48	-	-	
			324,15	298,08	277,22	262,53	
			319,26	295,06	274,07	263,63	
			323,18	297,94	276,67	254,33	
Mittelwerte			311,85	277,30	275,99	260,16	
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	7,5 + 7,5	1,53	307,82	267,65	-	-	22,99
			305,64	253,15	-	-	
			306,98	246,69	-	-	
			323,50	287,48	259,33	234,31	
			325,06	290,08	248,20	239,75	
			323,47	286,42	266,30	254,63	
Mittelwerte			315,41	271,91	257,94	242,90	
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	10 + 5	1,70	290,54	250,84	-	-	24,16
			291,53	245,01	-	-	
			291,21	251,73	-	-	
			322,17	277,42	255,20	244,78	
			319,63	279,77	260,88	233,44	
			320,59	272,96	254,47	217,90	
Mittelwerte			305,95	262,96	256,85	232,04	

Tabelle A-14.5: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Massenverluste in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper sowie berechnete Massenverluste nach 28 Tagen in [Ma.-%] für abgebundene Dünnbettmörtel-Nullproben und modifizierte Dünnbettmörtel-Proben nach Stoffraumrechnung mit Zugabe von jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat der Sorte III in Kombination und unterschiedlichen w/m-Verhältnissen

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masseverlust
			2 d	7 d	14 d	28 d	
			m _{xi} [g]				28 d [Ma.-%]
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	269,46	244,86	-	-	19,96
			269,72	245,12	-	-	
			276,56	251,35	-	-	
			278,60	251,52	243,98	221,63	
			278,66	250,88	243,35	222,77	
			269,24	241,14	233,91	212,84	
Mittelwerte			273,71	247,48	240,41	219,08	
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Alumosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	0,70	309,84	284,24	-	-	15,11
			314,06	288,26	-	-	
			309,45	283,70	-	-	
			309,49	284,17	265,62	263,06	
			313,58	287,18	268,22	264,70	
			307,01	280,99	264,38	263,15	
Mittelwerte			310,57	284,76	266,07	263,64	
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Alumosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	0,80	303,12	273,72	-	-	17,65
			306,70	275,74	-	-	
			309,93	273,42	-	-	
			307,82	271,76	262,22	254,72	
			304,94	277,98	262,26	250,47	
			304,32	274,44	252,99	251,16	
Mittelwerte			306,14	274,51	259,16	252,12	
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Alumosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	0,90	258,61	223,25	-	-	19,24
			270,50	233,41	-	-	
			266,92	230,66	-	-	
			291,59	249,56	237,50	234,68	
			288,60	246,61	225,55	217,60	
			281,65	241,64	227,55	217,15	
Mittelwerte			276,31	237,52	230,20	223,14	

Tabelle A-14.6: Fortsetzung Tab. A-14.5

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Masse				Masse- verlust 28 d [Ma.-%]
			2 d	7 d	14 d	28 d	
			m _{xi} [g]				
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Aluminosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	1,00	265,33	219,61	-	-	24,59
			265,86	222,85	-	-	
			266,38	229,21	-	-	
			279,57	243,68	208,41	203,68	
			278,33	239,17	224,33	208,86	
			276,76	234,93	212,43	202,86	
Mittelwerte			272,04	231,58	215,06	205,13	
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Aluminosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	1,10	272,71	231,80	-	-	25,08
			270,70	224,38	-	-	
			271,52	225,40	-	-	
			284,15	233,71	209,48	205,86	
			284,36	238,26	211,50	205,54	
			277,26	232,54	216,35	210,66	
Mittelwerte			276,78	231,02	212,44	207,35	
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Aluminosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	1,20	276,18	233,82	-	-	29,61
			275,97	291,41	-	-	
			275,14	230,41	-	-	
			276,09	222,70	206,50	198,42	
			273,86	209,50	193,89	190,87	
			265,64	223,38	193,95	188,96	
Mittelwerte			273,81	235,20	198,11	192,75	

Tabelle A-15.1: Einzel- und berechnete Mittelwerte von spezifischen Oberflächen sowie berechnete Standardabweichungen abgebundener Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierter Dünnbettmörtel-Proben (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Spezifische Oberfläche nach BET				
			Einzelwert		Mittelwert	Standardabweichung	
			as				
			[m ² /g]		Probe 1	Probe 2	s̄
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	17,456	17,228			
Pyrogene Kieselsäure	10	1,00	50,068	51,335	50,70	0,63	
		1,10	64,518	-	64,52	-	
		1,20	63,913	-	63,91	-	
		1,40	60,547	-	60,55	-	
		1,65	55,999	-	56,00	-	
Expandierter Perlit	5	0,73	15,898	-	15,90	-	
	10	0,87	15,530	-	15,53	-	
	15	1,00	13,275	-	13,28	-	
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit in Kombination	5 + 5	0,70	23,438	-	23,44	-	
		0,80	35,611	36,242	35,93	0,32	
		1,00	34,912	-	39,91	-	
	5 + 10	1,22	39,675	-	39,68	-	
		1,35	32,457	-	32,46	-	
		7,5 + 7,5	1,53	42,262	-	42,26	-
		10 + 5	1,70	51,994	-	51,99	-
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Aluminosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	0,70	23,780	-	23,78	-	
		0,80	37,237	36,985	37,11	0,13	
		0,90	30,618	-	30,62	-	
		1,00	31,068	-	31,07	-	
		1,10	33,917	-	33,92	-	
		1,20	30,878	-	30,88	-	

Tabelle A-15.2: Massen und Abmaße, berechnete Volumina und Trockenrohdichten, Schalllaufzeiten; berechnete Einzel- und Mittelwerte dynamischer E-Moduln von abgebundenen Dünnbettmörtel-Nullproben sowie modifizierten Dünnbettmörtel-Proben (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter [d]	Masse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Trocken- rohdichte	Schall- lauf- zeit	E-Modul	
				m [g]	l [mm]	b [mm]	h [mm]	V [cm ³]	ρ [g/cm ³]	t [μs]	Einzel- wert	Mittel- wert
												E _{dyn.} [GPa]
Dünnbett- mörtel	Null- probe	0,58	7	244,86	160,05	40,02	40,71	260,76	0,94	68,2	5,17	5,3
				245,12	160,05	40,11	40,42	259,48	0,94	68,3	5,19	
				251,35	160,03	40,21	40,32	259,45	0,97	67,5	5,45	
			28	221,63	159,83	39,92	39,60	252,66	0,88	69,5	4,64	4,4
				222,77	159,84	40,64	40,75	264,68	0,84	71,0	4,27	
				212,84	159,56	39,87	40,39	256,95	0,83	70,0	4,30	
Pyrogene Kiesel- säure	10	1,00	7	288,23	160,03	40,03	40,46	259,19	1,11	75,3	5,02	5,0
				286,17	159,97	40,19	40,70	261,67	1,09	75,6	4,90	
				280,22	159,92	40,62	39,99	259,77	1,08	75,5	4,84	
				290,15	160,34	40,01	39,91	256,03	1,13	74,7	5,22	
				289,91	159,95	41,22	40,02	263,86	1,10	75,0	5,00	
				292,34	160,30	40,60	40,11	261,04	1,12	75,5	5,05	
			28	240,36	159,30	39,96	40,35	256,85	0,94	72,8	4,48	4,5
				234,18	159,27	39,80	41,11	260,59	0,90	72,0	4,40	
				220,53	159,42	39,88	40,68	258,63	0,85	72,9	4,08	
				250,87	160,20	39,69	41,07	261,14	0,96	73,2	4,60	
				260,57	160,17	41,03	39,67	260,70	1,00	73,4	4,76	
				269,68	160,09	39,48	41,17	260,21	1,04	73,7	4,89	
		1,10	7	274,33	160,18	40,15	41,33	265,80	1,03	81,7	3,97	4,0
				277,26	159,99	40,18	41,66	267,81	1,04	81,3	4,01	
				275,35	160,08	40,21	41,38	266,36	1,03	81,3	4,01	
			28	234,80	159,46	40,50	40,12	259,10	0,91	78,6	3,73	3,7
				232,43	159,46	40,04	40,58	259,09	0,90	79,3	3,63	
				233,62	159,81	40,16	40,13	257,55	0,91	78,3	3,78	
		1,20	7	277,02	160,06	40,60	39,97	259,74	1,07	82,2	4,04	3,9
				275,48	159,95	40,59	39,98	259,56	1,06	82,5	3,99	
				270,02	159,82	40,73	40,03	260,57	1,04	83,5	3,80	
			28	206,04	159,13	39,80	40,41	255,93	0,81	81,3	3,08	2,9
				201,98	159,21	39,79	40,61	257,26	0,79	83,7	2,84	
				205,56	159,10	39,88	40,39	256,27	0,80	83,9	2,88	
		1,40	7	239,86	160,18	40,71	40,22	262,27	0,91	97,2	2,48	2,5
				240,91	159,93	40,15	40,56	260,44	0,92	98,2	2,45	
				238,25	159,93	39,97	40,51	258,96	0,92	98,2	2,44	
			28	183,44	159,27	39,39	39,75	249,38	0,74	91,5	2,23	2,3
				185,34	159,13	39,36	39,91	249,97	0,74	90,5	2,29	
				188,95	159,14	39,81	39,81	252,21	0,75	89,9	2,35	
1,65	7	237,44	160,18	40,85	40,23	263,24	0,90	118,4	1,65	1,7		
		237,49	160,30	40,58	40,12	260,98	0,91	119,4	1,64			
		246,92	160,08	40,11	41,04	263,51	0,94	119,9	1,67			
	28	169,46	158,97	40,33	39,81	255,23	0,66	101,0	1,64	1,6		
		172,19	158,99	40,29	39,73	254,50	0,68	101,2	1,67			
		169,16	158,96	40,51	39,77	256,10	0,66	104,7	1,52			

Tabelle A-15.3: Fortsetzung Tab A-15.2

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Trocken- roh- dichte	Schall- lauf- zeit	E-Modul	
				m	l	b	h	V	ρ	t	Einzel- wert	Mittel- wert
	[Vol.-%]		[d]	[g]		[mm]		[cm ³]	[g/cm ³]	[μ s]	Edyn. [GPa]	
Expandier- ter Perlit	5	0,73	7	279,46	160,20	40,11	40,34	259,21	1,08	74,3	5,01	4,9
				273,48	160,18	40,05	40,61	260,52	1,05	74,3	4,88	
				273,35	160,20	40,14	40,43	259,98	1,05	74,4	4,87	
			28	228,68	159,70	40,64	39,87	258,76	0,88	73,2	4,21	4,2
				229,56	159,60	40,59	39,90	258,48	0,89	72,8	4,27	
				231,71	159,58	40,48	39,90	257,75	0,90	73,7	4,21	
	10	0,87	7	255,27	160,36	41,37	40,32	267,49	0,95	83,0	3,56	3,5
				255,54	160,26	40,23	41,40	266,92	0,96	83,2	3,55	
				250,10	160,27	40,29	41,50	267,98	0,93	82,6	3,51	
			28	220,93	159,55	40,47	40,04	258,54	0,85	78,5	3,53	3,4
				217,42	159,50	40,53	40,14	259,49	0,84	79,3	3,39	
				219,70	159,59	39,94	40,52	258,28	0,85	79,5	3,43	
	15	1,00	7	249,46	160,16	40,11	40,84	262,36	0,95	91,5	2,91	2,9
				256,06	160,02	40,84	40,03	261,60	0,98	93,0	2,90	
				261,22	160,39	40,78	40,10	262,28	1,00	92,6	2,99	
			28	198,46	159,97	40,05	40,39	258,77	0,77	87,7	2,55	2,5
				198,80	159,86	39,98	40,50	258,84	0,77	87,7	2,55	
				199,46	159,99	39,92	40,46	258,41	0,77	88,1	2,55	

Tabelle A-15.4: Fortsetzung Tab A-15.3

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Trocken- roh- dichte	Schall- lauf- zeit	E-Modul		
				m	l	b	h	V	ρ	t	Einzel- wert	Mittel- wert	
	[Vol.-%]		[d]	[g]	[mm]			[cm ³]	[g/cm ³]	[μ s]	E _{dyn.} [GPa]		
Pyrogene Kiesel- säure und expandierter Perlit in Kombi- nation	5 + 5	0,70	7	302,16	160,55	40,15	40,66	262,10	1,15	65,9	6,84	6,6	
				299,34	159,82	41,38	40,64	268,77	1,11	66,0	6,53		
				291,61	160,65	39,92	41,42	265,63	1,10	65,9	6,52		
			28	270,20	159,61	40,05	41,21	263,43	1,03	64,6	6,26		6,3
				262,32	159,48	40,88	39,89	260,06	1,01	64,5	6,17		
				272,28	159,90	41,13	39,92	262,54	1,04	64,6	6,35		
		0,80	7	274,19	160,15	41,58	39,98	266,23	1,03	72,7	5,00	4,9	
				277,42	160,27	41,98	40,05	269,46	1,03	73,9	4,84		
				273,71	160,23	42,04	40,00	269,44	1,02	73,7	4,80		
			28	251,76	160,01	40,01	40,63	260,11	0,97	72,2	4,75	4,8	
				254,31	160,09	39,87	40,19	256,52	0,99	72,4	4,85		
				254,38	160,07	40,05	40,56	260,02	0,98	71,9	4,85		
		1,00	7	261,86	160,53	39,96	40,88	262,24	1,00	83,2	3,72	3,7	
				-	-	-	-	-	-	-	-		
				258,10	160,34	39,97	41,02	262,89	0,98	83,8	3,59		
			28	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	
				205,88	159,62	39,76	40,36	256,14	0,80	83,7	2,92		
				213,38	159,49	39,74	40,30	255,43	0,84	83,2	3,07		
	1,22	7	283,02	160,01	39,99	41,58	266,06	1,06	98,7	2,80	2,7		
			264,01	160,12	41,51	40,11	266,59	0,99	98,4	2,62			
			266,32	160,13	41,47	40,05	265,96	1,00	98,6	2,64			
		28	137,77	159,39	40,00	40,39	257,51	0,54	94,5	1,52	2,0		
			199,41	159,77	40,07	40,29	257,94	0,77	94,7	2,20			
			200,23	159,49	40,04	40,38	257,87	0,78	94,5	2,21			
	5 + 10	1,35	7	259,26	160,08	40,09	40,61	260,62	0,99	97,9	2,66	2,6	
				254,00	160,10	39,98	41,37	264,80	0,96	98,1	2,55		
				259,48	160,15	40,07	41,11	263,81	0,98	98,1	2,62		
			28	184,43	159,48	40,62	39,89	258,41	0,71	122,5	1,21	1,3	
				185,56	159,43	39,89	40,65	258,52	0,72	119,5	1,28		
				206,25	159,16	40,34	39,90	256,18	0,81	120,6	1,40		
	7,5 + 7,5	1,53	7	267,65	159,77	41,47	40,08	265,56	1,01	99,5	2,60	2,5	
				-	-	-	-	-	-	-	-		
				246,69	159,89	41,10	40,32	264,96	0,93	99,7	2,39		
			28	187,51	159,61	40,56	39,95	258,63	0,73	118,6	1,31	1,4	
				187,71	159,32	40,25	39,85	255,54	0,73	116,2	1,38		
				185,44	159,38	40,64	39,81	257,86	0,72	114,7	1,39		
10 + 5	1,70	7	250,84	159,87	40,06	40,33	258,29	0,97	123,7	1,62	1,6		
			245,01	159,92	40,27	40,04	257,86	0,95	120,8	1,67			
			251,73	159,93	40,05	40,43	258,98	0,97	123,6	1,63			
		28	179,46	158,33	39,44	40,47	252,72	0,71	105,6	1,60	1,5		
			161,21	158,27	40,34	39,68	253,34	0,64	105,9	1,42			
			169,69	158,03	39,55	40,27	251,69	0,67	-	-			

Tabelle A-15.5: Fortsetzung Tab A-15.4

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Trocken- roh- dichte	Schall- lauf- zeit	E-Modul		
				m	l	b	h	V	ρ	t	Einzel- wert	Mittel- wert	
	[Vol.-%]		[d]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ³]	[g/cm ³]	[μ s]	E _{dyn.} [GPa]		
Pyrogene Kieselsäure und expan- diertes Alumosilikat Sorte III in Kombi- nation	5 + 5	0,70	7	284,24	160,88	40,84	39,63	260,38	1,09	67,5	6,20	6,2	
				288,26	161,25	39,71	41,22	263,94	1,09	67,2	6,29		
				283,70	161,47	41,27	39,69	264,49	1,07	67,9	6,07		
			28	263,06	160,52	41,15	39,42	260,38	1,01	67,9	5,65		5,8
				264,70	160,48	39,64	40,49	257,57	1,03	67,4	5,83		
				263,15	160,11	39,69	40,78	259,15	1,02	66,9	5,82		
		0,80	7	273,72	160,00	39,64	40,52	256,99	1,07	72,8	5,14	5,2	
				275,74	160,89	41,20	39,62	262,63	1,05	71,7	5,29		
				273,42	160,75	41,52	39,77	265,44	1,03	72,6	5,05		
			28	254,72	160,75	41,14	39,62	262,02	0,97	70,5	5,05	5,1	
				250,47	160,54	41,46	39,86	265,31	0,94	70,1	4,95		
				251,16	160,81	39,58	40,12	255,36	0,98	70,1	5,18		
		0,90	7	223,25	160,16	41,19	40,06	264,28	0,84	76,7	3,68	3,8	
				233,41	160,17	39,75	41,02	261,16	0,89	76,4	3,93		
				230,66	160,43	40,32	40,05	259,06	0,89	78,2	3,75		
			28	234,68	160,52	40,98	39,90	262,47	0,89	82,8	3,36	3,3	
				217,60	160,42	41,31	39,78	263,62	0,83	81,3	3,21		
				217,15	160,33	39,79	39,98	255,05	0,85	81,8	3,27		
		1,00	7	219,61	160,15	40,90	40,25	263,64	0,83	83,2	3,09	3,2	
				222,85	159,69	41,00	39,65	259,60	0,86	82,9	3,19		
				229,21	159,58	40,74	40,13	260,90	0,88	82,0	3,33		
			28	203,68	159,84	40,38	39,98	258,04	0,79	88,4	2,58	2,6	
				208,86	159,79	40,84	40,21	262,40	0,80	87,9	2,63		
				202,86	159,71	39,90	40,09	255,47	0,79	88,7	2,57		
		1,10	7	231,80	159,82	39,96	40,92	261,33	0,89	98,1	2,35	2,4	
				224,38	160,04	40,08	40,55	260,10	0,86	96,3	2,38		
				225,40	160,07	40,01	40,62	260,15	0,87	95,1	2,45		
			28	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	
				205,54	159,37	40,77	40,20	261,20	0,79	93,0	2,31		
				210,66	159,64	40,36	40,11	258,43	0,82	93,7	2,37		
1,20	7	233,82	160,01	40,01	44,22	283,10	0,83	100,6	2,09	2,2			
		231,41	160,01	40,07	40,34	258,64	0,89	100,2	2,28				
		230,41	159,94	40,02	40,28	257,82	0,89	100,8	2,25				
	28	198,42	159,34	40,06	40,90	261,07	0,76	94,5	2,16	2,1			
		190,87	159,71	39,76	41,03	260,54	0,73	94,4	2,10				
		188,96	159,39	40,96	39,93	260,69	0,72	94,5	2,06				

Tabelle A-15.6: Berechnete Einzel- und Mittelwerte der Drei-Punkt-Biegezugfestigkeiten und Druckfestigkeiten sowie berechnete Standardabweichungen von Druckfestigkeiten modifizierter Dünnbettmörtel-Proben im Vergleich mit den Nullproben (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Probenalter [d]	Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit			Druckfestigkeit					
				Bruchlast F _f [kN]	Einzelwert β _B [MPa]	Mittelwert	Bruchlast		Einzelwert		Mittelwert	Standardabweichung s
							F _f [kN]	β _D [MPa]				
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	7	0,63	1,48	1,3	12,41	12,87	7,76	8,04	8,0	0,41
				0,55	1,28		11,95	12,27	7,47	7,67		
				0,53	1,23		13,25	13,93	8,28	8,70		
			28	0,88	2,05	2,5	8,74	16,33	5,46	10,20	10,3	0,28
				1,16	2,72		16,78	15,73	10,49	9,83		
				1,14	2,67		17,05	16,46	10,66	10,29		
Pyrogene Kieselsäure	10	1,00	7	0,46	1,08	1,0	14,01	11,74	8,76	7,34	8,1	0,51
				0,57	1,33		11,76	13,59	7,35	8,49		
				0,43	1,00		9,06	13,08	5,66	8,18		
				0,46	1,07		13,05	12,42	8,15	7,76		
				0,32	0,76		11,72	13,53	7,32	8,46		
				0,41	0,96		13,89	12,15	8,68	7,59		
			28	0,51	1,19	1,6	16,29	16,39	10,18	10,24	10,0	0,32
				0,59	1,38		15,56	16,40	9,73	10,25		
				0,84	1,97		13,53	15,02	8,46	9,39		
				0,70	1,65		15,38	16,01	9,64	10,00		
				0,69	1,61		15,89	15,64	9,93	9,78		
				0,70	1,64		16,93	15,66	10,58	9,79		
		1,10	7	0,28	0,66	0,8	8,24	9,35	5,15	5,84	5,5	0,34
				0,26	0,61		8,72	9,55	5,45	5,97		
				0,44	1,02		8,29	10,92	5,18	6,82		
			28	0,82	1,93	1,4	12,36	8,43	7,73	5,27	8,0	0,22
				0,50	1,16		12,44	13,31	7,78	8,32		
				0,51	1,19		12,97	12,80	8,11	8,00		
		1,20	7	0,35	0,81	1,0	7,99	8,33	4,99	5,21	5,1	0,20
				0,44	1,03		8,17	8,40	5,10	5,25		
				0,53	1,24		7,45	8,35	4,66	5,22		
			28	0,38	0,88	1,0	9,33	10,81	5,83	6,75	6,8	0,40
				0,59	1,38		10,25	11,34	6,41	7,09		
				0,35	0,81		11,83	10,13	7,39	6,33		
		1,40	7	0,37	0,86	0,7	4,93	4,97	3,08	3,11	3,4	0,27
				0,27	0,62		5,97	-	3,73	-		
				0,24	0,57		5,87	5,47	3,67	3,42		
			28	0,41	0,95	1,0	6,32	5,83	3,95	3,64	3,9	0,18
				0,41	0,97		6,59	5,74	4,12	3,59		
				0,43	1,01		6,36	5,90	3,98	3,69		
		1,65	7	0,33	0,77	0,7	3,40	3,67	2,13	2,29	2,2	0,12
				0,25	0,59		3,67	3,23	2,29	2,02		
				0,30	0,71		2,67	3,24	1,67	2,03		
			28	0,35	0,81	0,7	4,45	5,59	2,78	3,50	3,2	0,16
				0,27	0,64		4,82	5,27	3,01	3,30		
				0,29	0,68		5,14	5,07	3,21	3,17		

Tabelle A-15.7: Fortsetzung Tab A-15.6

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter [d]	Drei-Punkt- Biegezugfestigkeit			Druckfestigkeit					
				Bruch- last F _f [kN]	Einzel- wert β _B [MPa]	Mittel- wert	Bruchlast		Einzelwert		Mittel- wert	Stand- abweichung s̄
							F _f [kN]	β _D [MPa]	F _f [kN]	β _D [MPa]		
Expandier- ter Perlit	5	0,73	7	0,87	2,04	2,1	11,60	12,28	7,25	7,67	7,6	0,35
				0,89	2,08		12,33	12,73	7,71	7,95		
				0,88	2,06		12,64	11,16	7,90	6,98		
			28	1,35	3,16	3,0	17,60	16,49	11,00	10,30	10,2	0,43
				1,19	2,79		15,59	16,01	9,75	10,01		
				1,29	3,01		16,66	15,64	10,41	9,77		
	10	0,87	7	0,67	1,57	1,6	10,18	9,28	6,36	5,80	6,0	0,25
				0,66	1,54		8,90	9,71	5,56	6,07		
				0,68	1,59		9,35	9,76	5,85	6,10		
			28	0,93	2,18	2,7	11,24	12,60	7,02	7,88	7,4	0,45
				1,28	2,99		11,69	10,82	7,30	6,76		
				1,21	2,83		12,62	12,52	7,89	7,83		
	15	1,00	7	0,63	1,46	1,5	6,03	6,24	3,77	3,90	3,8	0,13
				0,67	1,57		6,35	5,71	3,97	3,57		
				0,62	1,46		5,97	6,09	3,73	3,80		
28			0,83	1,95	1,9	9,15	8,89	5,72	5,55	5,5	0,17	
			0,71	1,67		9,01	9,16	5,63	5,73			
			0,86	2,01		8,67	8,40	5,42	5,25			

Tabelle A-15.8: Fortsetzung Tab A-15.7

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter [d]	Drei-Punkt- Biegezugfestigkeit			Druckfestigkeit					
				Bruch- last F _f [kN]	Einzel- wert β _B [MPa]	Mittel- wert	Bruchlast		Einzelwert		Mittel- wert	Stand- ard- abwei- chung š
							F _f [kN]	β _D [MPa]	F _f [kN]	β _D [MPa]		
Pyrogene Kieselsäure und expan- dierter Perlit in Kombi- nation	5 + 5	0,70	7	0,68	1,60	1,8	13,61	13,59	8,50	8,49	8,2	0,27
				0,74	1,73		12,69	12,95	7,93	8,10		
				0,82	1,93		12,36	12,58	7,72	7,86		
			28	0,85	2,00	2,2	15,16	12,89	9,48	8,06	8,9	0,46
				0,92	2,14		14,21	14,41	8,88	9,00		
				1,09	2,54		14,37	12,08	8,98	7,55		
		0,80	7	0,63	1,47	1,4	9,29	8,58	5,80	5,36	5,5	0,25
				0,58	1,35		9,16	7,46	5,73	4,66		
				0,55	1,29		8,22	8,60	5,14	5,37		
			28	1,19	2,79	2,3	14,09	11,45	8,81	7,15	9,0	0,22
				0,81	1,89		14,19	14,23	8,87	8,89		
				0,95	2,22		14,29	15,06	8,93	9,41		
	1,00	7	0,43	1,01	1,1	9,18	5,68	5,74	3,55	3,7	0,19	
			-	-		5,93	6,45	3,71	4,03			
			0,47	1,09		5,67	5,61	3,54	3,51			
		28	-	-	1,5	5,40	6,25	3,38	3,91	4,2	0,19	
			0,64	1,49		6,65	7,17	4,16	4,48			
			0,66	1,54		6,84	6,50	4,27	4,06			
	1,22	7	0,46	1,08	1,1	5,12	4,58	3,20	2,86	3,1	0,17	
			0,52	1,21		5,39	4,64	3,37	2,90			
			0,47	1,09		4,71	4,90	2,95	3,06			
		28	0,50	1,17	1,3	4,82	5,24	3,04	3,28	3,4	0,09	
			0,50	1,17		5,30	5,58	3,31	3,49			
			0,61	1,42		5,40	5,59	3,38	3,49			
	5 + 10	1,35	7	0,31	0,73	0,8	3,40	3,07	2,13	1,92	2,0	0,08
				0,33	0,77		2,62	3,11	1,64	1,94		
				0,34	0,80		3,29	3,25	2,06	2,03		
			28	0,48	1,13	1,0	4,99	4,81	3,12	3,04	3,3	0,08
				0,49	1,15		5,38	5,29	3,36	3,30		
				0,34	0,79		5,26	5,16	3,29	3,23		
	7,5 + 7,5	1,53	7	0,35	0,83	0,8	2,69	3,62	1,68	2,26	2,2	0,14
				-	-		3,19	3,38	1,99	2,11		
				0,35	0,81		3,83	3,52	2,40	2,20		
			28	0,37	0,87	0,8	4,45	4,94	2,78	3,09	3,0	0,11
				0,23	0,55		4,92	4,86	3,08	3,04		
				0,36	0,84		4,54	4,69	2,84	2,93		
10 + 5	1,70	7	0,36	0,85	0,7	3,16	2,93	1,97	1,83	2,0	0,03	
			0,20	0,48		3,18	3,20	1,99	2,00			
			0,27	0,64		3,19	3,07	1,99	1,92			
		28	0,29	0,68	0,8	4,53	4,38	2,83	2,74	2,9	0,15	
			0,37	0,87		3,88	5,04	2,43	3,15			
			-	-		4,63	4,90	2,90	3,06			

Tabelle A-15.9: Fortsetzung Tab A-15.8

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter [d]	Drei-Punkt- Biegezugfestigkeit			Druckfestigkeit					
				Bruch- last F _f [kN]	Einzel- wert β _B [MPa]	Mittel- wert	Bruchlast		Einzelwert		Mittel- wert	Stand- abweichung š
							F _f [kN]	β _D [MPa]	F _f [kN]	β _D [MPa]		
Pyrogene Kieselsäure und expan- diertes Alumosilikat Sorte III in Kombination	5 + 5	0,70	7	0,46	1,07	1,2	10,22	16,64	6,39	10,40	9,6	0,76
				0,53	1,24		13,91	16,62	8,69	10,39		
				0,55	1,29		15,75	13,94	9,84	8,71		
			28	1,17	2,75	2,4	15,22	15,62	9,51	9,76	10,4	0,68
				1,01	2,37		17,51	14,71	10,94	9,29		
				0,87	2,03		18,02	17,12	11,26	10,70		
		0,80	7	0,49	1,15	1,1	8,71	-	5,45	-	6,0	0,39
				0,52	1,23		10,36	9,16	6,48	5,73		
				0,43	1,02		9,47	10,23	5,92	6,40		
			28	0,82	1,92	2,1	14,94	15,44	9,34	9,65	10,0	0,49
				0,84	1,96		15,56	16,92	9,73	10,57		
				1,06	2,48		11,84	16,79	7,40	10,50		
		0,90	7	0,39	0,91	1,1	4,96	7,23	3,10	4,52	4,5	0,21
				0,49	1,13		6,53	7,53	4,08	4,71		
				0,53	1,24		7,34	7,22	4,59	4,51		
			28	0,66	1,54	1,7	11,04	11,04	6,90	6,90	6,3	0,48
				0,85	1,98		9,59	8,26	6,00	5,16		
				0,71	1,67		9,35	9,54	5,85	5,96		
		1,00	7	0,57	1,34	1,2	5,20	6,06	3,25	3,79	3,6	0,33
				0,41	0,97		5,85	6,08	3,66	3,80		
				0,53	1,24		5,75	4,66	3,59	2,91		
			28	0,47	1,09	1,3	7,84	8,45	4,90	5,28	4,8	0,31
				0,61	1,42		7,19	7,22	4,49	4,51		
				0,57	1,33		7,48	8,32	4,68	5,20		
		1,10	7	0,39	0,91	1,0	4,09	4,36	2,56	2,72	2,8	0,07
				0,45	1,06		4,57	4,47	2,86	2,80		
				0,46	1,08		4,69	4,63	2,93	2,89		
			28	-	-	1,4	7,62	8,09	4,76	5,06	4,9	0,18
				0,53	1,25		7,29	7,97	4,55	4,98		
				0,64	1,50		6,82	7,89	4,26	4,93		
		1,20	7	0,43	0,99	1,0	4,57	4,25	2,86	2,66	2,7	0,10
				0,47	1,09		4,07	4,41	2,55	2,76		
				0,43	1,01		4,37	3,47	2,73	2,17		
			28	0,58	1,37	1,1	5,13	5,13	3,21	3,21	3,4	0,11
				0,34	0,80		5,48	5,32	3,42	3,33		
				0,49	1,14		5,63	5,58	3,52	3,49		

Tabelle A-15.10: Massen und Abmaße; Einzel- und Mittelwerte sowie berechnete Standardabweichungen von Wärmeleitfähigkeiten sowie berechnete Einzel- und Mittelwerte von Trockenroh-dichten modifizierter Dünnbettmörtel-Proben im Vergleich mit den Nullproben (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Probenalter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Wärmeleitfähigkeit			Trockenroh-dichte	
								Einzelwert	Mittelwert	Standardabweichung	Einzelwert	Mittelwert
								$\lambda_{10, tr.}$ [W/(m·K)]			ρ [g/cm ³]	
[Vol.-%]	[d]	m [g]	l [mm]	b [mm]	h [mm]							
Dünnbettmörtel	Nullprobe	0,58	7	218,17	100,48	100,13	22,13	0,224	0,21	0,01	0,98	0,85
				196,70	99,33	99,33	24,92	0,199			0,80	
				211,91	98,45	98,20	26,62	0,200			0,82	
			28	137,05	99,10	99,09	15,82	0,199			0,88	
				225,58	102,05	102,52	26,51	0,210			0,82	
				193,71	101,65	101,66	22,82	0,204			0,81	
Pyrogene Kieselsäure	10	1,00	7	169,11	100,07	100,38	23,40	0,157	0,15	0,00	0,72	0,75
				169,99	99,69	99,63	23,41	0,156			0,73	
				143,81	99,24	99,05	20,30	0,155			0,72	
				202,10	99,34	99,33	23,72	0,152			0,85	
				151,39	98,43	98,71	22,00	0,153			0,76	
				190,95	97,11	97,24	26,98	0,154			0,74	
			28	-	-	-	-	-			-	
				-	-	-	-	-			-	
				-	-	-	-	-			-	
				-	-	-	-	-			-	
				-	-	-	-	-			-	
				-	-	-	-	-			-	
		1,10	7	147,97	99,23	99,20	21,72	0,153	0,15	0,00	0,69	0,70
				175,08	98,88	99,37	26,04	0,154			0,68	
				142,30	97,54	97,17	21,53	0,149			0,70	
			28	156,79	99,56	99,82	22,24	0,150			0,70	
				-	-	-	-	-			0,71	
				181,81	98,91	98,63	26,56	0,156			0,70	
		1,20	7	148,76	100,21	100,29	22,77	0,138	0,13	0,00	0,65	0,65
				121,33	99,35	99,13	19,21	0,133			0,65	
				145,95	99,56	99,37	23,07	0,128			0,63	
			28	155,84	97,09	96,68	25,52	0,129			0,65	
				172,57	99,92	99,89	25,49	0,142			0,68	
				145,85	99,16	99,02	22,62	0,137			0,66	
1,40	7	129,02	98,87	99,13	22,41	0,118	0,12	0,01	0,59	0,59		
		127,07	97,86	98,00	22,78	0,117			0,58			
		84,58	99,04	99,31	14,41	0,100			0,60			
	28	128,52	100,72	101,05	21,45	0,128			0,59			
		115,50	98,72	98,86	20,54	0,120			0,58			
		122,62	100,49	100,31	21,18	0,125			0,58			
1,65	7	137,43	99,35	99,24	25,26	0,112	0,11	0,01	0,56	0,54		
		143,38	99,18	98,77	25,71	0,108			0,57			
		-	-	-	-	-			-			
	28	92,00	99,19	99,09	17,45	0,116			0,54			
		119,22	98,19	98,29	23,18	0,096			0,53			
		134,76	98,90	99,33	26,13	0,101			0,53			

Tabelle A-15.11: Fortsetzung Tab. A-15.10

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Wärmeleitfähigkeit			Trocken- rohdichte	
								Einzel- wert	Mittel- wert	Stan- dard- abweichung	Einzel- wert	Mittel- wert
								$\lambda_{10, tr.}$	$\bar{\xi}$	ρ		
[Vol.-%]	[d]	[g]	[mm]	[W/(m·K)]	[g/cm ³]							
Expandier- ter Perlit	5	0,73	7	262,89	100,12	100,22	31,15	0,237	0,22	0,01	0,84	0,83
				235,27	97,83	97,63	28,95	0,222			0,84	
				194,26	98,48	98,62	23,67	0,217			0,84	
			28	224,53	100,51	100,14	27,10	0,212			0,82	
				222,19	100,21	100,04	26,76	0,242			0,83	
				252,59	98,82	99,21	31,59	0,227			0,83	
	10	0,87	7	209,98	99,67	99,41	26,28	0,214	0,21	0,00	0,80	0,79
				196,10	98,64	98,49	25,41	0,202			0,80	
				208,35	99,50	99,45	26,75	0,210			0,79	
			28	-	-	-	-	-			-	
				210,01	100,35	100,23	27,07	0,206			0,78	
				212,33	100,58	100,34	26,50	0,211			0,79	
	15	1,00	7	200,29	99,99	99,87	26,42	0,193	0,19	0,00	0,77	0,75
				184,76	100,64	100,55	24,43	0,193			0,75	
				176,48	97,95	98,11	24,29	0,183			0,75	
			28	182,29	99,69	99,60	25,34	0,192			0,72	
				174,15	100,16	99,99	23,12	0,194			0,75	
				159,26	99,21	99,00	22,10	0,187			0,73	

Tabelle A-15.12: Fortsetzung Tab. A-15.11

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Wärmeleitfähigkeit			Trocken- rohddichte	
								Einzel- wert	Mittel- wert	Stand- abwei- chung	Einzel- wert	Mittel- wert
								$\lambda_{10, tr.}$			ρ	
[Vol.-%]	[d]	[g]	[mm]	[W/(m·K)]	\bar{s}	[g/cm ³]						
Pyrogene Kieselsäure und expandier- ter Perlit in Kombina- tion	5 + 5	0,70	7	194,19	101,52	101,13	21,44	0,212	0,22	0,01	0,88	0,85
				182,51	100,17	99,79	21,48	0,199			0,85	
				177,56	98,54	98,86	21,35	0,211			0,85	
			28	181,02	98,78	98,69	22,23	0,226			0,84	
				185,70	99,35	99,78	22,49	0,228			0,83	
				188,74	98,11	98,45	23,31	0,226			0,84	
		0,80	7	186,49	101,28	100,46	24,09	0,188	0,19	0,00	0,76	0,79
				166,48	99,77	100,01	21,48	0,186			0,78	
				181,08	97,97	98,07	24,13	0,187			0,77	
			28	161,88	99,47	99,42	19,76	0,194			0,83	
				160,98	100,00	99,92	19,75	0,189			0,81	
				178,90	97,72	97,77	23,01	0,188			0,81	
		1,00	7	162,10	100,22	100,70	23,08	0,171	0,16	0,00	0,70	0,69
				152,84	98,85	98,74	23,08	0,162			0,68	
				163,10	99,79	99,64	24,08	0,160			0,68	
			28	173,64	100,89	101,01	24,67	0,157			0,70	
				135,55	99,54	100,13	19,86	0,162			0,69	
				134,92	99,53	99,45	19,87	0,156			0,68	
		1,22	7	149,17	100,91	101,17	23,54	0,143	0,14	0,00	0,62	0,63
				130,21	100,42	100,08	20,80	0,143			0,62	
				129,13	100,34	100,42	20,87	0,146			0,62	
			28	116,65	98,60	98,90	18,94	0,145			0,64	
				127,90	98,09	97,73	20,11	0,144			0,66	
				121,48	100,54	100,64	20,16	0,143			0,60	
	5 + 10	1,35	7	133,17	98,78	98,84	23,65	0,136	0,14	0,00	0,58	0,60
				117,81	98,96	99,12	20,48	0,133			0,58	
				119,79	100,42	101,06	20,37	0,131			0,59	
			28	200,03	99,96	100,11	32,59	0,138			0,62	
				156,79	99,56	99,50	25,17	0,141			0,63	
				154,90	99,95	99,89	25,31	0,142			0,62	
	7,5 + 7,5	1,53	7	112,72	99,73	99,76	20,70	0,113	0,12	0,00	0,55	0,55
				117,40	99,46	99,50	21,26	0,119			0,55	
				116,28	98,97	98,86	21,32	0,122			0,56	
			28	113,77	99,47	99,83	21,10	0,121			0,54	
				110,20	100,38	99,97	20,10	0,110			0,54	
				107,69	99,80	99,86	19,94	0,120			0,54	
	10 + 5	1,70	7	106,09	100,57	100,40	20,92	0,098	0,10	0,00	0,50	0,53
				102,47	100,91	101,30	20,21	0,100			0,50	
				119,10	99,46	99,42	23,42	0,104			0,52	
			28	137,81	99,67	99,75	24,59	0,105			0,56	
				136,67	100,37	100,06	24,37	0,109			0,56	
				100,21	99,10	99,65	19,80	0,102			0,52	

Tabelle A-15.13: Fortsetzung Tab. A-15.12

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung	Massen- Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Proben- alter	Masse	Länge	Breite	Höhe	Wärmeleitfähigkeit			Trockenroh- dichte	
				m	l	b	h	Einzel- wert	Mittel- wert	Stand- abwei- chung	Einzel- wert	Mittel- wert
				[g]	[mm]	[mm]	[mm]	$\lambda_{10, tr.}$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\rho}$	[g/cm ³]	
[Vol.-%]	[d]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[W/(m·K)]					
Pyrogene Kieselsäure und expan- diertes Alumosilikat Sorte III in Kombi- nation	5 + 5	0,70	7	187,90	99,25	99,45	22,07	0,212	0,21	0,01	0,86	0,87
				185,73	98,86	98,95	21,84	0,210			0,87	
				226,98	100,55	100,83	25,16	0,217			0,88	
			28	164,34	98,44	98,01	19,56	0,193			0,87	
				226,11	100,73	101,04	25,25	0,218			0,87	
				164,37	98,66	98,94	19,50	0,213			0,87	
		0,80	7	181,56	101,10	101,26	23,62	0,186	0,18	0,00	0,75	0,76
				187,32	99,95	100,15	23,93	0,190			0,78	
				-	-	-	-	-			0,76	
			28	171,80	100,20	100,12	22,77	0,180			0,75	
				175,98	99,90	100,16	23,80	0,178			0,74	
				181,46	99,87	99,54	23,83	0,185			0,76	
		0,90	7	131,70	99,77	99,89	18,63	0,174	0,17	0,00	0,71	0,67
				140,41	99,96	99,87	20,26	0,166			0,69	
				137,52	99,24	99,01	20,20	0,165			0,70	
			28	117,16	99,47	98,99	23,72	0,167			0,50	
				164,35	99,39	99,57	23,70	0,172			0,70	
				122,17	100,26	100,42	17,11	0,173			0,71	
		1,00	7	136,32	99,93	99,73	20,58	0,150	0,15	0,00	0,66	0,65
				132,98	100,22	99,76	20,56	0,151			0,65	
				142,91	100,66	100,71	21,78	0,154			0,65	
			28	136,98	98,64	98,93	21,82	0,144			0,64	
				120,80	98,44	98,32	19,52	0,148			0,64	
				125,33	99,73	99,86	19,72	0,151			0,64	
		1,10	7	146,00	100,33	100,49	22,89	0,155	0,14	0,01	0,64	0,63
				142,52	101,22	101,32	21,79	0,139			0,64	
				125,64	97,64	98,22	21,47	0,137			0,61	
			28	120,44	100,12	100,09	19,03	0,149			0,63	
				131,12	99,91	100,09	21,41	0,141			0,62	
				-	-	-	-	-			-	
		1,20	7	103,98	97,98	97,53	18,28	0,139	0,14	0,00	0,59	0,59
				131,95	101,05	100,99	21,47	0,145			0,60	
				130,25	100,85	100,64	21,68	0,138			0,59	
			28	145,40	101,55	101,29	23,98	0,139			0,59	
				136,23	98,64	98,68	23,98	0,138			0,59	
				136,07	100,10	100,38	22,92	0,140			-	

Tab. A-16: Einzel- und berechnete Mittelwerte der Feststoffdichten sowie berechnete Standardabweichungen von abgebundenen, aufgemahlene Dünnbettmörtel-Proben im Vergleich mit der Nullprobe (Stoffraumrechnung)

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen- verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatzstoff	Feststoffdichte				
			Einzelwert ρ_i [g/cm ³]			Mittel- wert	Standard- abweichung \bar{s}
			Probe 1	Probe 2	Probe 3		
Dünnbettmörtel	Null- probe	0,58	2,0886	2,0826	2,0811	2,08	0,003
Pyrogene Kieselsäure	10	1,00	2,2868	2,2843	2,2902	2,29	0,002
Pyrogene Kiesel- säure und expan- dierter Perlit	5 + 5	0,80	2,5542	2,5486	2,5612	2,55	0,005
Pyrogene Kiesel- säure und expan- diertes Alumo- silikat Sorte III	5 + 5	0,80	2,1465	2,1498	2,1630	2,15	0,007

Tabelle A-17: Porenvolumen-Verhältnisse modifizierter Dünnbettmörtel-Proben in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit nach 28 Tagen im Vergleich mit der Nullprobe

Nullprobe / Zusatzstoff	Dosierung [Vol.-%]	Massen-Verhältnis Wasser / Mörtel + Zusatz- stoff	Druck- festigkeit 28 d	Wärmeleit- fähigkeit 28 d	Poren- volumen- Verhältnis
			Mittelwert β_D [MPa]	Mittelwert $\lambda_{10, tr.}$ [W/(m·K)]	
Dünnbettmörtel	Null- probe	0,58	10,3	0,21	0,09
Expandiertes Alumosilikat Sorte II	10	0,60	11,7	0,22	0,06
Glashohlkugeln		0,62	9,6	0,22	0,08
Bimsmehl Sorte I		0,56	14,5	0,23	0,10
Vermiculit		0,57	12,0	0,23	0,08
Schmelzkammer-Granulat		0,56	14,2	0,24	0,10
Bimsmehl Sorte II		0,56	15,1	0,25	0,06
Expandierter Perlit		0,57	20,5	0,25	0,06
Expandiertes Alumosilikat Sorte III		0,60	9,0	0,18	0,07
Pyrogene Kieselsäure		0,86	11,9	0,17	0,24
		1,10	8,0	0,15	0,44
	1,20	6,8	0,13	0,38	
	1,40	3,9	0,12	0,31	
	1,65	3,2	0,11	0,38	
Expandierter Perlit	5	0,73	10,2	0,22	0,18
	10	0,87	7,4	0,21	0,15
	15	1,00	5,5	0,19	0,15
Pyrogene Kieselsäure und expandierter Perlit	5 + 5	0,70	8,9	0,22	0,12
		1,00	4,2	0,16	0,27
		1,22	3,4	0,14	0,34
	5 + 10	1,35	3,3	0,14	0,40
	7,5 + 7,5	1,53	3,0	0,12	0,49
10 + 5	1,70	2,9	0,10	0,50	
Pyrogene Kieselsäure und expandiertes Alumosilikat Sorte III	5 + 5	0,70	10,4	0,21	0,16
		0,90	6,3	0,17	0,20
		1,00	4,8	0,17	0,24
		1,10	4,9	0,15	0,32
		1,20	3,4	0,14	0,34

Die folgenden Bilder A-1.1 bis A-1.22 zeigen stereomikroskopische Aufnahmen des aus dem Dünnbettmörtel durch Siebung abgetrennten Leichtzuschlags sowie der verwendeten Zusatzstoffe.



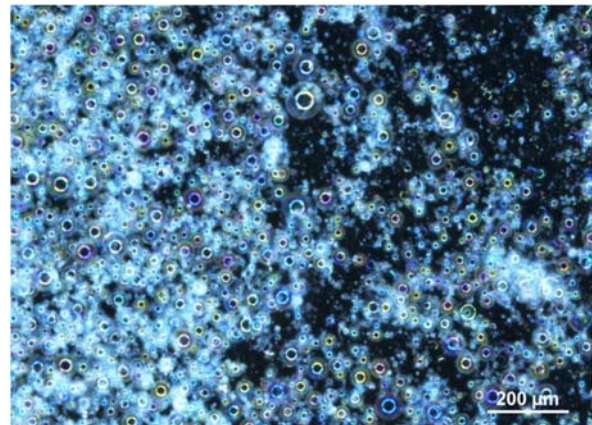
A-1.1: Im Dünnbettmörtel enthaltene Leichtzuschlag-Fraktion ($x_5 < 500 \mu\text{m}$)



A-1.2: Im Dünnbettmörtel enthaltene Schaumglaskugeln ($x_5 < 500 \mu\text{m}$)



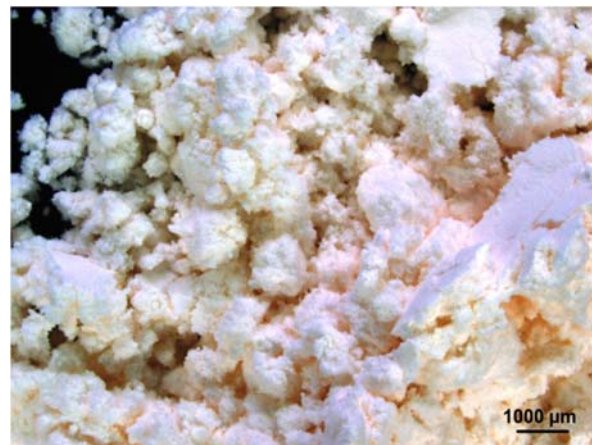
A-1.3: Hohlglaskugeln Sorte I



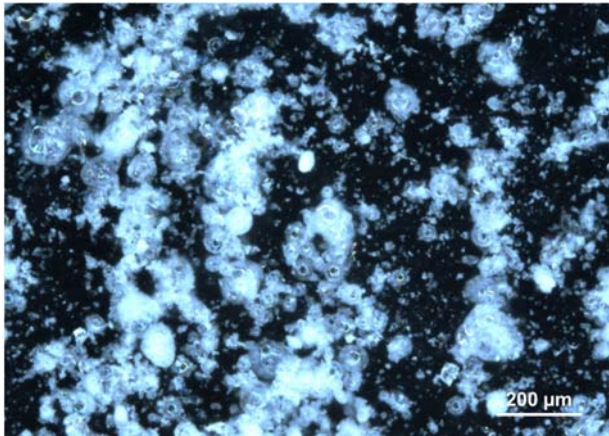
A-1.4: Hohlglaskugeln Sorte II



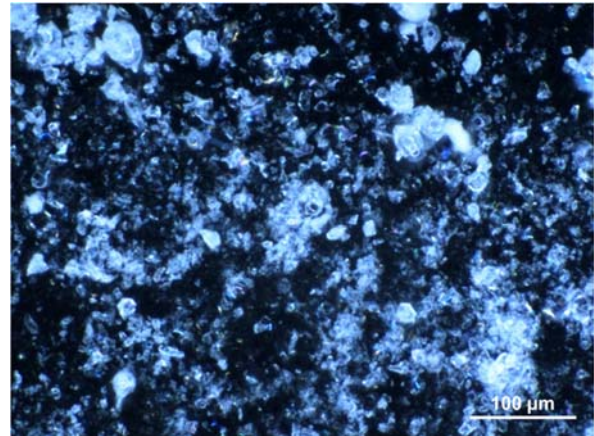
A-1.5: Phenolharzkugeln



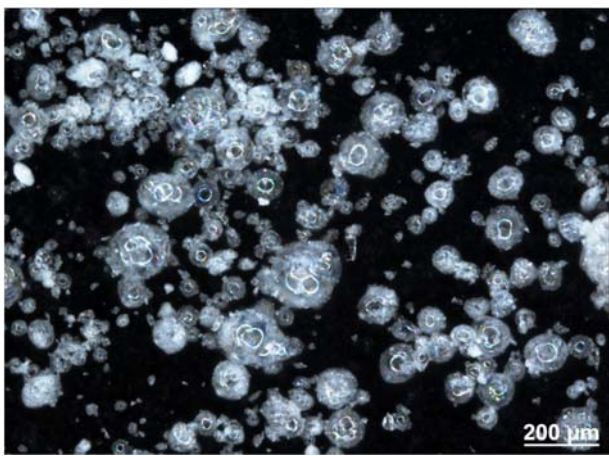
A-1.6: Kaolin (China Clay)



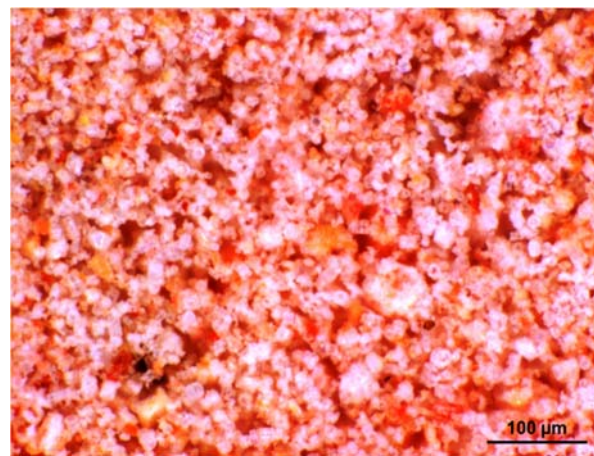
A-1.7: Expandiertes Aluminosilikat Sorte I



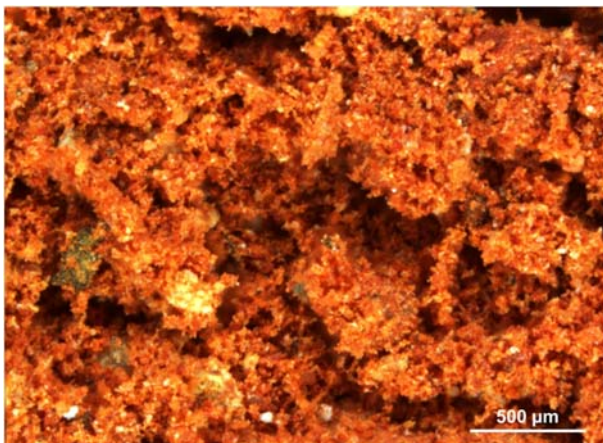
A-1.8: Expandiertes Aluminosilikat Sorte II



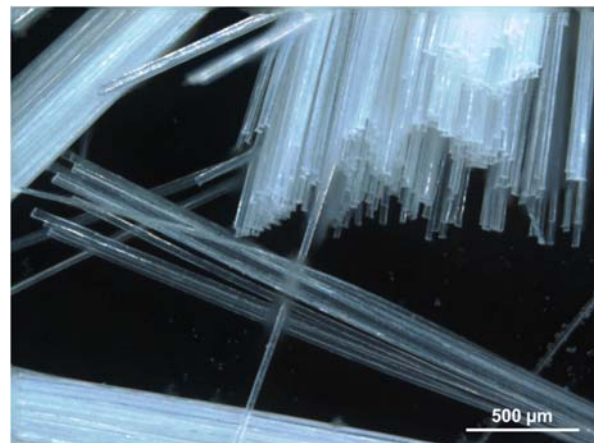
A-1.9: Expandiertes Aluminosilikat Sorte III



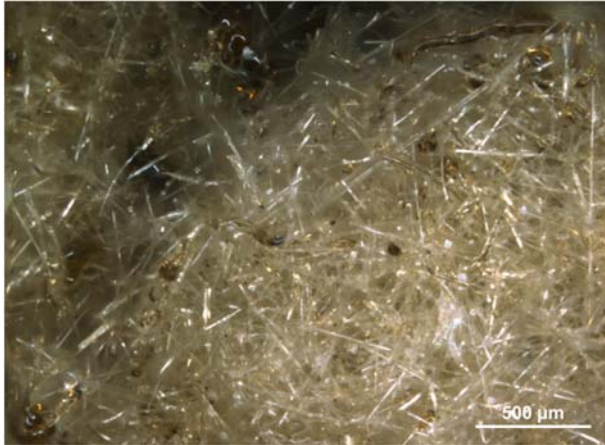
A-1.10: Kieselgur



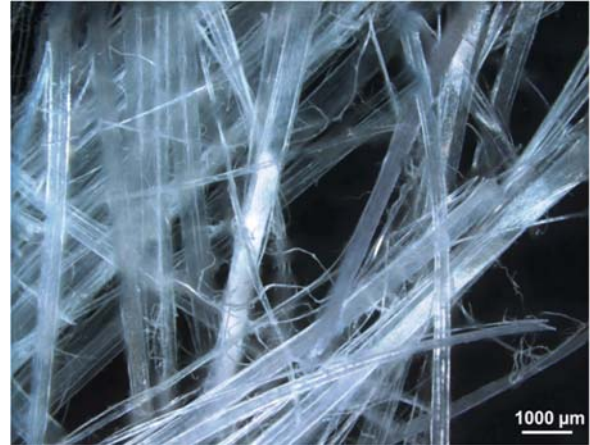
A-1.11: Ziegelmehl



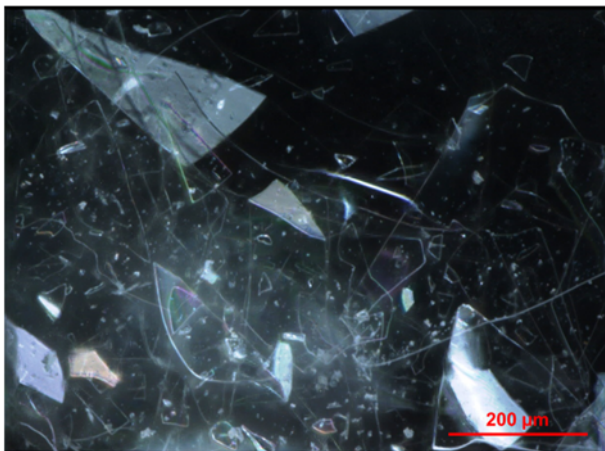
A-1.12: Dralon-Kurzschneidfasern



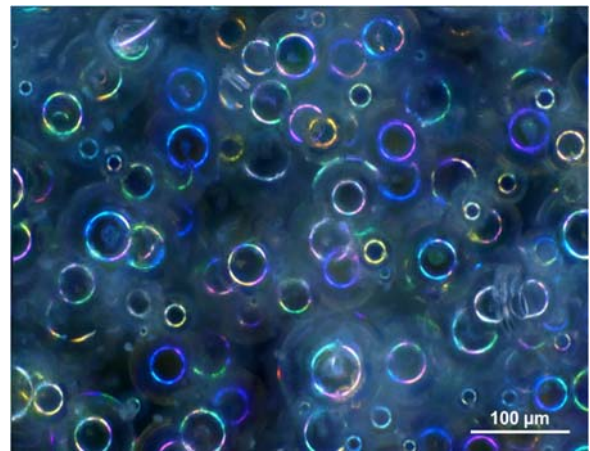
A-1.13: Glaswolle-Filz (zerkleinert)



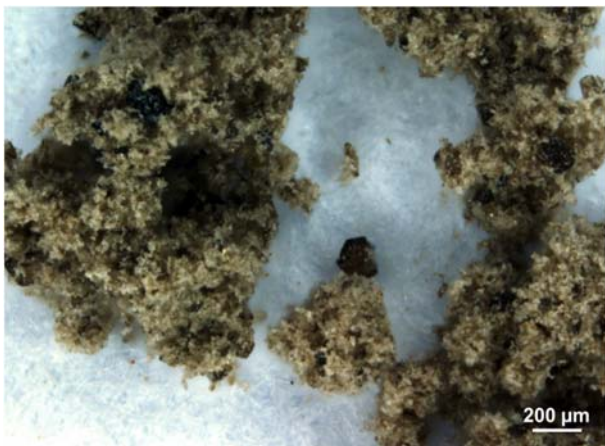
A-1.14: Polypropylen-Spleissfasern



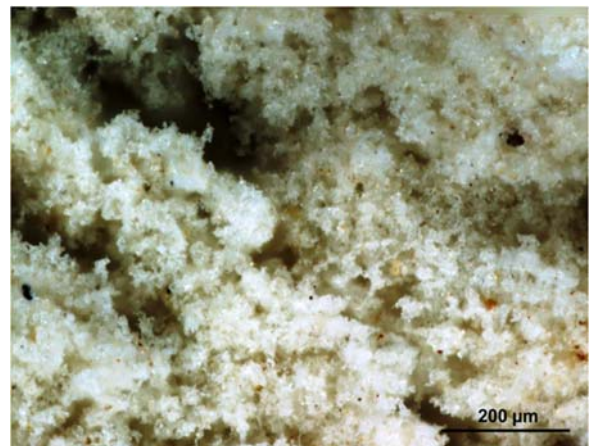
A-1.15: Glasplättchen



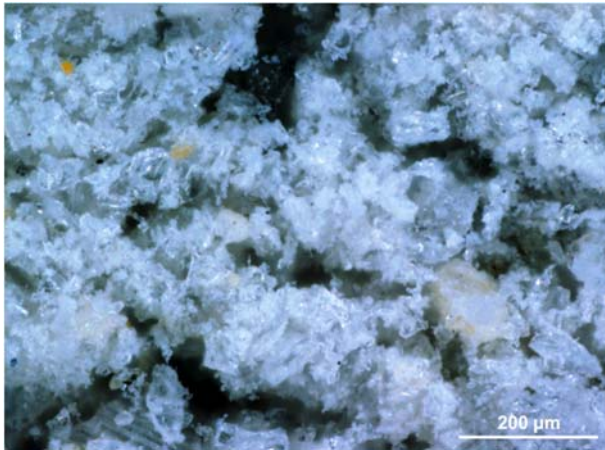
A-1.16: Glashohlkugeln



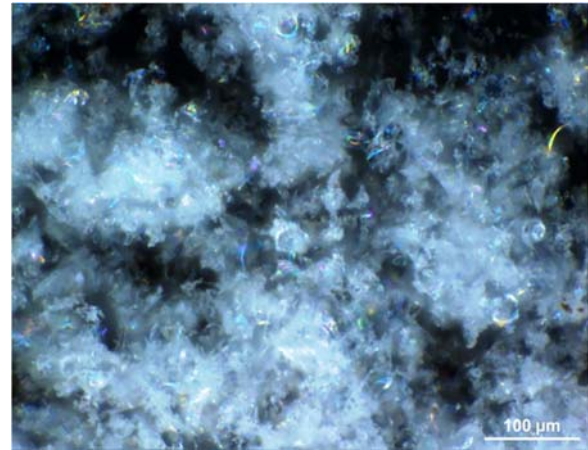
A-1.17: Schmelzkammer-Granulat



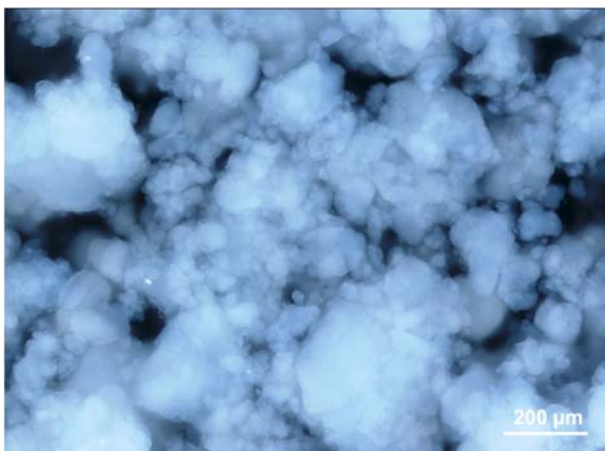
A-1.18: Bismehl Sorte I



A-1.19: Bismehl Sorte II



A-1.20: Expandierter Perlit

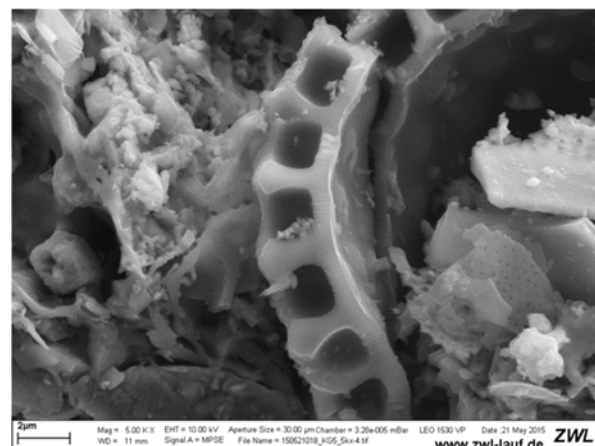


A-1.21: Pyrogene Kieselsäure



A-1.22: Vermiculit

Bilder A-1.1 - A-1.22: Stereomikroskopische Aufnahmen der Ausgangs- bzw. Zusatzstoffe



Bilder A-2.1 - A-2.2: REM-Aufnahmen einer Ziegelprobe mit 5 Ma.-% Diatomeenerde (gebrannt bei 900 °C) in 2000-facher Vergrößerung (links); in 5000-facher Vergrößerung (rechts) (Hein, 2016)

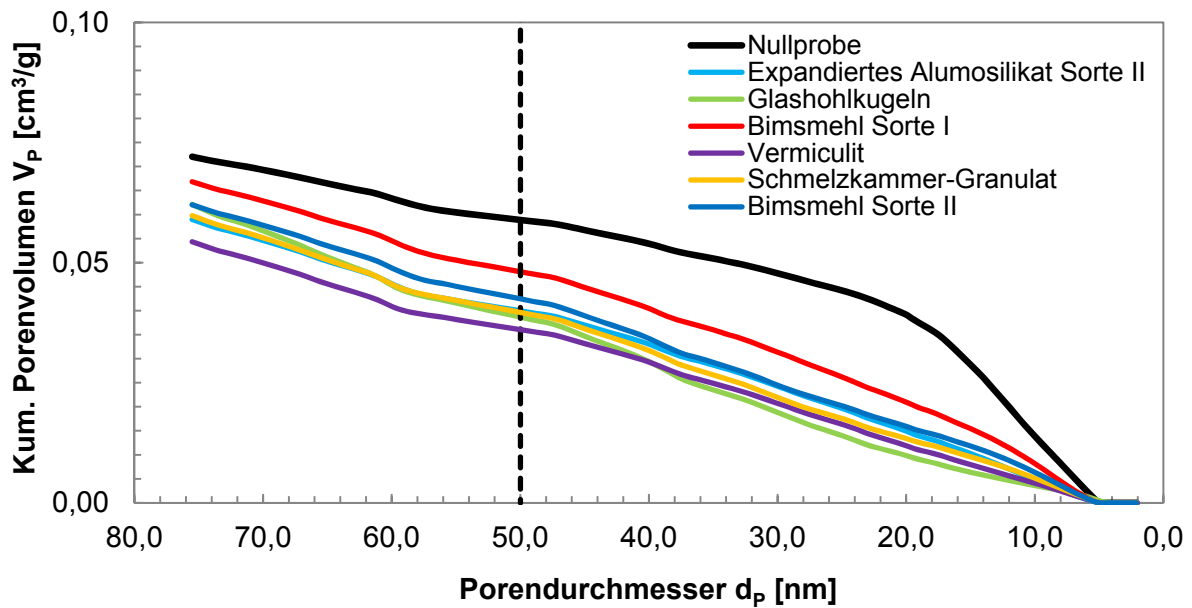


Bild A-3: Kumulatives Porenvolumen von Dünnbettmörtel-Proben mit jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff im Vergleich mit der Nullprobe im Porengrößenbereich < 75 nm

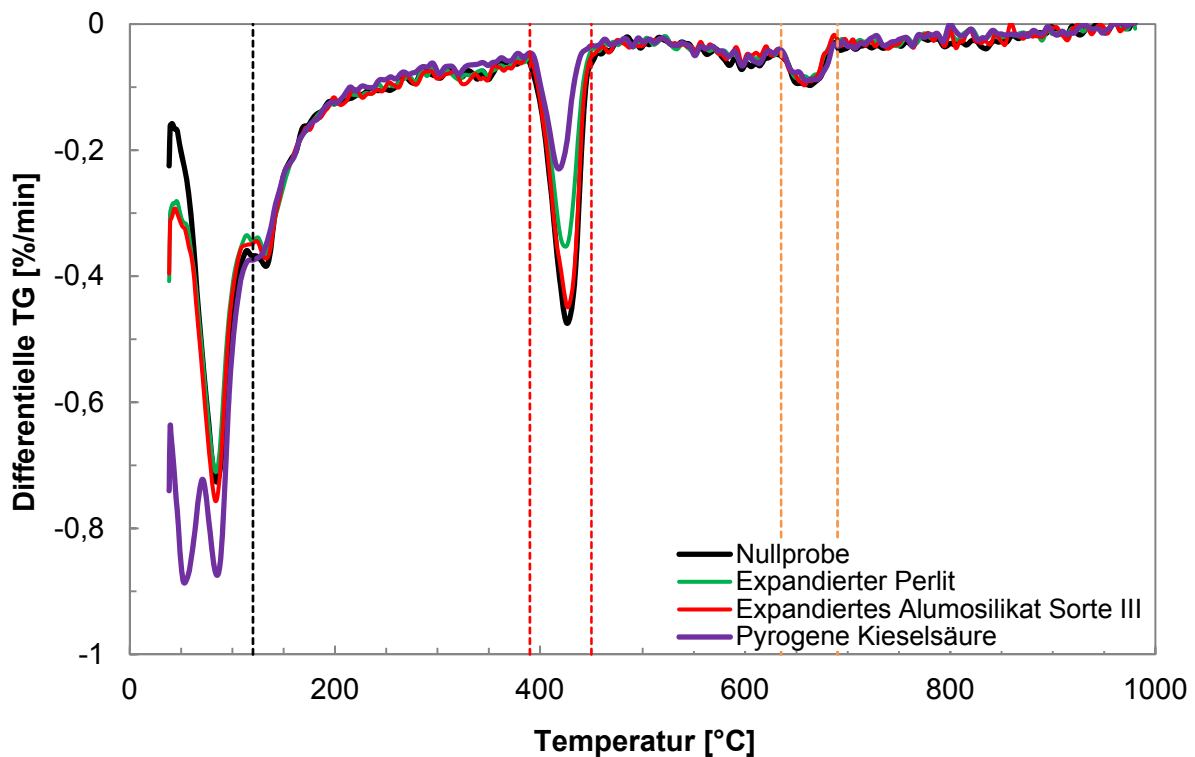


Bild A-4: Differentielle Thermogravimetrie (DTG) einer Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit jeweils 10 Vol.-% Zusatzstoff nach einer Abbindezeit von 28 Tagen in Laborluft-Atmosphäre im Vergleich mit der Nullprobe

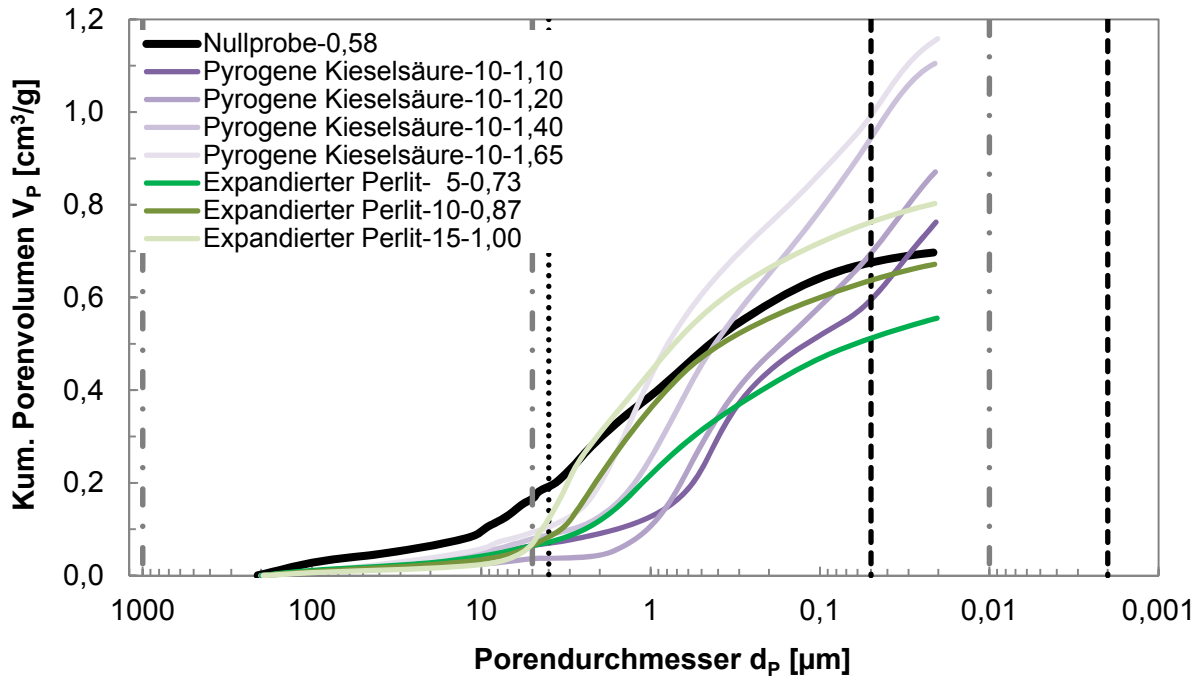


Bild A-5.1: Kumulative Porenvolumina modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen im Vergleich mit der Nullprobe

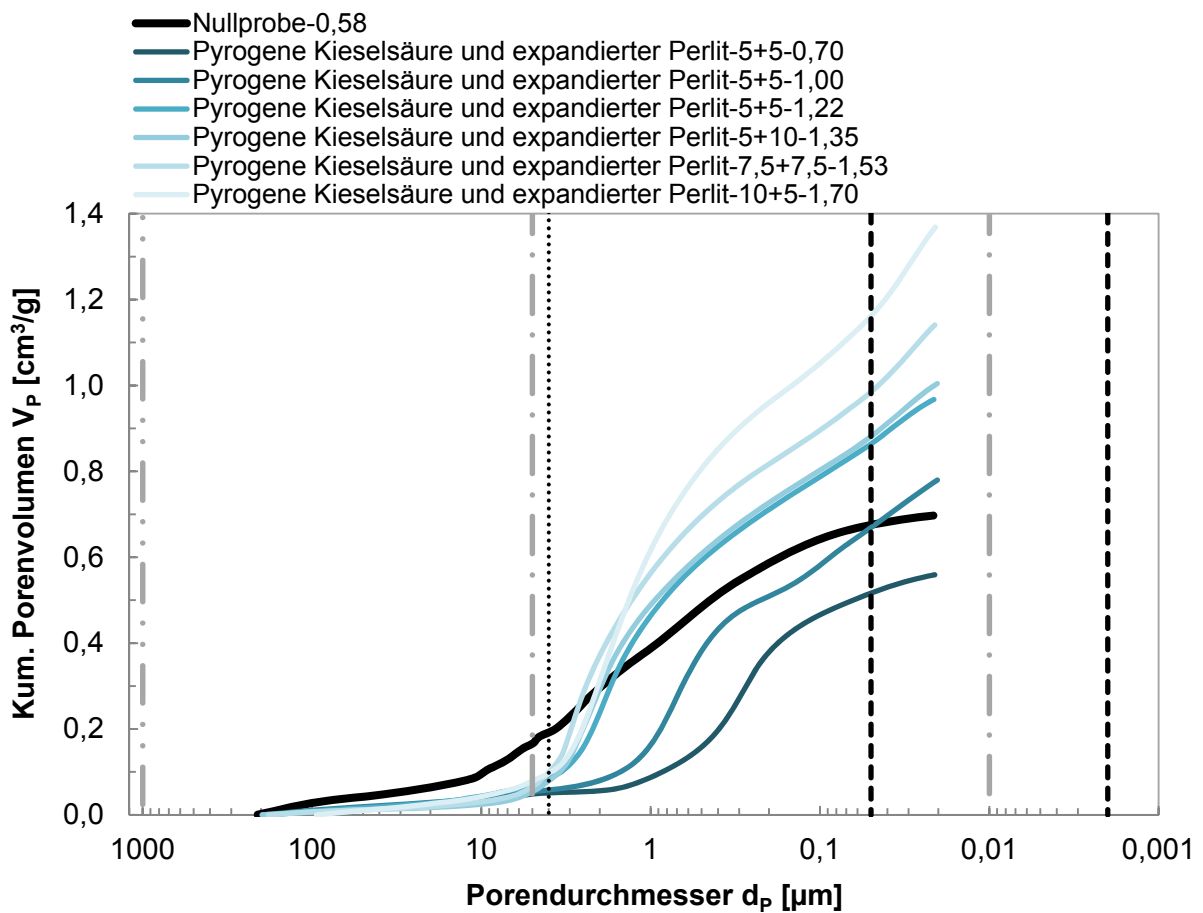


Bild A-5.2: Kumulative Porenvolumina modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen im Vergleich mit der Nullprobe

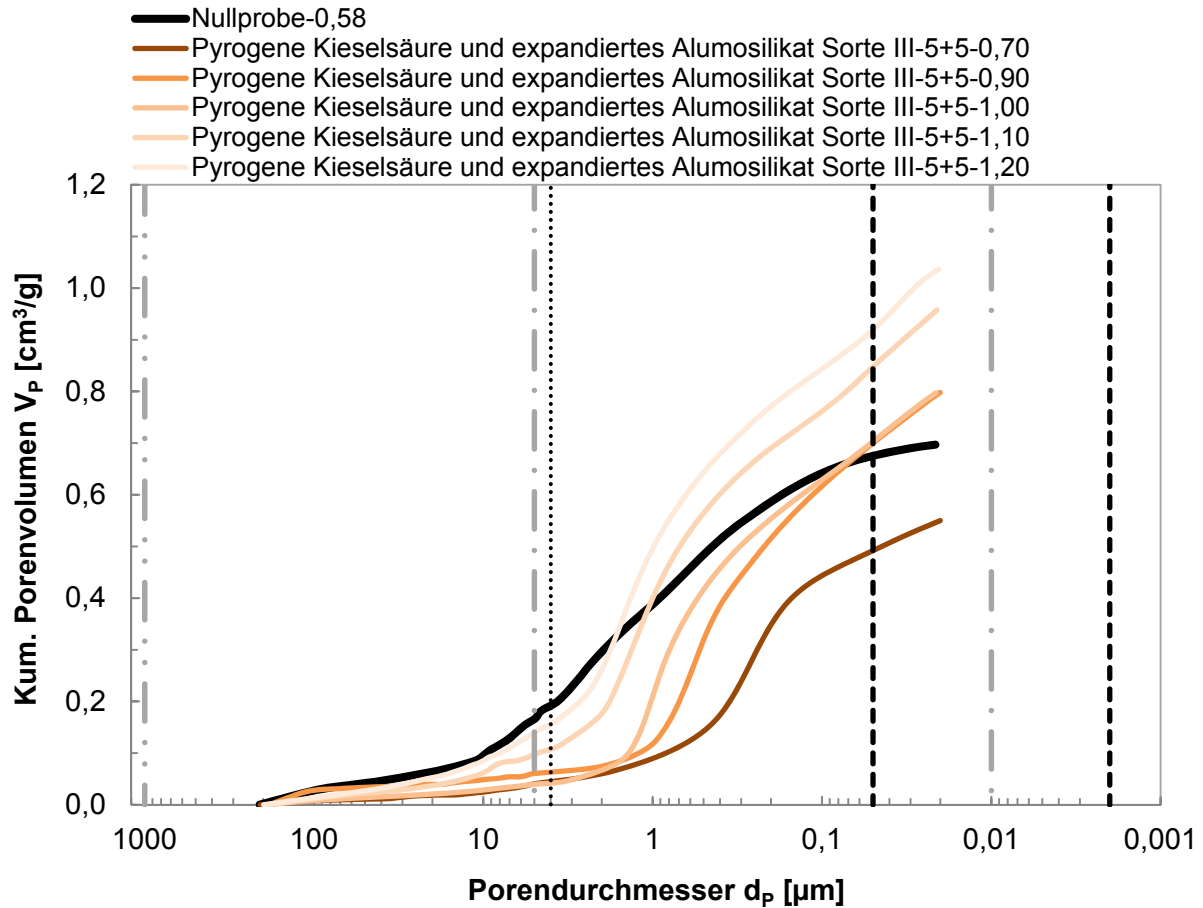


Bild A-5.3: Kumulative Porenvolumina modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen im Vergleich mit der Nullprobe

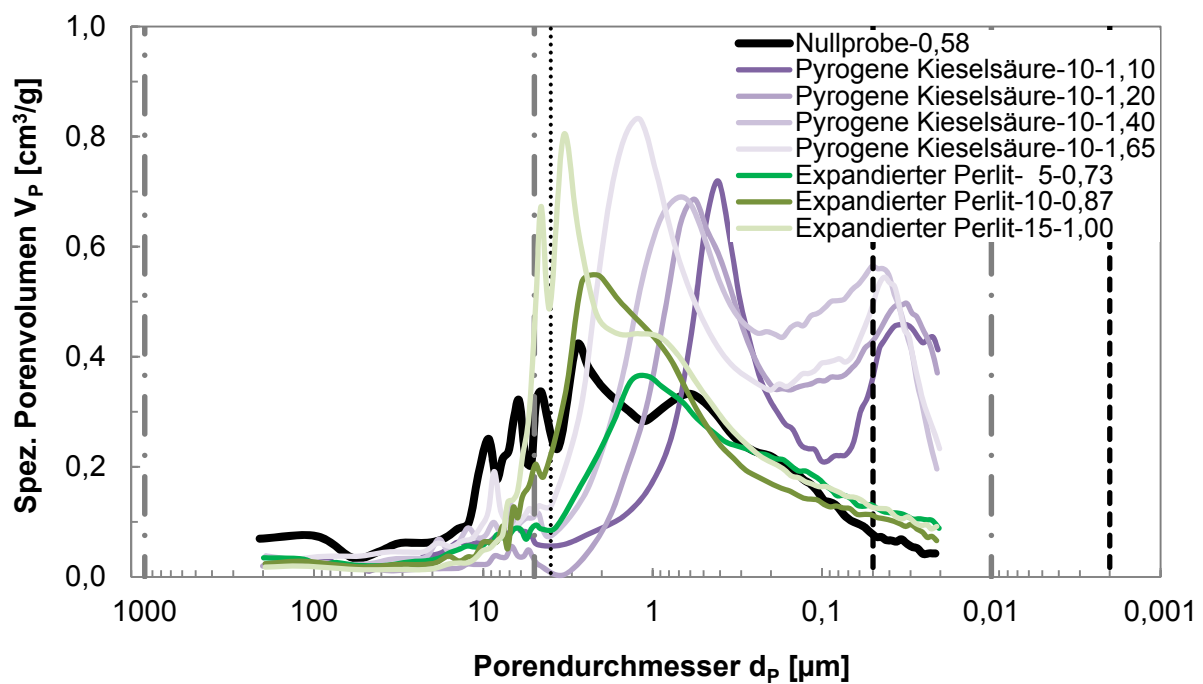


Bild A-6.1: Spezifische Porenvolumina modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen im Vergleich mit der Nullprobe

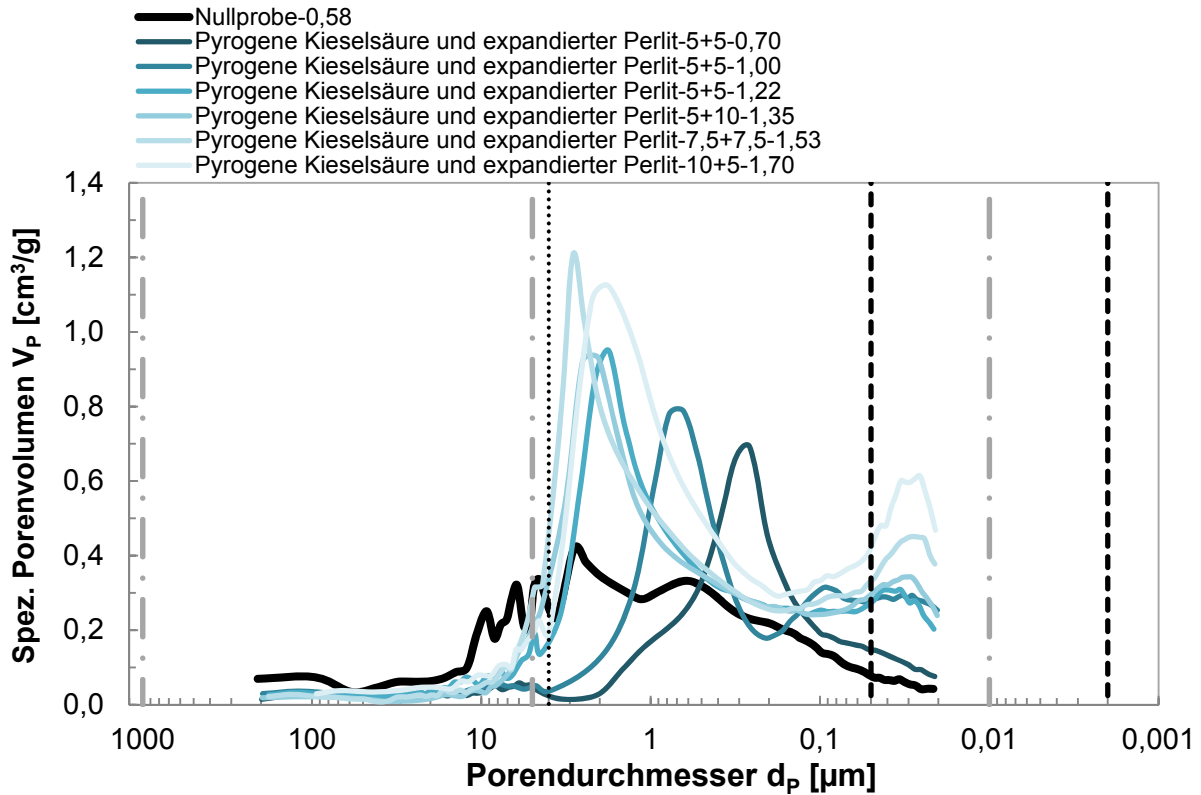


Bild A-6.2: Spezifische Porenvolumina modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen im Vergleich mit der Nullprobe

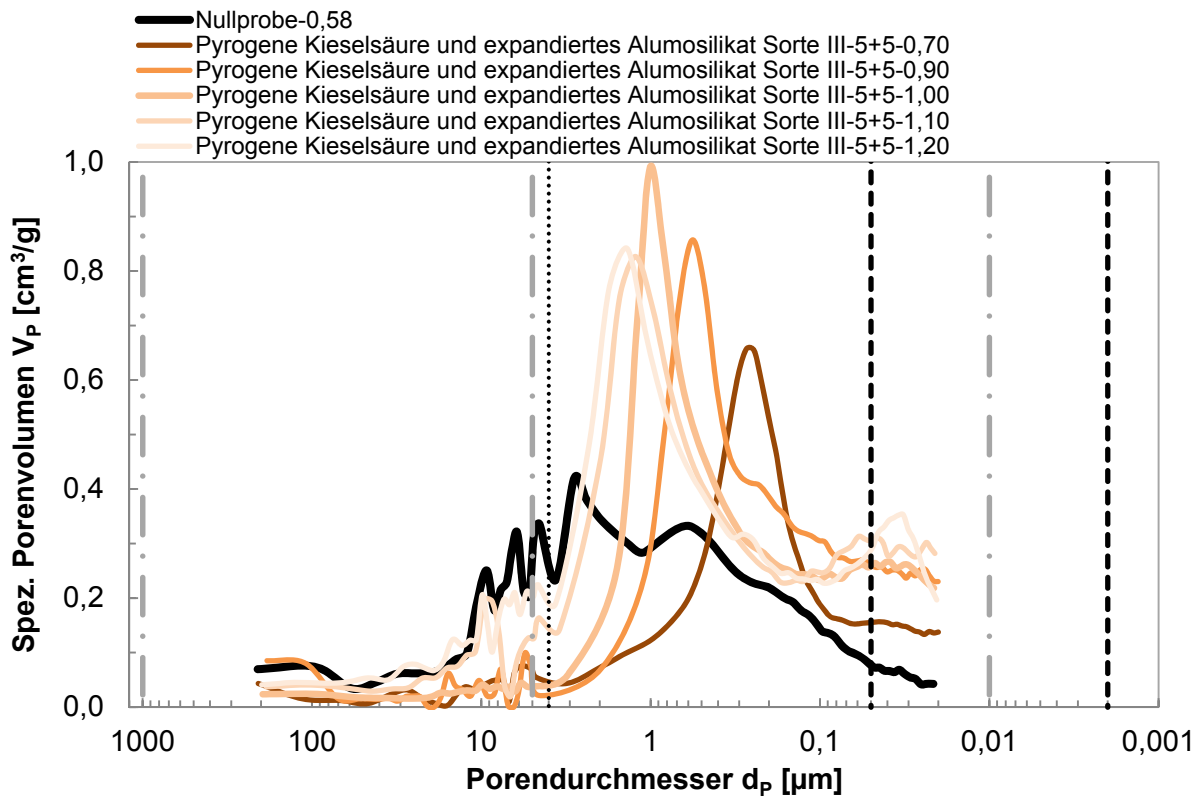


Bild A-6.3: Spezifische Porenvolumina modifizierter Dünnbettmörtel-Mischungen im Vergleich mit der Nullprobe

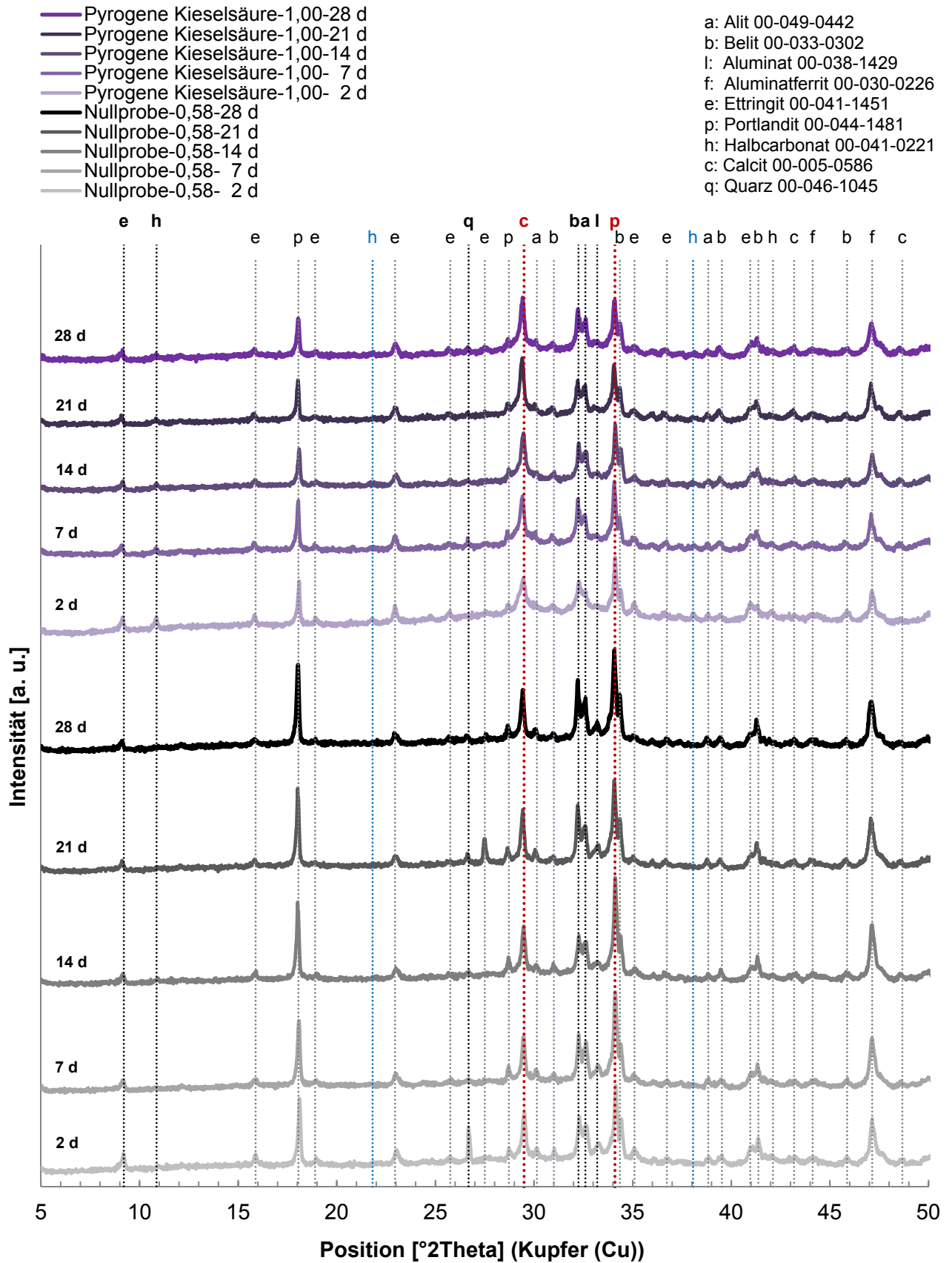


Bild A-7.1: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen (hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre)

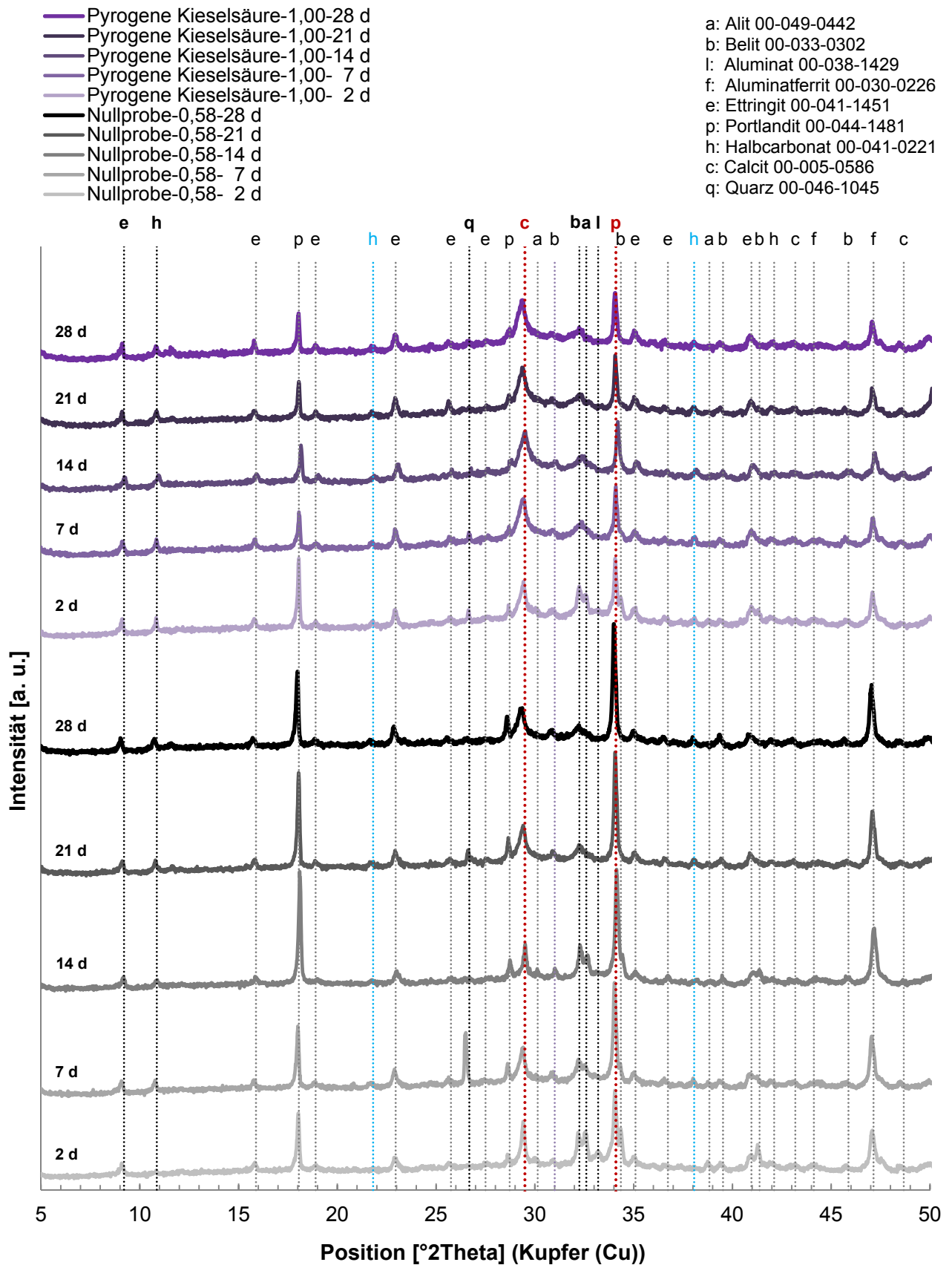


Bild A-7.2: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% pyrogener Kieselsäure im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen (hydratisiert unter CO₂-Ausschluss)

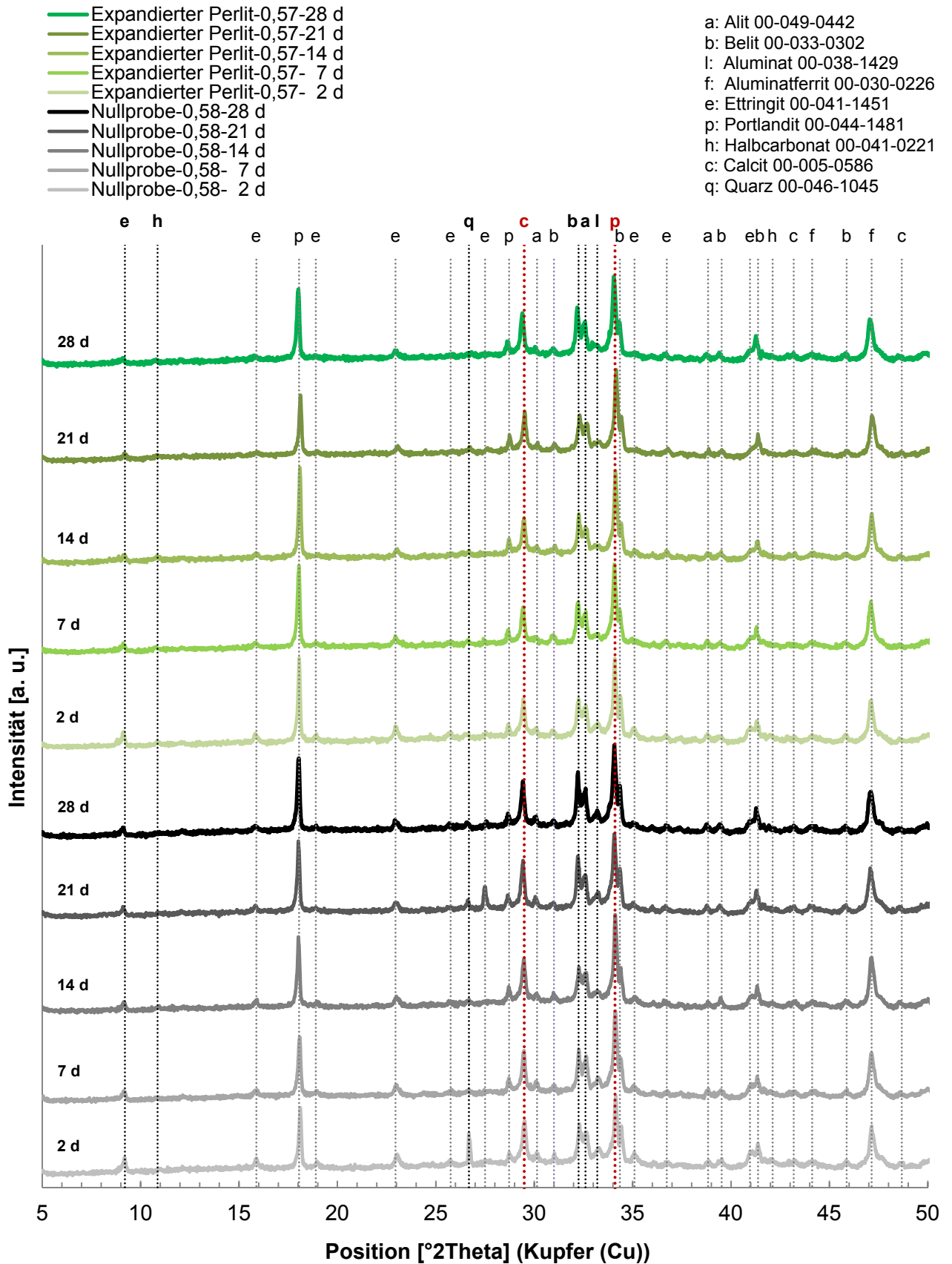


Bild A-8.1: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen (hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre)

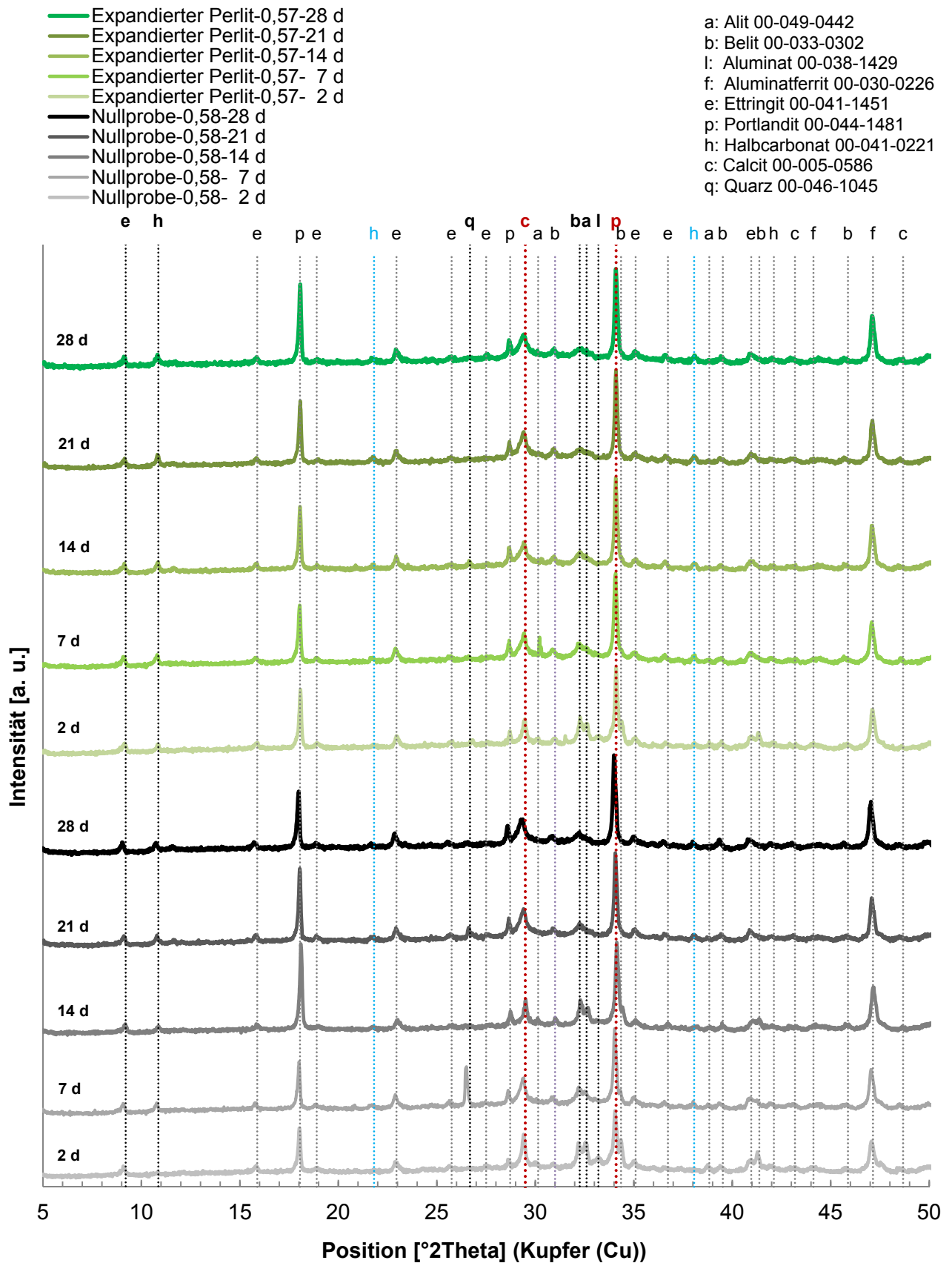


Bild A-8.2: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit 10 Vol.-% expandiertem Perlit im Probenalter von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen (hydratisiert unter CO₂-Ausschluss)

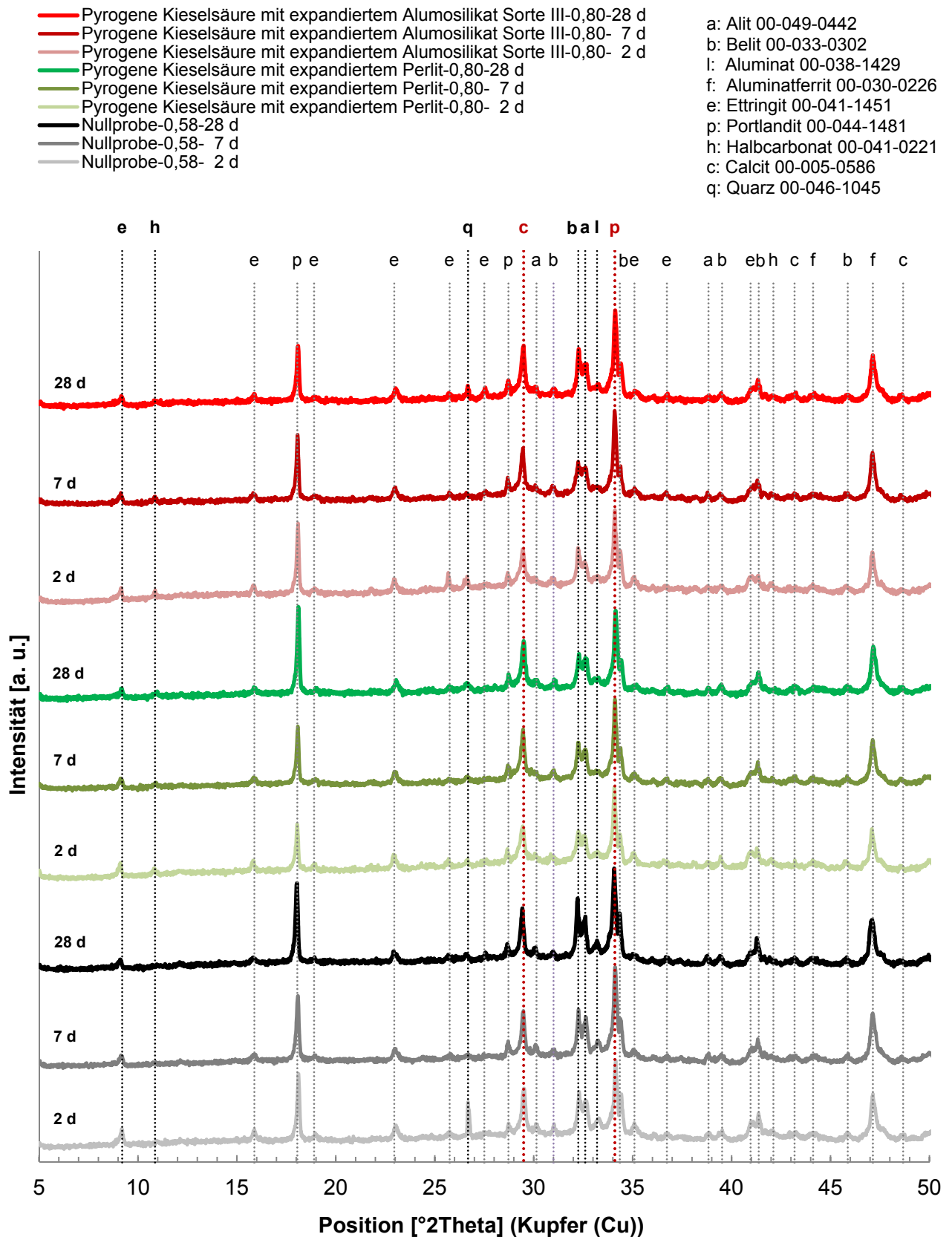


Bild A-9: Röntgenographische Untersuchungen einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III im Probenalter von 2, 7 und 28 Tagen (hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre)

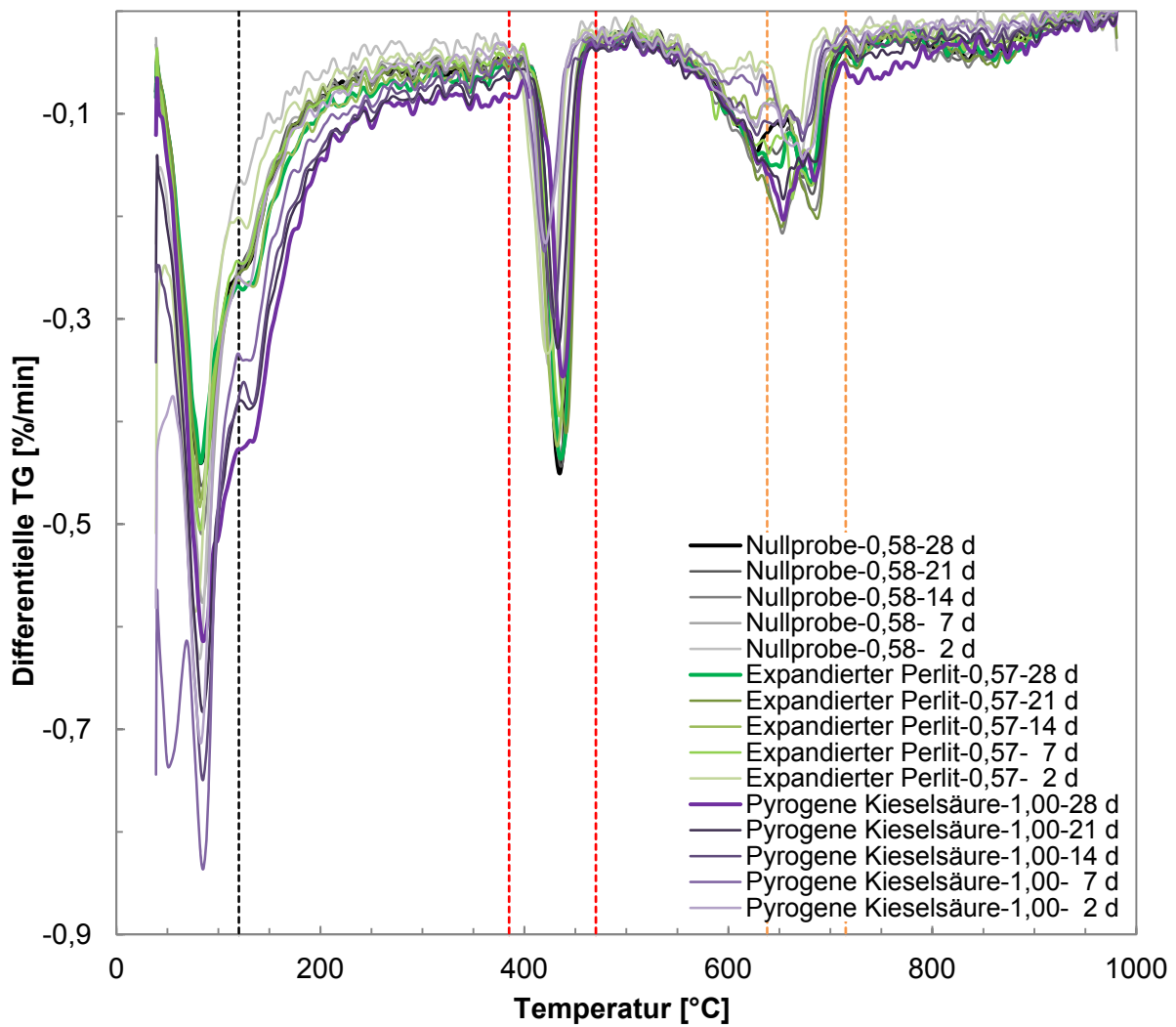


Bild A-10: Differentielle Thermogravimetrie (DTG) einer Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% Zusatzstoff nach einer Abbindezeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen (hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre)

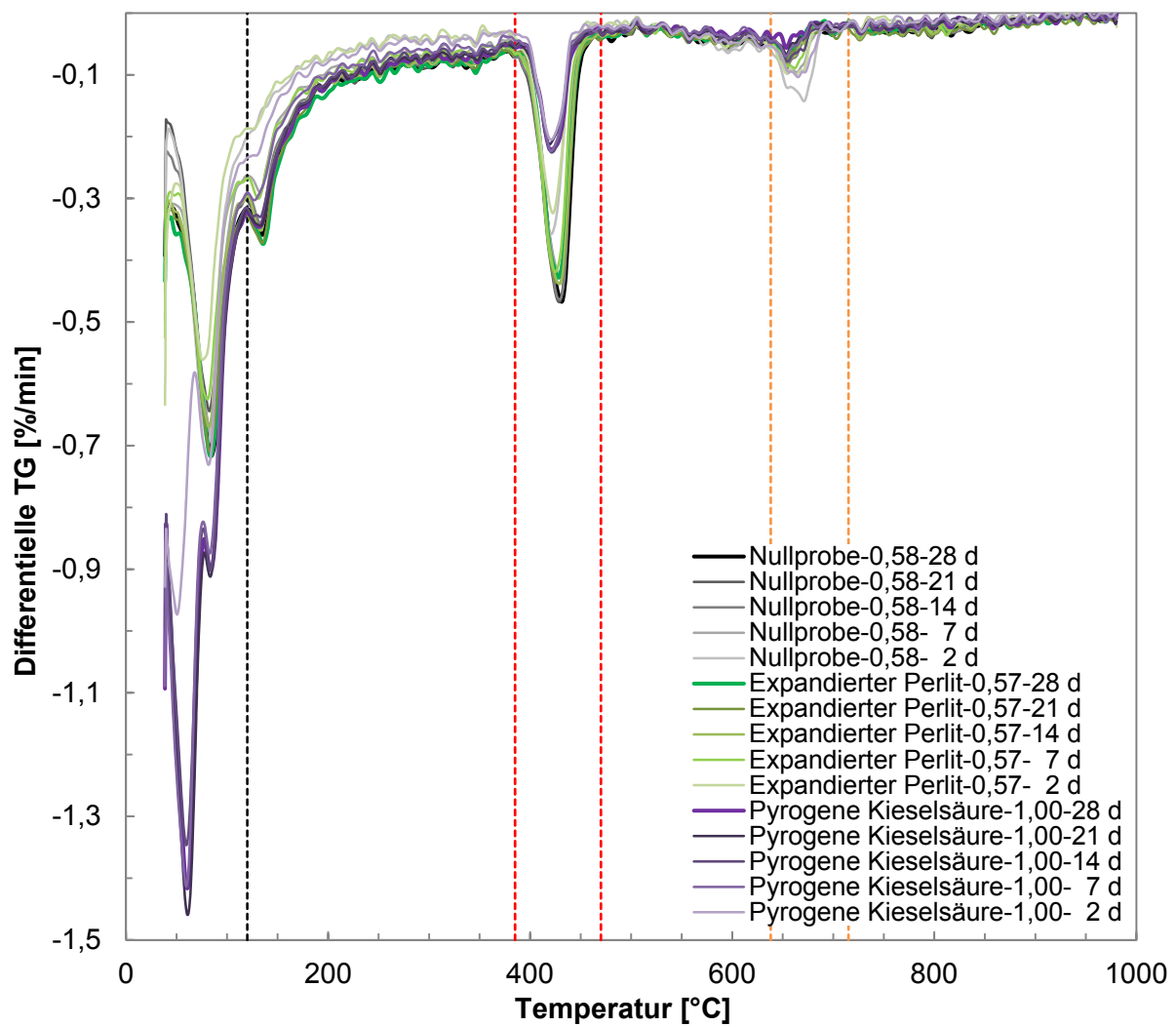


Bild A-11: Differentielle Thermogravimetrie (DTG) einer Dünnbettmörtel-Nullprobe und modifizierter Dünnbettmörtel-Proben mit 10 Vol.-% Zusatzstoff nach einer Abbindezeit von 2, 7, 14, 21 und 28 Tagen (hydratisiert unter CO₂-Ausschluss)

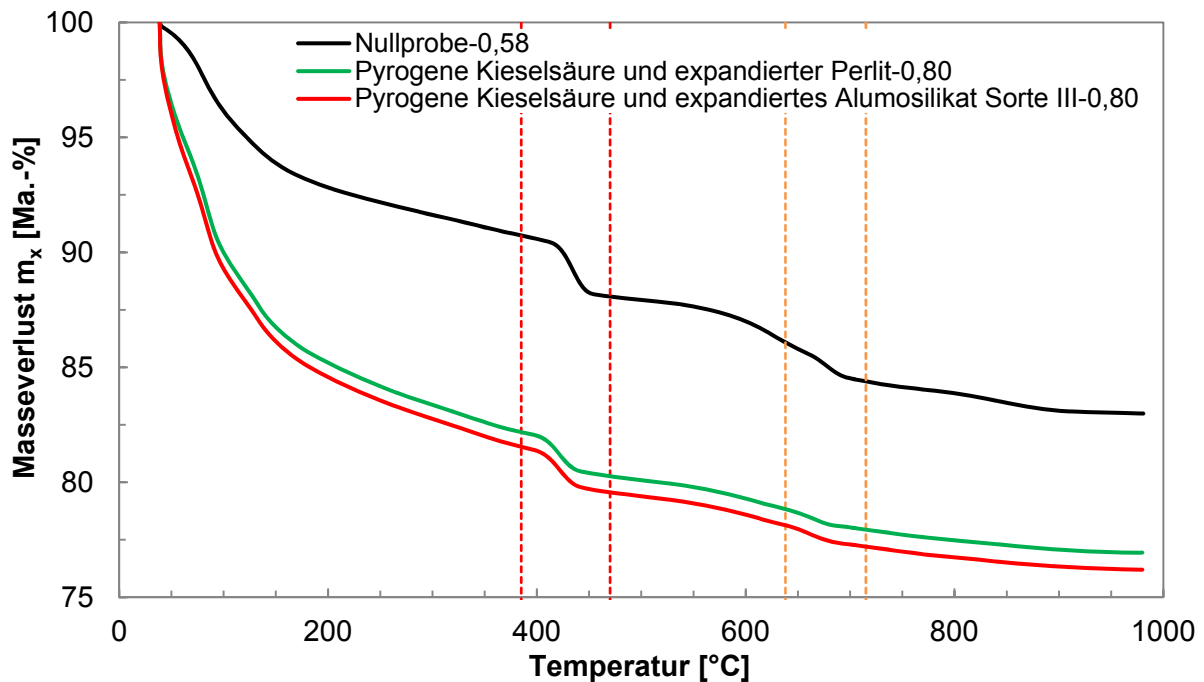


Bild A-12: Masseverlust [Ma.-%] einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III im Probenalter von 28 Tagen (hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre)

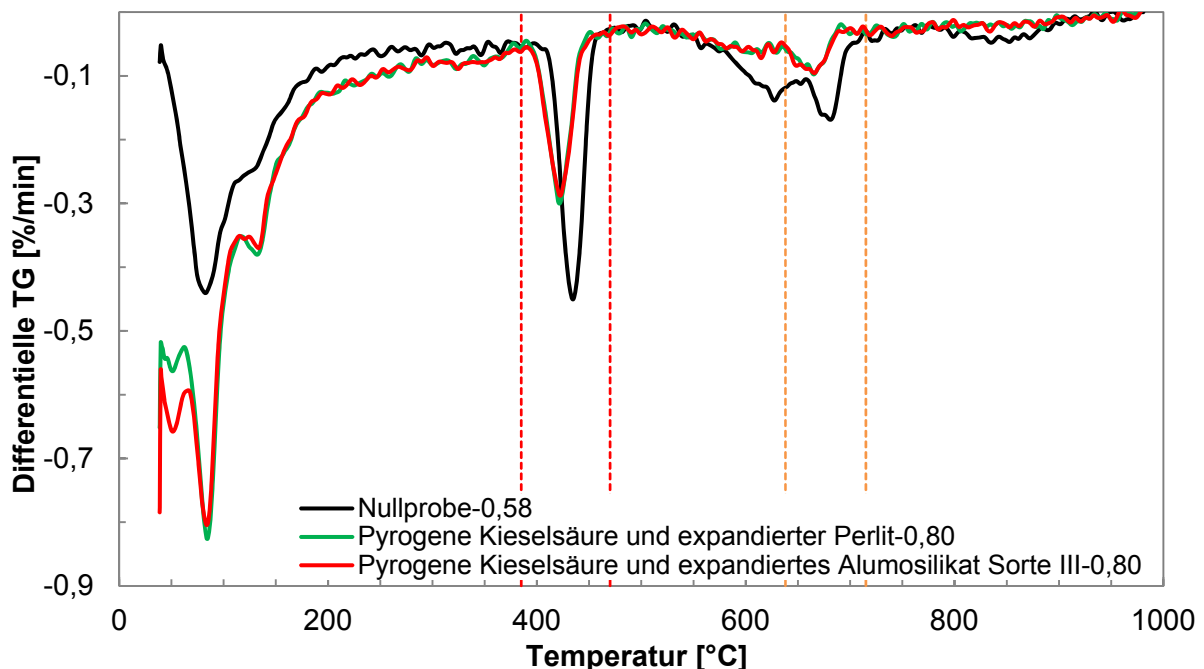


Bild A-13: Differentielle Thermogravimetrie (DTG) einer Dünnbettmörtel-Nullprobe im Vergleich mit einer Dünnbettmörtel-Probe mit je 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Perlit sowie einer Dünnbettmörtel-Probe mit jeweils 5 Vol.-% pyrogener Kieselsäure und expandiertem Alumosilikat Sorte III im Probenalter von 28 Tagen (hydratisiert in Laborluft-Atmosphäre)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm in der Fakultät Werkstofftechnik und wurde zwischen März 2014 und Februar 2018 durchgeführt.

Meinem Doktorvater *Herrn Prof. Dr. Dr. Herbert Pöllmann*, Stellvertretendem Geschäftsführendem Direktor des Instituts für Geowissenschaften und Geographie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, danke ich sehr herzlich für die Themenstellung der Dissertation und die sehr gute Betreuung und Beratung bei der Durchführung der Arbeiten.

Dem Projektleiter dieser Forschungsarbeit und meinem akademischen Lehrer, *Herrn Prof. Dr. Wolfgang Krcmar* möchte ich für die Anregung dieses Themas und die Möglichkeit der eigenständigen Bearbeitung danken. Darüber hinaus danke ich ihm für zahlreiche gute Ratschläge während der Durchführung der Experimente.

Bei *Herrn Prof. Dr. Bernhard Middendorf* bedanke ich mich für die Begutachtung der Arbeit.

Den beiden Geschäftsführern des Zentrums für Werkstoffanalytik Lauf GmbH (ZWL), *Herrn Dr. Jürgen Göske* und *Herrn Dipl.-Ing. Univ. Werner Kachler* sowie *Frau Dipl.-Ing. (FH) Susanne Winter* danke ich für die Messmöglichkeiten am Rasterelektronenmikroskop.

Mein herzlicher Dank gilt auch *Frau Prof. Dr. Uta Helbig* und besonders *Herrn Prof. Dr. Bastian Raab* von der Fakultät Werkstofftechnik der TH Nürnberg, für die Hilfsbereitschaft bei zementchemischen Fragestellungen.

Herrn Prof. Dr. Thomas Freimann und *Herrn Dipl.-Ing. (FH) Thomas Killing* von der Fakultät Bauingenieurwesen der TH Nürnberg, danke ich sehr herzlich für ihre Unterstützung und die Nutzung der Laborräume.

Herrn Dr. Rolf Kapust von der TH Nürnberg, danke ich für die Unterstützung bei der Ausarbeitung der Patentanmeldung.

Mein Dank gilt auch *Herrn Walter Helmrich* von der Firma *Franken Maxit Mauermörtel GmbH & Co.* für die kostenlose Bereitstellung von Mauer- und Putzmörteln.

Ganz besonders möchte ich meiner ehemaligen Kollegin *Frau Dr. Barbara Hintz* für die zahlreichen Diskussionen sowie das freundschaftliche Verhältnis während der Promotion danken.

Bei meinem Kollegen *Herrn M. Sc. Nicolai Hesse* bedanke ich mich ebenfalls für das freundschaftliche Verhältnis sowie für die Unterstützung bei den Finite-Elemente-Berechnungen.

Frau M. Eng. Daniela Sappa und *Herrn B. Eng. Tim Grotz* danke ich für die tolle Unterstützung bei der Anfertigung von zwei Publikationen.

Besonderer Dank gilt auch *Frau Dipl.-Ing. (FH) Jessica Aumüller* und *Herrn Dipl.-Ing. (FH) Klaus Groz* von der Fakultät Werkstofftechnik, die mir mit Rat und Tat bei der Durchführung und Verwirklichung von Experimenten sowie bei Problemen organisatorischer Art zur Seite standen.

Außerdem danke ich allen nicht namentlich erwähnten Personen für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Von ganzem Herzen möchte ich meiner Familie und meiner Freundin Tini danken, die mich während der vergangenen Jahre stets motiviert haben.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Nürnberg, 11. Mai 2018

Sebastian Schmidt

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sebastian Schmidt
Adresse: Spenglerstraße 6
D-90443 Nürnberg
Geburtsdatum: 22. August 1984
Geburtsort: Nürnberg
Familienstand: Ledig, keine Kinder
Nationalität: Deutsch

Hochschulstudium

2014 – 2018: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Doktorand bei Prof. Dr. Dr. H. Pöllmann
2011 – 2012: Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Studiengang „Neue Materialien, Nano- und
Produktionstechnik“
Abschluss: "M. Eng."
2004 – 2008: Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Studiengang „Werkstofftechnik“
Abschluss: "Dipl.-Ing. (FH)"

Berufliche Tätigkeit

2013 – 2017: Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitskreis von
Prof. Dr. W. Krcmar
2010 – 2011: Videojet Technologies GmbH, Limburg a. d. Lahn
Vertriebs- und Projektingenieur
2009 – 2010: Quantachrome GmbH & Co. KG, Odelzhausen
Vertriebsingenieur

Ersatzdienst

2003 – 2004: Hals-Nasen-Ohrenklinik, Erlangen
Zivildienst

Schulbildung

2001 – 2003: Städtische Fachoberschule Nürnberg
Abschluss: „Fachhochschulreife“
1997 – 2001: Oskar-Sembach-Realschule, Lauf a. d. Pegnitz
Abschluss: „Mittlere Reife“
1995 – 1997: Hauptschule Eckental
1991 – 1995: Grundschule Eckenheid, Eckental

Nürnberg, 11. Mai 2018

Sebastian Schmidt