

ORIGINAL ARTICLE

Quellverhalten von Portland- und Hochofenzementstein bei unterschiedlichen Temperaturen

Falk Wagemann¹ | Frank Schmidt-Döhl¹ | Amir Rahimi²

Korrespondenz

Falk Wagemann
Technische Universität Hamburg
Institut für Baustoffe, Bauphysik
und Bauchemie
Eißendorfer Str. 42
21079 Hamburg
E-Mail: falk.wagemann@tuhh.de

¹ Technische Universität Hamburg,
Hamburg, Deutschland

² Bundesanstalt für Wasserbau,
Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung

Zementgebundene Baustoffe quellen bei permanenter Wasserlagerung, d. h., sie erfahren eine zeitabhängige Volumenzunahme. Wesentlich für das Quellverhalten zementgebundener Baustoffe ist der volumetrische Anteil an Zementstein. Für Bereiche, in denen Betonbauteile permanent einer Wassenumgebung ausgesetzt sind, wie zum Beispiel bei Gründungen im Grundwasser, kann das Quellverhalten ggf. die Tragwirkung verbessern, da sich Bauteile im Boden infolge des Quelldruckes verspannen. Dieser Beitrag untersucht das Quellverhalten von Zementstein aus CEM I und CEM III/B mit w/z-Werten von 0,3 und 0,5 bei 10 °C und 20 °C betrachtet. Zusätzlich wurden im Rahmen der Untersuchungen Zementsuspensionen verpresst, um Filtrationseffekte abzubilden. Neben dem Quellmaß zu verschiedenen Zeitpunkten (1, 3, 5, 7, 14, 28 und 56 Tage) wurde der Hydratationsgrad und Gehalt an Calciumhydroxid mit Hilfe der Thermogravimetrie und die Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie als Materialkennwerte bestimmt. Die Untersuchungsmethoden erlauben einen Rückschluss von Porosität und Hydratphasenbildung auf das Quellverhalten der untersuchten Zementsteine zu ziehen. Bei beiden Zementarten führen niedrigere Lagerungstemperaturen zu höheren Quellmaßen.

Schlüsselwörter

Quellen, Zementstein, Portlandzement, Hochofenzement, Porosität, Hydratationsgrad, Verpressen

1 Einleitung

Unter lastunabhängige Verformungen zementgebundener Baustoffe werden das Schwinden und Quellen aufgeführt. Während das Schwinden von großer baupraktischer Relevanz ist, wird dem Quellen eine nachrangige Bedeutung zugesprochen. Quellen beschreibt die zeitabhängige Volumenzunahme bei permanenter Wasserlagerung. Für geotechnische Element wie Bohrpfähle, Mikropfähle und Verpressanker, welche in Kontakt mit dem Grundwasser stehen, können die durch das Quellen hervorgerufenen Volumenzunahmen zu einer Verspannung im Baugrund führen.

Experimentelle Untersuchungen an verpressten Zementsuspensionen in nicht-bindigem Boden zeigten eine Zunahme der Radialspannungen infolge einer Volumenzunahme innerhalb der ersten 16 bis 18 h nach dem Einbau [1]. Durch das Verpressen wird das Anmachwasser durch den aufgetragenen Druck in den Porenraum des Bodens gepresst und der w/z-Wert der Suspension verringert. Die so entstehenden Verpresskörper eines Verpressankers haben w/z-Werte von 0,2 bis 0,3 [2; 3]. Es wird angenommen, dass die verpressten Zementsteine mit ihren niedrigen w/z-Werten durch das Nachhydratisierungspotential

verstärkt Wasser aus dem Baugrund aufnehmen und Quelldrücken entstehen, welche die Ankertragfähigkeit von Verpressankern erhöhen [4; 5].

Das Quellmaß zementgebundener Baustoffe wird maßgeblich durch den Zementstein und seinen Anteil am Gesamtvolumen bestimmt. Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton ist üblicherweise unempfindlich gegenüber dieser Art der Volumenzunahme [6]. Die Porosität und Porenradialverteilung des Zementsteines sind für die Entstehung eines Quelldruckes entscheidend. Insbesondere der Porenradialbereich bis etwa 25 nm ist für Schwind- und Quellvorgänge maßgebend [7]. In der Gelphase des Zementsteines ist Wasser an den Oberflächen adsorbiert. Mit zunehmender Wasseraufnahme wirkt dieses Wasser den herrschenden Kohäsionskräften entgegen und erzeugt einen Quelldruck [8].

In der Literatur finden sich abweichende Angaben zum Quellmaß von zementgebundenen Baustoffen. So gibt [6] für Zementstein ein Quellmaß von 0,1 % ohne Zeitbezug an. Für Betone ohne quellfähige Gesteinskörnung konnten nach 30-jähriger Wasserlagerung Quellmaße zwischen 0,018 und 0,033 % beobachtet werden [9]. Höhere w/z-Werte führten bei diesen Untersuchungen zu höheren

Quellmaßen [9]. Insgesamt sind die Änderungsraten der Verformung infolge der Wasseraufnahme gering [10].

Zementsteine mit w/z -Werten $< 0,3$ zeigen bei Wasserlagerung aufgrund der Dichtheit und Selbstaustrocknung im Inneren ein ausgeprägtes Schwinden [11]. Bei höheren w/z -Werten werden höhere Quellmaße bei Zementsteinen erreicht. Im Gefüge der Bindemittelmatrix konnte damit einhergehend eine Erhöhung der mittleren Größe der Portlanditkristalle sowie eine Zunahme der Dicke der sich an der Oberfläche von Zementklinkerkörnern bildenden Schicht aus C-S-H-Phasen beobachtet werden [12].

Für zementgebundene Baustoffe des Spezialtiefbaus liegen im Zuge der Herstellung bei anstehendem Grundwasser im Baugrund besondere Bedingungen vor. Zum einen erfolgt der Kontakt des Baustoffes mit dem Grundwasser unmittelbar bei der Herstellung des geotechnischen Elementes. Zum anderen ist die Umgebungstemperatur im Baugrund in Deutschland im Mittel bei 10 °C [13]. Die niedrige Umgebungstemperatur beeinflusst die Hydratationsgeschwindigkeit, aber auch das Gefüge der zementgebundenen Baustoffe. Es bildet sich ein homogenes und feineres Porengefüge aus als es bei höheren Temperaturen der Fall ist [14; 15]. Dies kann das Quellverhalten in-situ stark beeinflussen.

Untersuchungen von [16] an Portlandzementsteinen zeigen, dass das Quellmaß bei einer 8 °C Lagerung anfänglich geringer ausgeprägt ist als bei einer Vergleichslagerung bei 20 °C. Mit zunehmender Hydratationsdauer gleichen sich die Dehnungen jedoch an und nehmen mit der Zeit kontinuierlich zu.

Das Quellen finden in alle drei Raumrichtungen statt. Im Labor wird üblicherweise aber die lineare Dehnung gemessen. Die Probenabmessungen beeinflussen das Quellverhalten von Zementstein bei Wasserlagerung 24 h nach Herstellung. Je kleiner die Abmessungen der Probekörper ist, umso ausgeprägter ist das Quellverhalten [11].

Dieser Beitrag untersucht den Einfluss der Zementart und der Lagerungstemperatur auf das Quellverhalten von Zementsteinen. Hierzu werden zusätzlich zu Normprismen im Labor verpresste Zementsteine untersucht, um die Filtrationseffekte in nicht-bindigen Böden abzubilden.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Ausgangsstoffe

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Portlandzement CEM I 42,5 R (CEM I) und ein Hochofenzement CEM III/B 42,5 N-LH/SR (CEM III/B) verwendet. Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Zemente ist in Tabelle 1 gegeben. Die Werte wurden mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse mittels Fundamentalparametermethode unter Verwendung des Standards SRM 1881a ermittelt [17]. Die mineralogische Zusammensetzung sowie relevante granulometrische Kennwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die mineralische Zusammensetzung des Portlandzementes wurde mittels *Bogue*-Berechnung [18] ermittelt. Der Gehalt an Hüttensand wurde den Herstellerangaben entnommen. Unter Annahme eines vergleichbaren Klinkers im Hochofenzement wurde mit einem Klinkeranteil von 30,8 % die mineralogische Zusammensetzung

des CEM III/B angepasst ermittelt. Die granulometrischen Kenndaten wurden aus der Partikelgrößenverteilung mittels RRSB-Verteilungsfunktion nach DIN 66145:1976-04 [19] ermittelt.

Tabelle 1 Chemische Zusammensetzung der untersuchten Zemente

	CEM I	CEM III/B
<i>CaO</i>	63,68	46,68
<i>SiO₂</i>	19,78	29,11
<i>Al₂O₃</i>	5,68	10,03
<i>Fe₂O₃</i>	2,52	1,07
<i>MgO</i>	1,74	6,02
<i>SO₃</i>	3,02	3,63
<i>K₂O</i>	0,80	0,62
<i>Na₂O</i>	0,26	0,25
<i>TiO₂</i>	0,27	0,75
<i>Cr₂O₃</i>	0,04	0,03
<i>Mn₂O₃</i>	0,05	0,30
<i>ZnO</i>	0,05	0,01
Glühverlust (CO₂)	2,10	1,50

Tabelle 2 Mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Zemente in (M.-%) und zugehörige granulometrische Kennwerte

	CEM I	CEM III/B
<i>C₃S</i>	57,16	17,60
<i>C₂S</i>	14,21	4,38
<i>C₃A</i>	10,88	3,35
<i>C₄AF</i>	7,61	2,34
Hüttensand	-	69,2
Lageparameter x^* (µm)	18,17	12,69
Steigungsmaß n	1,06	1,17
d_{50} (µm)	12,98	9,30

2.2 Herstellung und Lagerung der Probekörper

Für die Festigkeitsuntersuchungen und Dehnungsmessungen wurden Normprismen in Anlehnung an DIN EN 196-1:2016-11 [20] hergestellt. Die Wasserzementwerte der Normprismen wurden zu 0,3 und 0,5 festgelegt. Je nach vorgesehener Lagerungstemperatur wurden die Prismenformen im Feuchtschrank bei 20 °C bzw. in einem Kühlschrank bei 10 °C gelagert. Nach dem Ausschalen wurden die Proben gekennzeichnet und im Wasserbad bei entsprechend festgelegten Temperaturen gelagert.

Die Proben für die Thermogravimetrie- und Porositätsuntersuchungen wurden zum einen verpresst hergestellt, um die Einflüsse der Filtration aufgrund der Herstellweise im Baugrund abzubilden. Zum anderen wurden Normprismen mit einem w/z-Wert von 0,5 hergestellt. Für die Herstellung der verpressten Zementsteine wurden Zementsuspensionen mit einem w/z-Wert von 0,5 in einer Filterpresse nach DIN 4127:2014-02 [21] für 120 s mit 3 bar verpresst. Als Schalungselement diente ein in den Stahlzylinder der Filterpresse eingestelltes PVC-U-Rohr mit einem Innendurchmesser von 67,8 mm. Die Innenflächen des Schalungsrohres wurden mit einem Trockenschmiermittel auf PTFE-Basis besprüht, um Reibungsverluste auf ein Minimum zu begrenzen und den Probekörper besser ausbauen zu können. Es wurde ein qualitatives Filterpapier aus Cellulose (Dicke 0,17 mm, Durchmesser 90 mm, Flächengewicht 85 g/m², Rückhaltevermögen 2–4 µm) verwendet. Um Beschädigungen infolge des aufgetragenen Druckluftstrahls zu vermeiden, wurde vor Beginn des Verpressvorgangs über den Stahlzylinder und die darin eingebaute Zementsuspension Klarsichtfolie zweilagig aufgebracht, welche durch Gummiband fixiert wurde. Über die Menge der eingefüllten Zementsuspension und den initialen w/z-Wert lässt sich anhand der ausgepressten Anmachwassermenge ein w/z_{verpresst}-Wert berechnen. Die w/z_{verpresst} der für diesen Beitrag hergestellten Proben sind in Tabelle 3 dargestellt. Die höhere Feinheit des Hochofenzementes und das damit verbundene höhere Wasserrückhaltevermögen führt beim Verpressen zu im Vergleich zum untersuchten Portlandzement höheren w/z_{verpresst}-Werten. Für die Untersuchungen wurden die verpressten Zementsteinzylinder 7 Tage nach Herstellung in 15 mm dicke Scheiben gesägt und jene Scheiben aus dem filternahen Bereich verwendet. Beim Verpressen von Zementsuspensionen ist mit zunehmendem Abstand vom Filtermedium eine Zunahme der Porosität zu beobachten [22]. Dieser Gradient ist für die hier verwendeten Zementsuspensionen jedoch gering. Dennoch ist nahe des Filtermediums eine geringere Porosität als der w/z_{verpresst} der Gesamtprobe indiziert, zu erwarten. Daher werden die Ergebnisse der verpressten Zementsteine und der Normprismen, welche für die Dehnungsmessungen mit einem w/z von 0,3 hergestellt wurden, als vergleichbar angesehen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Prüfserien und die Herstellweise für die jeweiligen Untersuchungsmethoden. Die verpressten Zementsteine werden im Beitrag durch ein vorangestelltes „V“ gekennzeichnet bzw. äquivalent mit w/z 0,3 bezeichnet.

Tabelle 3 w/z_{verpresst} für untersuchte Zementsteine mit initialem w/z-Wert von 0,5 bei einem Verpressdruck von 3 bar (n = 4)

	w/z _{verpresst}	σ
CEM I 42,5 R	0,33	0,01
CEM III/B 42,5 N-LH/SR	0,35	0,01

Tabelle 4 Übersicht über Prüfserien und Probenherstellung für die jeweiligen Untersuchungsmethoden

	w/z	
	0,3	0,5
Festigkeitsuntersuchungen	Normprisma	Normprisma
Dehnungsmessungen	Normprisma	Normprisma
Thermogravimetrie	Verpressprobe	Normprisma
Quecksilberdruckporosimetrie	Verpressprobe	Normprisma

3 Untersuchungsmethoden

3.1 Festigkeitsuntersuchungen

Die Biegezug- und Druckfestigkeit wurde nach DIN EN 196-1:2016-11 [20] im Alter von 28 d und 56 d geprüft. Die verwendete Prüfmaschine war eine Toni Comp III der Firma Toni Technik. Die Temperatur der Lagerungsbäder für die Dehnungsmessungen lag im Untersuchungszeitraum bei 9,6 ± 0,4 °C bzw. bei 20 ± 1,0 °C.

3.2 Hydratationsgrad und Calciumhydroxidgehalt

Mit Hilfe der thermogravimetrischen Analyse (TGA) mit gekoppelter Differentialthermoanalyse (DTA) können temperaturabhängige Masseänderungen von Proben quantitativ erfasst werden. Die Messungen wurden mit dem Gerät STA 449 C mit Kontrolleinheit TASC 414/3 A durchgeführt. Die lineare Erhöhung der Temperatur erfolgte mit einer Heizrate von 10 K/min in einer Schutzatmosphäre unter Argon. Die Proben für die Messung wurden am Prüftermin herausgebrochen und im Achatmörser rückstandslos < 90 µm aufgemahlen. Die Hydratation wurde durch Trocknung bis zur Gewichtskonstanz (erreicht nach 2 h) bei 105 °C gestoppt. Bis zur Messung wurden die aufgemahlenen Zementsteinpulver luftdicht in Schnappdeckelgläsern in einem Exsikkator über Kieselgel und Natriumhydroxid auf Träger gelagert, um eine Wasseraufnahme und Carbonatisierung zu unterbinden. Der untersuchte Temperaturbereich ging bei den Prüfserien für Portlandzement bis 1100 °C und für die Prüfserien aus Hochofenzement bis 850 °C.

Die maximale Menge an chemisch gebundenem Wasser kann über die Klinkerphasenzusammensetzung für Portlandzemente bestimmt werden. Für den untersuchten Portlandzement ergibt sich die maximal gebundene Wassermenge aus den Mengenanteilen x der in Tabelle 2 gegebenen mineralogischen Zusammensetzung nach Gleichung (1) [18] zu 0,30 g je g Zement.

$$w_{chem,max} = 0,276 \cdot x_{C_3S} + 0,209 \cdot x_{C_2S} + 0,370 \cdot x_{C_4AF} + [0,667 \cdot (1,499 \cdot x_{C_3A} - 1,686 \cdot x_{SO_3}) + 1,733 \cdot (1,686 \cdot x_{SO_3} - 0,449 \cdot x_{C_3A})] \quad (1)$$

Der chemisch gebundene Wasseranteil zu einem beliebigen Zeitpunkt t wird mittels des mit TGA ermittelte Masseverlustes bezogen auf das Glühbeständige der Probe

nach Gleichung (2) ermittelt. Um den Glühverlust des Zementsteins exakt zu ermitteln, wurde der Glühverlust der einzelnen Zemente GV_{Zement} berücksichtigt [23]. In der Gleichung entspricht $\Delta m_{\text{total}} = \Delta m_{\text{CEM I bzw. CEM III}} - m_{105^\circ\text{C}} - m_{\text{Raumtemperatur}}$ dem relevanten Masseverlust für die festgelegten Temperaturbereiche der jeweiligen Zemente.

$$w_{\text{chem},t} = \frac{\Delta m_{\text{total}} - \frac{GV_{\text{Zement}}}{100} \cdot (1 - \Delta m_{\text{total}})}{1 - \Delta m_{\text{total}}} \quad (2)$$

Der Hydratationsgrad α ergibt sich für den untersuchten Zeitpunkt t aus dem Quotienten zwischen chemisch gebundener Wassermenge und maximaler Wasserbindekazität gemäß Gleichung (3). Die Berechnung der Hydratationsgrade der Prüfserien mit Hochofenzement erfolgte unter der Annahme, dass das Anmachwasser vollständig für die Hydratation des Zementklinkers zur Verfügung steht [23].

$$\alpha = \frac{w_{\text{chem},t}}{w_{\text{chem},\text{max}}} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

Die verschiedenen Phasen im erhärteten Zementstein geben das chemisch gebundene Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen ab [24]. Die Entwässerung der C-S-H-Phasen und des Calciumhydroxids überlagern sich im Temperaturbereich zwischen 400 - 550 °C [25]. Die Entwässerung des Calciumhydroxids wurde daher nach der Methode von Marsh ermittelt [26]. Aus stöchiometrischen Berechnungen nach Gleichung (4) lässt sich der Gehalt an Calciumhydroxid in der untersuchten Probe ermitteln [26].

$$Ca(OH)_2 = \frac{4,113 \cdot \Delta m_{Ca(OH)_2}}{1 - \Delta m_{\text{total}}} \cdot 100 (\%) \quad (4)$$

3.3 Dehnungsmessungen

Das Quellen wurde nach DIN EN 12617-4:2002-08 [27] bestimmt. Zur Messung der Dehnung wurden Messzapfen des Typs 2 verwendet und in der Prismenform so eingebaut, dass für alle Proben ein Überstand der Messzapfen von 7 mm sichergestellt wurde. Je Prüfserie (Zementart und w/z-Wert) wurden 3 Prüfkörper hergestellt. Nach Herstellung der Prismen wurden diese für 24 h im Klimaschrank bzw. im Kühlschrank bei 20 bzw. 10 °C gelagert. Für die Messungen der Längenänderung wurde eine Messuhr der Firma Käfer mit einer Genauigkeit von 0,001 mm verwendet. Die Referenzmessung R_0 wurde an einem Kalibrierstab aus Holz durchgeführt. Die Prüfkörper wurden gekennzeichnet, um eine identische Lage bei jeder weiteren Messung sicherzustellen. Nach dem Ausschalen wurde eine Anfangsablesung L_0 durchgeführt und die Proben im Anschluss im Wasserbad gelagert. Für die Folgeablesungen wurde die Probekörper zum Prüfzeitpunkt aus dem Wasserbad entnommen und von anhaftendem Wasser durch Abtupfen befreit. Nach Reinigung der Messzapfen erfolgte die Ablesung der Messlänge L_t nach 25 s. Im Anschluss wurden die Proben wieder im Wasserbad platziert, sodass die Exposition an Luft je Prüfkörper < 60 s war. Vor den Messungen einer Prüfserie wurde eine Referenzmessung R_t mit dem Kalibrierstab erfasst, um Einflüsse der Umgebungsbedingungen mit aufzunehmen. Die Dehnungen wurden nach Gleichung (5) mit $\Delta L = L_t - L_0 - (R_t - R_0)$ und $L_g = L_t - (R_t - R_0)$ berechnet.

$$\text{Dehnung} = \frac{\Delta L \cdot 1000}{L_g} \text{ in mm/m} \quad (5)$$

Die Temperatur der Lagerungsbäder für die Dehnungsmessungen lag im Untersuchungszeitraum bei $9,3 \pm 0,4^\circ\text{C}$ bzw. bei $20 \pm 1,0^\circ\text{C}$.

3.4 Porosität

Die Porosität von porösen Materialien kann mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie (*mercury intrusion porosimetry* - MIP) bestimmt werden. Durch die nichtbenetzende Eigenschaft des Quecksilbers dringt dieses nur unter Druck in den Porenraum ein. Mit Hilfe der Washburn-Gleichung kann unter Annahme zylindrischer Porensysteme aufgrund der Proportionalität von Porenradius und aufgebrachtem Druck eine Porenradienverteilung des untersuchten Materials erstellt werden. Die Ergebnisse der MIP-Porosimetrie sind unter Berücksichtigung der spezifischen Grenzen des Verfahrens zu bewerten. So beeinflussen beispielsweise die Trocknungsart oder die gewählten Randbedingungen der Washburn-Gleichung die Ergebnisse [28]. Zudem misst das Prüfverfahren die kleinste Öffnungsweite des Porensystems. Dadurch können Flaschenhalsporen zu falschen Annahmen hinsichtlich der Porositätsverteilung führen [29]. Entsprechend ist die mittels MIP erfasste Porosität geringer als die tatsächliche im Material vorhandene.

Die MIP-Messungen wurden mit einem Pore Sizer 9420 Porosimeter der Firma Micromeritics mit zugehöriger Software Auto Pore IV 9500 durchgeführt. Der gemessene Druckbereich lag zwischen Δp 0,005 bis 400 MPa, womit ein zugehöriger Porenradienbereich von 151,4 µm bis 1,9 nm erschlossen werden konnte. Die Oberflächenspannung des Quecksilbers σ_{HG} wurde mit 0,485 N/m angenommen und ein Kontaktwinkel θ von $141,3^\circ$ festgelegt [30]. Die Proben wurden zum Prüfzeitpunkt aus dem Wasserbad entnommen und in ca. 2 cm³ große Teilstücke gebrochen. Die Trocknung erfolgte bei $70 \pm 5^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz.

Für die Auswertung der MIP-Messungen wurden das maximale Intrusionsvolumen, der Median- sowie der Grenz-porenradius herangezogen. Der Medianporenradius entspricht dem Porenradius bei dem 50 % des maximalen Intrusionsvolumens in der untersuchten Probe eingepresst wurde. Mit dichtem Porengefüge zementgebundener Baustoffe nehmen die Medianporenradien ab. Der Grenz-porenradius definiert den kleinsten Porenradius, der im Porensystem der Zementsteinmatrix durchgängig ist und wurde mittels der Tangentenmethode an der kumulativen Porenradienverteilung bestimmt [31]. Die Dauerhaftigkeitseigenschaften zementgebundener Baustoffe kann anhand des Grenz-porenradius und seiner Korrelation mit der Durchlässigkeit bewertet werden [32].

4 Ergebnisse

4.1 Festigkeitsuntersuchungen

In Abbildung 1 und Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Prüfalter dargestellt. Die Biegezugfestigkeiten der Zementsteine mit einem w/z-Wert von 0,3 sind grundsätzlich höher als die der Zementsteine mit einem w/z-Wert von 0,5. Die Versuchsreihe „CEM I 20 °C 56 d“ fällt mit ihren Werten leider deutlich aus der Reihe. Die Was-

serlagerung bei 10 °C führt zu niedrigeren Biegezugfestigkeiten. Die Differenz zwischen 28 und 56 Tagen ist bei den CEM III/B Zementsteinen für die niedrigen Temperaturen deutlich ausgeprägt. Die Druckfestigkeiten nehmen mit zunehmendem Prüfalter zu. Niedrige w/z-Werte führen zu höheren Druckfestigkeiten. Der Einfluss der Temperatur auf die Druckfestigkeiten ist für die CEM I-Prüfserie nach 56 Tagen deutlich geringer als bei der CEM III/B-Prüfserie. Die Verlangsamung der Hydratationsreaktion der Hochofenzemente zeigt sich in der im Vergleich zu den Portlandzementen größeren Differenz zwischen den untersuchten Lagerungstemperaturen.

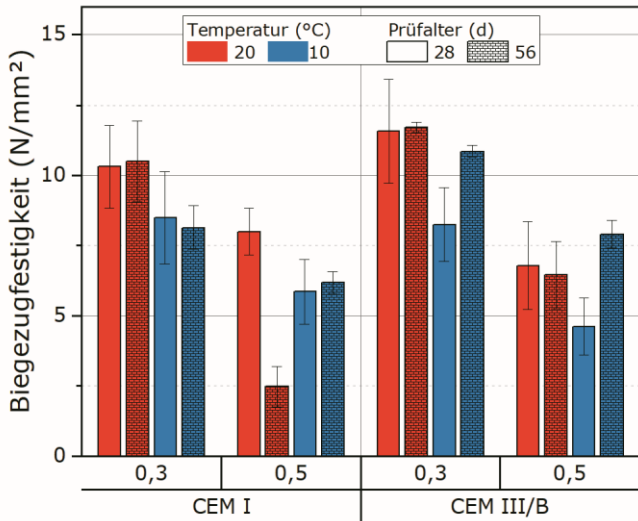


Abbildung 1 Biegezugfestigkeit nach DIN EN 196-1:2016-11 für Zementsteinprismen nach 28 und 56 Tagen bei einer Wasserlagerung von 10 und 20 °C

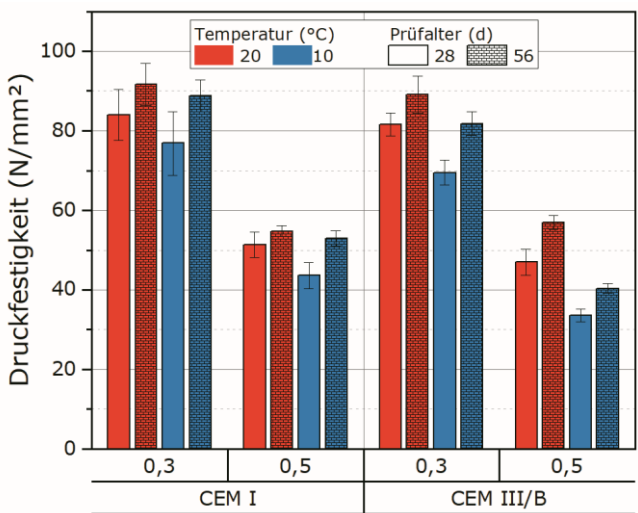


Abbildung 2 Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1:2016-11 für Zementsteinprismen nach 28 und 56 Tagen bei einer Wasserlagerung von 10 und 20 °C

4.2 Hydratationsgrad und Calciumhydroxidgehalt

Der Verlauf des Hydratationsgrades für die untersuchten Portland- und Hochofenzementsteine ist in Abbildung 3 und Abbildung 4 in den Teilbildern a gegeben. Für beide Zementarten führt die Wasserlagerung bei 10 °C zu niedrigeren Hydratationsgraden. Die Hydratationsgrade des

Hochofenzements sind bei gleicher Hydrationsdauer erwartungsgemäß geringer als die der Portlandzement-Prüfserie. Mit zunehmendem Alter der Proben gleichen sich die Hydratationsgrade der CEM I-Proben an. Diese Tendenz ist auch für die Prüfserie CEM III/B festzuhalten.

Die Entwicklung des Calciumhydroxidgehaltes ist für beide Prüfserien in Abbildung 3 und Abbildung 4 in den Teilbildern b dargestellt. Aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung der Zemente weisen die CEM I-Zementsteine höhere Calciumhydroxidgehalte auf, als die Hochofenzemente. Zudem gleichen sich die Verläufe des Calciumhydroxid-Gehaltes und des Hydratationsgrades für die CEM I Proben. Bei höheren w/z-Werten wird mehr Calciumhydroxid gebildet als bei niedrigen w/z-Werten. Der Gehalt an Ca(OH)_2 bei den untersuchten Hochofenzementen ist deutlich geringer als bei den Portlandzementen. Zudem ist die Menge an gebildetem Portlandit über die untersuchten Hydrationsdauern konstant. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass der auf den Zementklinkeranteil bezogene w/z-Wert deutlich erhöht ist und somit die verschiedenen Klinkerminerale schneller hydratisieren [33]. Auffällig ist, dass bei niedrigeren Temperaturen bei gleichem w/z-Wert der CEM III/B-Probe mehr Calciumhydroxid gebildet wurde. Die Wiederholpräzision der dargestellten Ergebnisse ist an einzelnen Proben jeder Prüfserie durch Doppelbestimmung überprüft worden und kann als sehr gut bewertet werden.

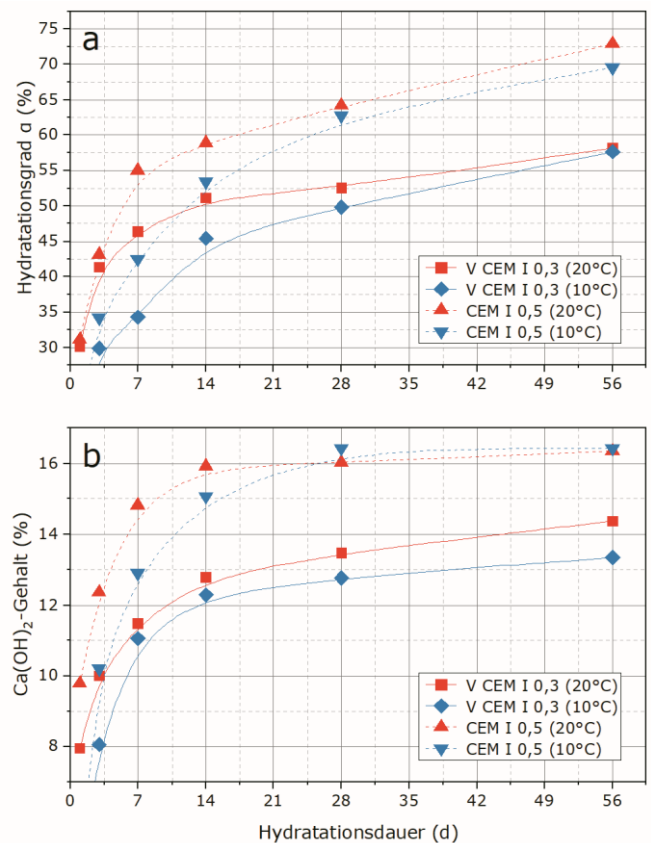


Abbildung 3 Verlauf des Hydratationsgrades (a) und des Gehalts an Calciumhydroxid (b) für CEM I-Zementsteine bei einer Wasserlagerung von 10 bzw. 20 °C

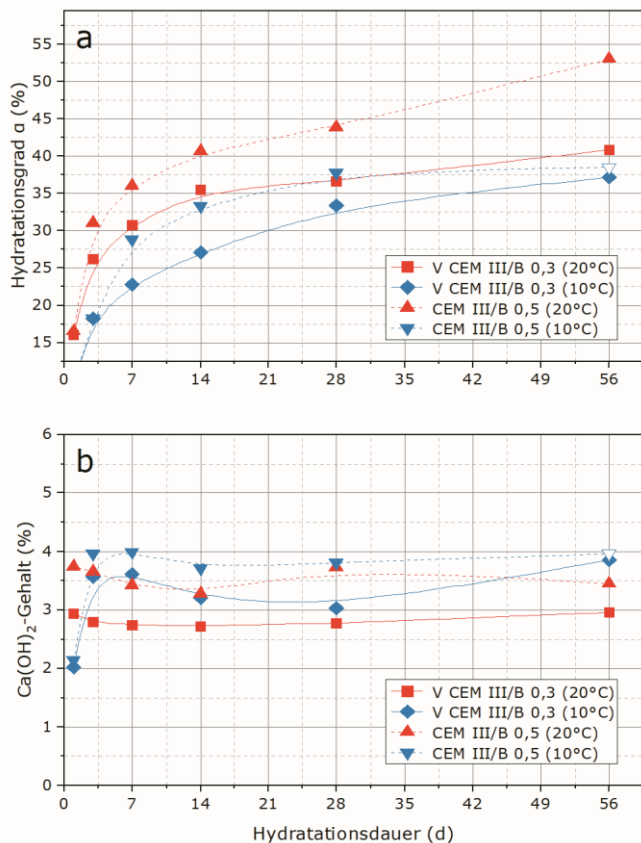


Abbildung 4 Verlauf des Hydratationsgrades (a) und des Gehalts an Calciumhydroxid (b) für CEM III/B-Zementsteine bei einer Wasserlagerung von 10 bzw. 20 °C. Der Wert CEM III/B 0,5 (10 °C) konnte aufgrund eines Gerätedefektes nicht gemessen werden und wurde rechnerisch prognostiziert.

4.3 Dehnungsmessungen

Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen sind in Abbildung 5 dargestellt. Für beide Prüfserien (a: CEM I, b: CEM III/B) ist das Quellmaß bei niedriger Temperatur deutlich erhöht. Insgesamt zeigen die Hochofenzementsteine im untersuchten Prüfzeitraum eine höhere Dehnung als die Portlandzementsteine. Der Einfluss des w/z-Wertes von 0,5 (Dreiecksymbole bzw. gestrichelte Linie) zeigt bei der CEM III/B-Prüfserie durchweg ein höheres Quellmaß. Bei der CEM I-Prüfserie ist der Einfluss des höheren w/z-Wertes stärker temperaturabhängig. Innerhalb der ersten 28 bzw. 10 Tage führt der höhere w/z-Wert für die 20 °C und die 10 °C Lagerung zu höheren Quellmaßen. Auffällig ist zudem, dass ein niedriger w/z-Wert von 0,3 bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C bis zu einem Prüfalter von 7 Tagen zu Schwinden führt. Bei niedrigen Temperaturen findet kein Schwinden statt. Die Streuung der Messungen ist für alle Prüfzeitpunkte gering.

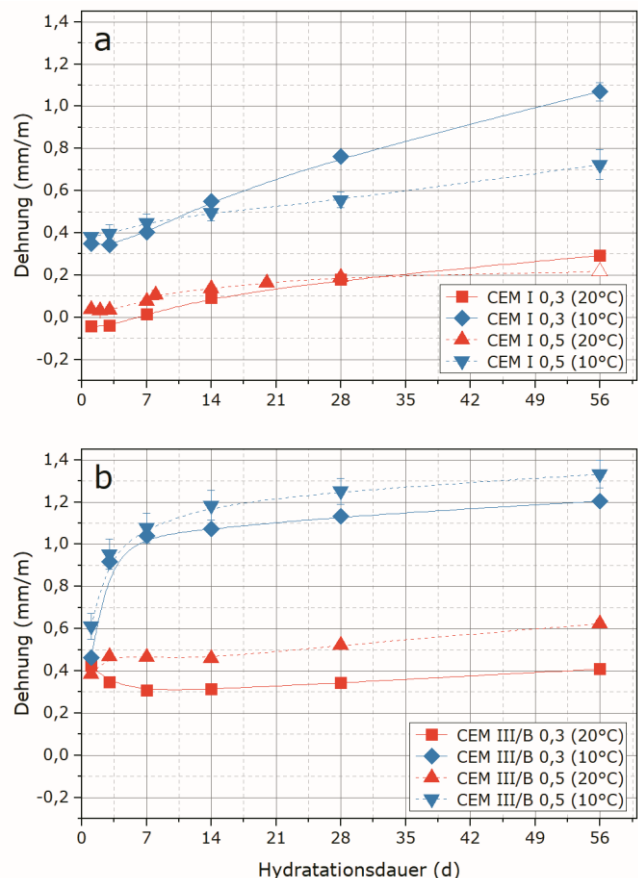


Abbildung 5 Dehnungsmessungen nach DIN EN 12617-4:2002-08 für Zementsteine bei einer Wasserlagerung von 10 bzw. 20 °C; a: CEM I, b: CEM III/B. Der Wert CEM I 0,5 (20 °C) wurde rechnerisch prognostiziert.

4.4 Porosität

Mit zunehmendem Hydratationsgrad wird der Porenraum zementärer Systeme durch sich bildende Hydratationsprodukte verkleinert. In Tabelle 5 sind die anhand der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten Median- und Grenzporeradien sowie das maximale Intrusionsvolumen aufgelistet. Die untersuchten Proben zeigten für die Prüfzeitpunkte von 7, 14 und 28 d überwiegend abnehmende Porositätskennwerte. Das Verpressen der Zementsuspension wirkt sich bei der CEM I-Prüfserie durch eine starke Reduktion des maximalen Intrusionsvolumens aus. Zudem sind der Median- und Grenzporeradius bereits nach 7 Tagen in einem Bereich, der mit zunehmender Hydratationsdauer nur noch marginal verringert wird. Die unterschiedlichen Lagerungstemperaturen haben einen geringen Einfluss auf den Median- und Grenzporeradius der verpressten CEM I-Prüfserie. Allerdings deutet das maximale Intrusionsvolumen die Ausbildung eines dichteren Gefüges nach 28 Tagen an. Die unverpressten CEM I Proben zeigen vergleichbare Medianporeradien wie die verpressten Proben. Allerdings sind das maximale Intrusionsvolumen und der Grenzporeradius deutlich größer und im Verlauf ihre Abnahme auch ausgeprägter. Auch bei den Normprismen bewirkt eine niedrigere Lagerungstemperatur ein geringeres maximales Intrusionsvolumen nach 28 Tagen.

Vergleicht man die Porositätskennwerte der CEM I- und CEM III/B-Prüfserien, so wird der Einfluss der Zementart insbesondere beim Medianporeradius sehr deutlich. Hier

weisen die Hochofenzemente durch ihre ausgeprägte Gelporosität deutlich geringere Werte auf. Dies ist insbesondere im Kontext erhöhter maximaler Intrusionsvolumen zu beachten. Das Verpressen der CEM III/B-Suspensionen bewirkt eine starke Verringerung des maximalen Intrusionsvolumens während die Median- und Grenzporeradien kaum reduziert werden. Anhand der Porositätskennwerte wird insbesondere der Einfluss einer niedrigen Umgebungstemperatur deutlich, da die Gradienten zwischen 7 und 28 Tagen insbesondere beim Grenzporeradius sehr groß sind.

Die ausgefilterten Hochofenzementsteine zeigen bei niedrigen Lagerungstemperaturen jedoch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit gegenüber den verpressten Portlandzementsteinen verbesserte Eigenschaften. Trotz der langsameren Hydratationsgeschwindigkeit von hüttensandhaltigen Zementen ist der Grenzporeradius bereits nach 7 Tagen geringer als bei der CEM I-Prüfserie.

Der Gelporenbereich zementgebundener Baustoffe wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Grundsätzlich wird zwischen Kapillar- und Gelporen unterschieden, welche sich im Übergangsbereich überschneiden. Für Gelporen werden Radien von < 50 nm und für Kapillarporen Radienbereiche zwischen 30 nm und 50 µm vorgeschlagen [30]. Nach [7] ist aber der Porenradienbereich < 25 nm für Schwind- und Quellvorgänge in zementgebundenen Baustoffen maßgebend. In Abbildung 6 ist die Entwicklung des Gelporenbereichs mit Porenradien < 25 nm für die Untersuchungszeiträume 7, 14 und 28 Tage dargestellt. Die gemessenen Werte wurden der kumulativen Porenradienverteilung entnommen.

Deutlich zu erkennen ist die höhere Gelporosität in den Hochofenzementstein-Proben. Für die CEM I-Prüfserie ist kein signifikanter Einfluss der Lagerungstemperatur auf die Gelporosität zu erkennen. Bei beiden Prüfserien führen höhere w/z-Werte zu höheren Gelporositäten. Die Hydrationsdauer hat nur bei den CEM III/B-Proben und einer Lagerung von 10 °C einen Einfluss, welcher bei einem w/z-Wert von 0,5 sehr ausgeprägt ist.

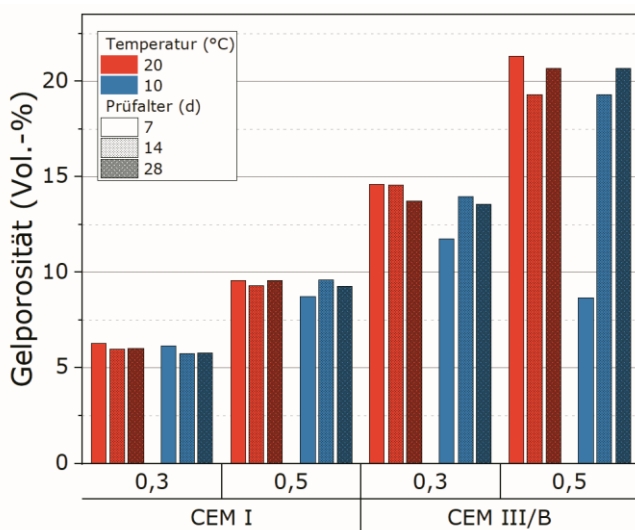


Abbildung 6 Gelporosität mit Porenradien < 25 nm von Zementstein mit w/z Werten 0,3 (verpresste Proben) und 0,5 nach 7, 14 und 28 Tagen bei einer Wasserlagerung von 10 °C und 20 °C.

Tabelle 5 Entwicklung der mittel MIP ermittelten Median- und Grenzporeradien sowie des maximalen Intrusionsvolumens nach 7, 14 und 28 Tagen

Prüfserie	7 d	14 d	28 d
Medianporeradius (nm)			
Grenzporeradius (nm)			
Maximales Intrusionsvolumen (Vol.-%)			
V CEM I 0,5	55,27	59,70	59,42
20 °C	91,33	94,14	92,72
	22,57	21,70	21,04
V CEM I 0,5	58,97	62,73	53,48
10 °C	96,49	96,67	95,76
	24,37	22,50	20,05
CEM I 0,5	65,01	59,28	53,80
20 °C	126,35	119,52	112,31
	34,41	32,12	30,98
CEM I 0,5	75,92	63,55	57,04
10 °C	138,19	119,69	110,86
	36,67	32,56	29,50
V CEM III/B 0,5	21,46	17,38	15,84
20 °C	72,43	72,21	68,55
	27,29	24,99	23,41
V CEM III/B 0,5	33,40	21,07	18,67
10 °C	82,39	74,00	65,66
	27,42	25,83	24,28
CEM III/B 0,5	22,62	15,95	15,44
20 °C	88,60	73,72	69,28
	36,83	36,19	33,04
CEM III/B 0,5	62,46	22,17	15,22
10 °C	177,12	85,87	68,55
	36,91	36,19	33,04

5 Diskussion

Um Einflussgrößen aus der Porosität und dem Hydrationsfortschritt zu identifizieren werden nachfolgend einige Teilaspekte der Untersuchungen diskutiert. In Abbildung 7 ist das gemessene Quellmaß ins Verhältnis zum Anteil der Gelporen am Gesamtvolumen des Porenraumes gesetzt.

Die Proben der CEM III/B-Prüfserie (kreisförmiges Symbol) haben im Vergleich zu den CEM I-Proben einen deutlich höheren Gelporenanteil. Dennoch sind die Quellmaße weniger stark vom Anteil der Gelporen beeinflusst als durch die Lagerungstemperatur.

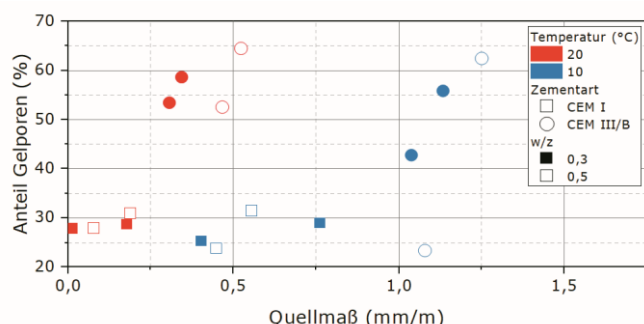


Abbildung 7 Anteil der Gelporen ($r < 25$ nm) am maximalen Intrusionsvolumen im Verhältnis zum Quellmaß von Zementstein mit w/z Werten 0,3 (verpresste Proben) und 0,5 nach 7 und 28 Tagen bei einer Wasserlagerung von 10 °C und 20 °C.

In Abbildung 8 sind die Medianporenradien im Verhältnis zum Quellmaß dargestellt. Die Medianporenradius, der als Indikator für die Gefügedichtigkeit zementärer Systeme dient, spiegelt den Einfluss der Lagerungstemperatur, aber auch der Zementart sehr deutlich wider. Aus geringen Medianporenradien, wie Sie bei den Hochofenzementsteinen (kreisförmige Symbole) ermittelt wurden, gehen nicht zwingend hohe Quellmaße hervor.

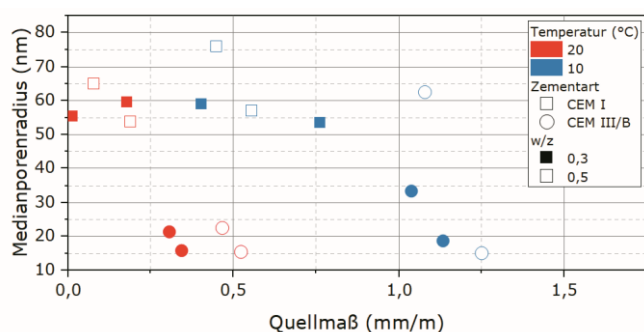


Abbildung 8 Medianporenradien im Verhältnis zum Quellmaß von Zementstein mit w/z Werten 0,3 (verpresste Proben) und 0,5 nach 7 und 28 Tagen bei einer Wasserlagerung von 10 °C und 20 °C.

Das Verhältnis aus gebildetem Calciumhydroxid zum Gesamthydratationsgrad α ist in Abbildung 9 über die gemessenen Quellmaße aufgetragen. Der Quotient $\text{Ca(OH)}_2\text{-Gehalt}/\alpha$ ist für die Portlandzementsteine höher als für die Hochofenzementsteine. Die Lagerung bei niedriger Temperatur führt für die CEM III/B-Proben zu einer leichten Erhöhung der Quotienten und ist mit einer starken Zunahme des Quellmaßes verbunden. Bei den CEM I-Proben sind die Quotienten bei unterschiedlicher Lagerungstemperatur auf vergleichbarem Niveau.

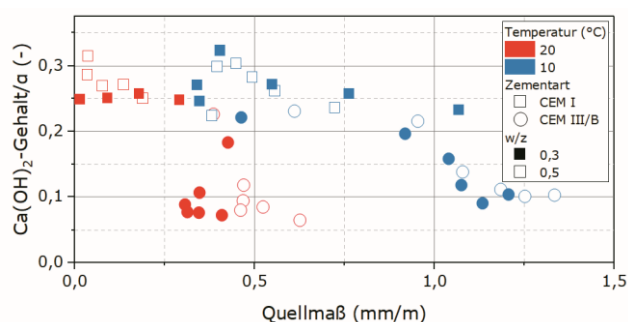


Abbildung 9 Quotient aus Calciumhydroxidgehalt und Hydratationsgrad α im Verhältnis zum Quellmaß von Zementstein mit w/z Werten 0,3 (verpresste Proben) und 0,5 bei einer Wasserlagerung von 10 °C und 20 °C.

Aus den zusammengeführten Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass der Anteil der Gelporen am Gesamtporenvolumen einen geringen Einfluss auf das Quellen der untersuchten Zementsteine hat. Für die CEM III/B-Prüfserie kann die deutliche Erhöhung des Quellmaßes bei niedrigen Temperaturen mit einer Erhöhung des Phasenanteils an Calciumhydroxid an den Hydratationsprodukten in Verbindung gebracht werden. Die höheren Quellmaße bei niedrigen Lagerungstemperaturen gehen einher mit einer langsameren Hydratationsgeschwindigkeit. Das Wasser aus der Umgebung kann den sich in der Folge nur langsam verringernden Porenraum erschließen. Durch das Platz- und Wasserangebot können sich große Calciumhydroxidkristalle ausbilden [12]. Durch die Bildung von Hydratationsprodukten mit zunehmendem Probenalter bauen sich durch die gebildeten Calciumhydroxidphasen und das eingedrungene Wasser höhere Quelldrücke auf als bei einer höheren Lagerungstemperatur.

6 Zusammenfassung

Zementgebundene Baustoffe, welche zur Errichtung von Gründungselementen eingesetzt werden, können aufgrund des Wasserangebots im Baugrund eine Volumenzunahme erfahren. Die Untersuchungen an verpressten und unverpressten Zementsteinen zeigen, dass insbesondere bei den zu erwartenden niedrigen Baugrundtemperaturen von 10 °C höhere Quellmaße erreicht werden als bei einer Wasserlagerung von 20 °C. Der Einfluss des w/z-Wertes hängt stark von den Umgebungstemperaturen und der Zementart ab. Für Portlandzementsteine sind niedrige w/z-Werte mit einem höheren Quellmaß verbunden, welches bei niedrigeren Temperaturen ausgeprägter ist. Für Hochofenzementsteine führt ein w/z-Wert von 0,5 zu höheren Quellmaßen, wobei die Zunahme bei niedrigen Temperaturen weniger stark ausgebildet ist. Eine klare Einflussgröße für das Quellen der untersuchten Zementsteine konnte nicht festgestellt werden. Für Hochofenzemente werden die höheren Dehnungen bei niedrigen Temperaturen von einer Zunahme des Calciumhydroxidanteils der gebildeten Hydratationsprodukte begleitet.

Durch das Ausfiltern der Zementsuspension infolge des Verpressvorgangs entsteht ein Zementstein mit geringer Porosität und kleinem Grenzporenradius, der bereits nach 7 Tagen auch bei geringen Umgebungstemperaturen im Vergleich zu Zementsteinen mit höherem w/z-Wert hinsichtlich der Dauerhaftigkeit günstige Porositätskennwerte aufweist. Die niedrige Umgebungstemperatur bewirkt bei

Portlandzementsteinen die Ausbildung eines feineren und dichten Gefüges mit zunehmendem Probenalter. Dies zeigt sich anhand geringerer maximalen Intrusionsvolumina und abnehmender Medianporenradien. Für Hochofenzemente sind ähnliche Entwicklungen mit zunehmender Hydratationsdauer (> 28 Tage) zu erwarten.

Die Festigkeitsuntersuchungen zeigten für die Untersuchungszeitpunkte nach 28 und 56 Tagen eine Reduktion der Druckfestigkeit infolge der niedrigen Umgebungstemperatur. Die Reduktion war bei den CEM I-Proben weniger stark ausgeprägt als bei den CEM III/B-Proben.

Die niedrigen Lagerungstemperaturen reduzieren die Hydratationsgeschwindigkeit der untersuchten Zementsteine. Mit zunehmender Hydratationsdauer nähern sich die Hydratationsgrade in beiden untersuchten Temperaturbereichen an. Für die Hochofenzementsteine konnte ein geringfügig erhöhter Gehalt an Calciumhydroxid bei geringeren Umgebungstemperaturen festgestellt werden.

Überträgt man die Ergebnisse in die Praxis so können sich für geotechnische Elemente mit hohem Zementsteinanteil wie Verpressanker oder Mikropfähle erhöhte Radialspannung infolge der Volumenzunahme des Baustoffes bei vorhandenem Wasserangebot einstellen. Allerdings werden die Dehnungen, welche die Radialspannungen hervorrufen können, stark von der Zementart und vom w/z-Wert beeinflusst. Klinkerreduzierte und langsam erhärtende Zementarten, welche im Spezialtiefbau seltener verwendet werden, können bei niedrigeren Umgebungstemperaturen höhere Dehnungen erfahren als Portlandzemente.

Referenzen

- [1] Mayer, G. (1983) *Untersuchungen zum Tragverhalten von Verpreßankern in Sand* [Dissertation]. Berlin: UB d. TU.
- [2] Jessberger, H. L. (1963) *Theorie und Praxis eines neuzeitlichen Verankerungsverfahrens* in: Die Bautechnik, H. 7, S. 226–232.
- [3] Paproth, E.; Paproth, H. (1966) *Zementstein als Mittel zum Aufbau von Zug- und Druckpfählen sowie von Pfahlwänden* in: Bautechnik 43, H. 11, S. 385–391.
- [4] Wichter, L.; Meiniger, W. (2022) *Verankerungen, Vernagelungen und Mikropfähle in der Geotechnik*. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.
- [5] Domes, X. A. L. (2015) *Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive soils* [Dissertation]. Trondheim: NTNU.
- [6] Locher, F. W. (2000) *Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik.
- [7] Mindess, S.; Young, J. F.; Darwin, D. (2003) *Concrete*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [8] Neville, A. M. (2011) *Properties of concrete*. 5. ed. Harlow: Pearson.
- [9] Brooks, J. J. (2005) *30-year creep and shrinkage of concrete* in: Magazine of Concrete Research 57, H. 9, S. 545–556.
<https://doi.org/10.1680/mac.2005.57.9.545>
- [10] Brooks, J. J. (2015) *Shrinkage of Concrete* in: Brooks, J. J. [Hrsg.] *Concrete and masonry movements*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, pp. 137–185.
- [11] Tazawa, E.; Miyazawa, S. (1997) *Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials* in: Magazine of Concrete Research 49, H. 178, S. 15–22.
<https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.178.15>
- [12] Baroghel-Bouny, V. et al. (2006) *Autogenous deformations of cement pastes: Part II. W/C effects, micro-macro correlations, and threshold values* in: Cement and Concrete Research 36, H. 1, S. 123–136.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.020>
- [13] Hölting, B.; Coldewey, W. G. (2013) *Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 8. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- [14] Escalante-García, J. I.; Sharp, J. H. (1998) *Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: Part I, neat cements* in: Cement and Concrete Research 28, H. 9, S. 1245–1257.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00115-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00115-X)
- [15] Kjellsen, K. O.; Detwiler, R. J.; Gjörv, O. E. (1991) *Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures* in: Cement and Concrete Research 21, H. 1, S. 179–189.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90044-I](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90044-I)
- [16] Hofheinz, C. (2003) *Auswirkungen nachträglich hydratisierender Portlandzement-Partikel in Zementstein und Mörtel bei sehr niedrigen w/z-Werten* [Dissertation]. Universität Siegen.
- [17] National Institute of Standards & Technology (2016) *Certificate of Analysis Standard Reference Material 1881a – Portland Cement (Blended with Slag and Fly Ash)*. Standard Reference Material.
- [18] Stark, J.; Wicht, B. (2000) *Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff*. Basel: Birkhäuser.
- [19] DIN 66145:1976-04 *Darstellung von Korn-(Teilchen)größenverteilungen; RRSB-Netz*. Berlin, Beuth.
- [20] DIN EN 196-1:2016-11 *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2016*. Berlin, Beuth.
- [21] DIN 4127:2014-02 *Erd- und Grundbau – Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangsstoffe*. Berlin: Beuth.
- [22] Wagemann, F.; Wehrmann, L.; Schmidt-Döhl, F. (2021) *Influence of cement grouting on the microstructure of cement paste* in: Júlio, E.; Valença, J.;

- Louro, A. S. [Hrsg.] *Concrete Structure: New Trends for Eco-Efficiency and Performance*. Lisbon, S. 749–758.
- [23] Gätje, B. (2003) *Nachträgliche Ermittlung betontechnologischer Parameter an Zementsteinen, Mörteln und Betonen unbekannter Zusammensetzung* [Dissertation]. Herdecke, Ruhr: GCA-Verlag.
- [24] Maultzsch, M. (1988) *Die thermogravimetrische Analyse (TGA) in der Materialprüfung kunststoffmodifizierter Zementmörtel* in: *Materialprüfung* 30, H. 5, S. 157–161.
- [25] Valenti, G. L.; Cioffi, R. (1985) *Quantitative determination of calcium hydroxide in the presence of calcium silicate hydrates. Comparison between chemical extraction and thermal analysis* in: *Journal of Materials Science Letters* 4, H. 4, S. 475–478.
<https://doi.org/10.1007/BF00719749>
- [26] Marsh, B. K. (1984) *Relationship between engineering properties and microstructural characteristics of hardened cement paste containing pulverized-fuel ash as partial cement replacement* [Dissertation]. Hatfield Polytechnic.
- [27] DIN EN 12617-4:2002-08 *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Teil 4: Bestimmung des Schwindens und Quellens; Deutsche Fassung EN 12617-4:2002*. Berlin, Beuth.
- [28] Rübner, K.; Fritz, T.; Jacobs, F. (2001) *Ringversuch zur Quecksilberporosimetrie an Zementmörtel*. Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft.
- [29] Diamond, S. (2000) *Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials* in: *Cement and Concrete Research* 30, H. 10, S. 1517–1525.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00370-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00370-7)
- [30] Bunke, N. (1991) *Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048*. Berlin, Beuth.
- [31] Liu, Z.; Winslow, D. (1995) *Sub-distributions of pore size: A new approach to correlate pore structure with permeability* in: *Cement and Concrete Research* 25, H. 4, S. 769–778.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00067-M](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00067-M)
- [32] Sakai, Y. (2020) *Relationship between water permeability and pore structure of cementitious materials* in: *Magazine of Concrete Research* 72, H. 23, S. 1235–1242.
<https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00135>
- [33] Escalante-García, J. I.; Sharp, J. H. (1998) *Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: Part II, blended cements* in: *Cement and Concrete Research* 28, H. 9, S. 1259–1274.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00107-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00107-0)