

# Dauerhaftigkeitsaspekte beim Einsatz calcinierter Tone im Beton

Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel\*  
Dr.-Ing. Nancy Beuntner\*\*  
Tina Schmitt, M.Sc.\*\*\*

\* Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Deutschland,  
[christian.thienel@unibw.de](mailto:christian.thienel@unibw.de)

\*\* Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Deutschland,  
[nancy.beuntner@unibw.de](mailto:nancy.beuntner@unibw.de)

\*\*\* Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Deutschland,  
[tinaschmitt@bundeswehr.org](mailto:tinaschmitt@bundeswehr.org)

## Zusammenfassung

Calcierte Tone werden zukünftig eine wichtige Rolle auf dem Weg zur CO<sub>2</sub>-Neutralität der Zement- und Betonindustrie spielen. Bisher wird ihre Leistungsfähigkeit nur indirekt als Zementhauptbestandteil in Portlandkompositzementen erfasst. In diesem Beitrag wird das bisherige Vorgehen zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Beton kurz angesprochen und dann anhand von Versuchsergebnissen das Potenzial calcinierter Tone exemplarisch für einen calcinierten Amaltheen-Ton und ein als industrielles Nebenprodukt anfallendes Metakaolin aufgezeigt. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf das Chlorideindringverhalten und die Carbonatisierung. Durch die calcinierten Tone wird einerseits der Chloridmigrationskoeffizient gegenüber der Referenzmischung deutlich abgesenkt. Andererseits nimmt die Carbonisierungstiefe zwar zu, doch sie bewegt sich in vergleichbarer Größe wie sie für andere Portlandkompositzemente bekannt ist. Diese Eigenschaften könnten bereits heute mit dem Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit berücksichtigt und calcinierte Tone als leistungsfähige Betonzusatzstoffe eingesetzt werden.

## Abstract

In the future, calcined clays will play an important role on the way to CO<sub>2</sub> neutrality in the cement and concrete industry. So far, their performance is only indirectly assessed as a main cement constituent in Portland-composite cements. This paper briefly addresses the existing approach to durability assessment of concrete and then uses experimental results to demonstrate the potential of calcined clays as examples for a calcined Amaltheen clay and a metakaolin produced as an industrial by-product. The investigations focus on chloride penetration behavior and carbonation. On the one hand, the calcined clays significantly lower the chloride migration coefficient compared to the reference mixture. On the other hand, although the carbonation depth increases, it is in the range comparable to that known for other Portland composite cements. These properties could already be taken into account with concept of equivalent concrete performance and calcined clays could be used as high performance concrete admixtures.

**Keywords: calcinierter Ton; Dauerhaftigkeit; Beton; Betonzusatzstoff; Zementersatzstoff**

## 1 Einleitung

Die Bau- und insbesondere die Baustoffindustrie muss sich in den nächsten Jahren auf massive Veränderungen einstellen, um auf die Herausforderungen durch den Klimawandel zu reagieren. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit der Baustoffproduktion verbunden sind. Als größter Emittent gilt derzeit die Herstellung von Zement, die als drittgrößter industrieller Energieverbraucher ca. 7 % der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht [1]. Vor diesem Hintergrund hat die Zementindustrie Szenarien zur Dekarbonisierung entwickelt [2]. Zu den ersten Schritten auf dem Weg zum "Net-Zero"-Ziel [3] zählt der teilweise Ersatz von Klinker durch calcinierte Tone. Dieser Schritt soll zusammen mit dem Einsatz neuer Bindemittel etwa 19 % der Einsparungen erreichen [2].

Mit calcinierten Tönen kommt ein puzzolanes Material als Zementhauptbestandteil oder Betonzusatzstoff zum Einsatz, das aus unterschiedlichen Phyllosilikaten bestehen kann und das sich in seinen Eigenschaften und Wirkungsmechanismen zum Teil signifikant von den bisher üblichen Stoffen wie Hüttsand, Steinkohlenflugasche und Silicastaub unterscheidet [4]. Diese Unterschiede müssen differenziert betrachtet werden. Hinzu kommen neue Portlandkomposit- bzw. Kompositzemente wie CEM II/C-M und CEM VI [5], durch die der durchschnittliche Klinkergehalt der Zemente weiter bis auf 35 % abgesenkt wird. Dieser Beitrag befasst sich exemplarisch mit der Wirkung calcinierter Tone auf ausgewählte Dauerhaftigkeitsaspekte.

## 2 Konzepte zur Dauerhaftigkeitsbemessung von bewehrtem Beton

Der bisher gängige Ansatz zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen berücksichtigt wesentliche Parameter der Betonzusammensetzung wie den Wasser/Zement-Wert und den Zementgehalt. Diese fließen in die deskriptive Beschreibung der Widerstandsfähigkeit eines Betons über die Dauerhaftigkeitsklassen ein und wirken sich unter anderem auch in der Bemessung zum Beispiel über die Festlegung der erforderlichen Betonüberdeckung aus [6]. Der Einfluss klassischer Betonzusatzstoffe wird über das k-Wert-Konzept berücksichtigt [6-9]. Dieser Ansatz unterstellt

stillschweigend vergleichbare positive wie negative Einflüsse auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Nach wie vor werden für Expositionsklassen bestimmte Mindestdruckfestigkeitsklassen empfohlen [9], obwohl schon lange bekannt ist, dass dieser Zusammenhang oftmals nur schwache bis keine Anhaltswerte liefert [10]. Die Bundesanstalt für Wasserbau [11] verfolgt einen anderen Ansatz. In Nomogrammen finden verschiedene Zementarten nach [12] und Flugasche in Altersexponenten explizit Berücksichtigung. Andere Zusatzstoffe und insbesondere calcinierte Tone finden bisher in den Vorschriften nur als Zementhauptbestandteil Eingang. Obwohl sie nicht explizit in [11] erwähnt werden, sind für Zemente mit calcinierten Tonen als Hauptbestandteil unter anderem aus [13] vergleichbare Ergebnisse wie für andere Kompositzemente bekannt. Als Betonzusatzstoff sind calcinierte Tone noch nicht genormt und werden daher bisher nicht berücksichtigt. Eine Option, calcinierte Tone bereits jetzt in einer Betonrezeptur als reaktiven Bestandteil des Bindemittels zu berücksichtigen, bietet das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit in DIN EN 206 in Verbindung mit DIN CEN/TR 16563 [14].

### 3 Materialien

Für die Versuche wurde ein Portlandkompositzement CEM II/A-LL 32,5 R nach [12] der Schwenk Zement KG aus dem Werk Allmendingen verwendet. Als Zusatzstoffe kamen ein calcinierter Amaltheen-Ton (CT) [15] und ein mit Glasabrieb verunreinigtes Metakaolin (Mk) [16] zum Einsatz. Tabelle 1 zeigt die chemische Zusammensetzung und Tabelle 2 ausgewählte physikalische Kennwerte. Die Gesteinskörnung war Münchner Moränekies in den Fraktionen 0/4, 4/8 und 8/16 mm. Die gewünschte Konsistenz wurde mit einem PCE-basierten Fließmittel eingestellt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Zements und der verwendeten Betonzusatzstoffe

Oxide in M.-%	CEM II/A-LL 32,5 R	Calcinierter Ton	Metakaolin mit Glasanteil
SiO <sub>2</sub>	18,5	54,0	64,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,6	21,4	19,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	9,0	0,9
CaO	60,4	4,3	3,1
MgO	1,9	2,0	0,8
SO <sub>3</sub>	2,6	1,0	0,1
Na <sub>2</sub> O	0,7*	0,4	8,8
K <sub>2</sub> O	-	3,0	2,1
TiO <sub>2</sub>	0,3	1,0	1,0

\*Na<sub>2</sub>O-Äquivalent

Tabelle 2: Physikalische Kennwerte des Zements und der verwendeten Betonzusatzstoffe

Kennwert	CEM II/A-LL 32,5 R	Calcinierter Ton	Metakaolin mit Glasanteil
Wasseranspruch [M.-%]	23	38	61
Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	3,14	2,63	2,29
BET-Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	1,7	5,5	4,1
d <sub>50</sub> [µm]	13,1	13,3	12,3

Für die Untersuchung des Chlorideindringverhaltens wurden vier Betone mit einem konstanten Bindemittelgehalt hergestellt. Die Rezepturen für die Referenz (Ref) und die Betone mit den Betonzusatzstoffen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Bezeichnungen geben den jeweiligen prozentualen Austausch des Zements gegen den calcinierten Amaltheen-Ton (CT) bzw. gegen das Metakaolin (Mk) an.

Tabelle 3: Verwendete Betonrezepturen für die Bestimmung des Chlorideindringverhaltens

Material	Beton			
	Ref	11CT	25CT	11Mk
Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	340	303	255	303
Betonzusatzstoff [kg/m <sup>3</sup> ]	-	37	85	37
Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	153	153	153	153
Fließmittel [M.-% v.Z.]	0,15	0,28	0,83	0,61
Gesteinskörnung [kg/m <sup>3</sup> ]				
0/4 [mm]	895	892	888	892
4/8 [mm]	318	317	316	317
8/16 [mm]	740	739	735	739

Die Carbonatisierung wurde an Mörtelproben studiert. Als Basis diente die Normrezeptur nach DIN EN 196-1 [17]. Der Zement wurde wie bei den Betonrezepturen prozentual gegen den calcinierten Amaltheen-Ton bzw. gegen das Metakaolin ausgetauscht (Tabelle 4).

Die Bindemittelkombination der Betone bzw. Mörtel 11CT und 11Mk entsprechen CEM II/B-M(Q-LL) Zementen nach DIN EN 197-1 [12], während die Bindemittelzusammensetzung des Betons bzw. Mörtels 25CT sogar einem Portlandkompositzement CEM II/C-M(Q-LL) nach der neuen DIN EN 197-5 [5] entspricht. Somit wird hier bereits ein möglicher Zement der neuesten Normengeneration betrachtet.

Tabelle 4: Verwendete Mörtelrezepturen in Anlehnung an DIN EN 196-1 [17] für die Ermittlung der Carbonatisierungstiefen

Material	Mörtel			
	Ref	11CT	25CT	11Mk
Zement [g]	450,0	400,5	337,5	400,5
Betonzusatzstoff [g]	-	49,5	112,5	49,5
Wasser [g]	225,0	225,0	225,0	225,0
Normsand [g]	1350,0	1350,0	1350,0	1350,0

#### 4 Methoden

Die Betone wurden nach [18] hergestellt und gelagert. Die Konsistenz wurde über das Ausbreitmaß [19] ermittelt und für alle Betone in die Klasse F1 eingestuft. Die Frischbetonrohlichten wurden nach [20] und die Druckfestigkeit gemäß [21] nach 28-tägiger Wasserlagerung an je drei 150-mm-Würfeln ermittelt.

Für die Bestimmung des Chlorideindringwiderstands wurde der Rapid Chloride Migration (RCM) Test nach BAW-Merkblatt [11] herangezogen. Aus den 150-mm-Würfeln wurde nach 28-tägiger Vorlagerung zunächst je ein 100-mm-Bohrkern in Betonierrichtung gewonnen. Die obere Schicht des Bohrkerns von mindestens 50 mm Dicke wurde abgetrennt und dann die eigentliche Probe auf eine Scheibendicke von  $50 \pm 2$  mm abgelängt und die Oberflächen geschliffen (Bild 1).

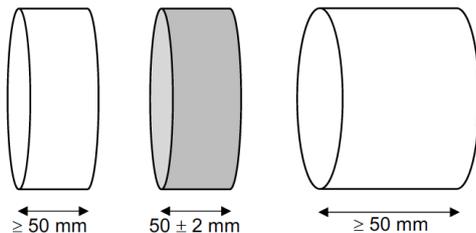


Bild 1: Konfektionierung der Proben für den RCM Test

Die Prüfung des Chlorideindringwiderstands erfolgte bereits ab einem Betonalter von 33 bis 35 Tagen. Zur Bestimmung der Chlorideindringtiefe wurden die Proben nach Versuchsende ausgebaut, gespalten und mit einer 0,1 N Silbernitratlösung besprüht. Die Messung der Chlorideindringtiefe erfolgte sieben Tage nach dem Besprühen im Abstand von 1 cm auf den Probenhälften. Aus den ermittelten Eindringtiefen wurde der Chloridmigrationskoeffizient nach BAW-Merkblatt [11] berechnet.

Die Lagerung der Mörtelprismen für die Untersuchung der Carbonatisierung erfolgte nach [14]. Eine Hälfte der Prismen lagerte 28 Tage unter Wasser. Die andere Hälfte verblieb sieben Tage unter Wasser und danach 21 Tage im Klimaraum bei  $20^\circ\text{C}/65\%$  rel. Feuchte. Die Druckfestigkeit wurde jeweils nach 28 Tagen bestimmt. Der Carbonatisierungsfortschritt wurde ab einem Alter von 28 Tagen über 56 Tage an frisch gebrochenen Oberflächen mittels Phenolphthalein bestimmt. Für jede Mörtelrezeptur wurde der Einfluss zweier Lagerungsbedingungen auf den Carbonatisierungsfortschritt untersucht: Lagerung im Klimaraum bei  $20^\circ\text{C}/65\%$  r.F. und Lagerung in einer Umgebung mit erhöhtem  $\text{CO}_2$ -Gehalt. Für letztere Versuche wurde ein  $\text{CO}_2$ -Schrank genutzt, der im Klimaraum stand. Der erhöhte  $\text{CO}_2$ -Gehalt lag bei 2,5-3 Vol. %.

#### 5 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der begleitenden Druckfestigkeitsuntersuchungen zeigen deutlich die puzzolane Reaktivität der verwendeten calcinierten Tone (Bild 2) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die Ergebnisse bestätigen eigene frühere Untersuchungen mit Substitutionsraten von bis zu 20 %, in denen in Kombination mit anderen Zementsorten und unterschiedlichen Festigkeitsklassen spätestens nach 28 Tagen die Druckfestigkeit in der Größenordnung der jeweiligen Referenzmischungen lag [22-24]. In den vorliegenden Untersuchungen weist der Beton mit dem niedrigsten Klinkergehalt (25CT) den höchsten Festigkeitswert auf und hat damit die höchste ökologische Effizienz mit der niedrigsten leistungsbezogenen  $\text{CO}_2$ -Emission (Bild 3).

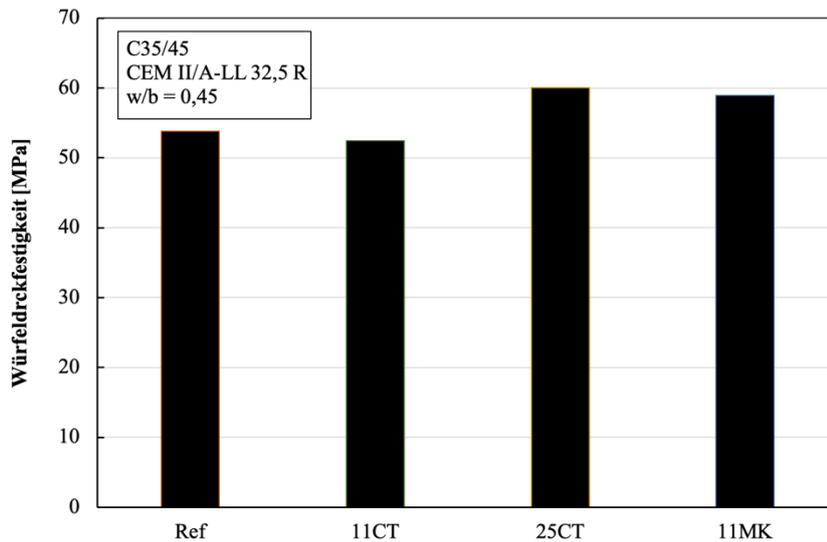


Bild 2: Würfeldruckfestigkeitswerte nach 28 Tagen der Betone

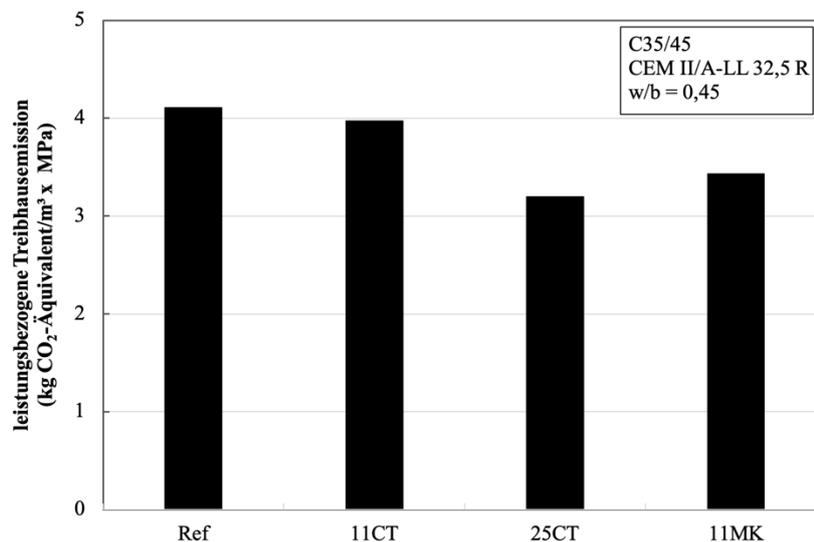


Bild 3: Leistungsbezogene Treibhausmission der untersuchten Betone

Die Prüfung des Eindringwiderstands gegenüber Chloriden belegt eindrucksvoll das Potenzial calcinierter Tone als Bindemittelbestandteil. Das BAW-Merkblatt [25] legt einen Chloridmigrationskoeffizienten  $\leq 12,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  als oberen Grenzwert unabhängig von der Zementart für die Expositionen XS und XD fest. Nach dieser Vorgabe eignet sich keiner der vier untersuchten Betone für eine derartige Exposition. Dies passt zu der Festlegung im neusten BAW-Merkblatt [26], nach der ein CEM II/A-LL nicht für die Expositionsklassen XS und XD zugelassen ist, der hier als Basis diente. Andererseits sind in Deutschland die Anwendungsbereiche für Zement nach DIN EN 197-1 [12] in den Normen DIN EN 206 [9], DIN 1045-2 [8] und DIN EN 1992-1-1 [27] geregelt. Im Rahmen dieser Normen ist ein CEM II/A-LL für die Expositionsbedingungen XD 1 - XD 3 und XS 1 - XS 3 uneingeschränkt anwendbar. Diese Regelung deckt sich mit dem Grenzwert des Chloridmigrationskoeffizienten von  $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  des DIBt für die Zulassungen von Zementen. Somit sind alle vorgestellten Kompositzemente für die Exposition Chloride verwendbar. Zemente nach DIN EN 197-5 [5], wie im vorliegenden Fall bei 25CT, werden bisher noch nicht in den Anwendungsnormen erfasst. Ungeachtet dessen zeigen die drei Betone mit den calcinierten Tönen deutlich geringere Chloridmigrationskoeffizienten als der Referenzbeton. Bei 11CT wird der Chloridmigrationskoeffizient um mehr als 20 % und bei 25CT bzw. 11MK um jeweils mehr als 40 % reduziert (Bild 4). Die calcinierten Töne eignen sich demnach hervorragend für den Einsatz bei Expositionsklassen XS und XD selbst bei einer Klinkersubstitution von bis zu 50 %. Die Ergebnisse decken sich mit den Beobachtungen von Cordaba et al. [28], die ebenfalls eine deutlich positive Wirkung calcinierter Töne beschreiben.

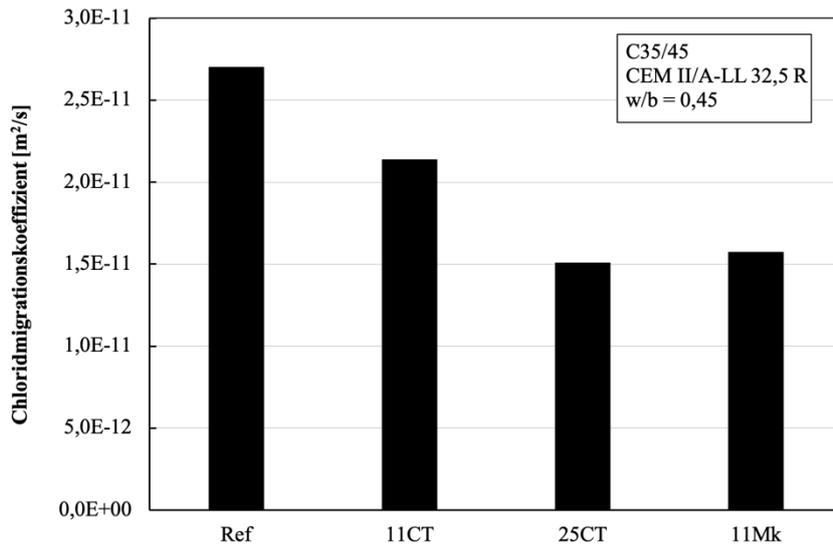


Bild 4: Mittlere Chloridmigrationskoeffizienten nach 28 Tagen Lagerung in Abhängigkeit von der Betonrezeptur

Die Carbonatisierungstiefen von wassergelagerten Proben sind nicht dargestellt, da nur ein minimales Eindringen von CO<sub>2</sub> festgestellt werden konnte. Mit einer Eindringtiefe von 0,3 mm nach 56 Tagen variierten hier alle Werte in einem noch nicht aussagekräftigen Bereich. Bild 5 zeigt die Entwicklung der Carbonatisierungstiefe für die luftgelagerten Proben. Im Beobachtungszeitraum nehmen die Carbonatisierungstiefen deutlich zu. Dabei deutet sich eine größere Carbonatisierungstiefe mit steigender Substitution durch calcinierten Ton an. Die Werte bewegen sich in einem Bereich, der aus vergleichbaren Versuchen an Feinbetonprismen mit verschiedenen CEM II-C/M-Zementen [29] und Europäischen technischen Bewertungen von calcinierten Schichtsilikaten [30] bekannt ist. Sie liegen nach 84 Tagen noch unter Werten, die für Mischungen aus CEM I mit 25 % calciniertem Ton ermittelt wurden [28].

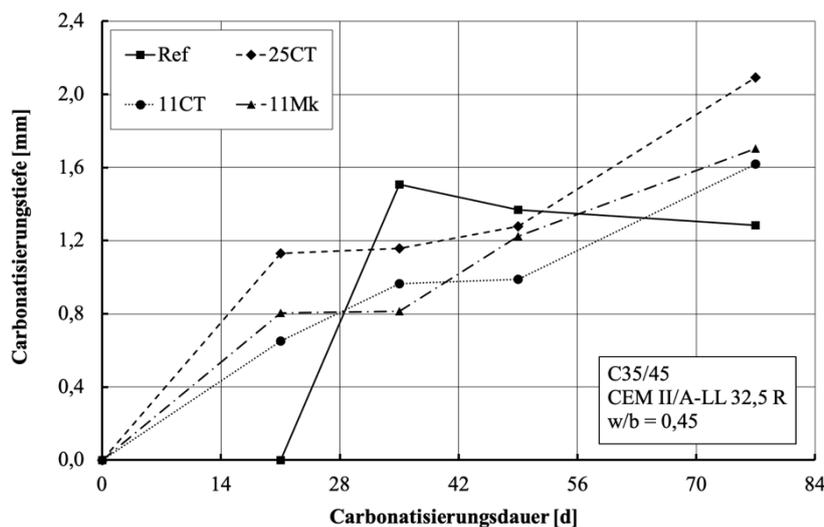


Bild 5: Entwicklung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel mit und ohne calcinierten Ton nach Luftlagerung

Die Druckfestigkeit der Mörtel wird durch die calcinierten Tone positiv beeinflusst (Bild 6). Eine Korrelation mit den beobachteten Carbonatisierungstiefen ist nicht zu erkennen. Dies deckt sich mit den Auswertungen über die Carbonatisierung von Feinbetonprismen, die unter anderem dem Deutschen Institut für Bautechnik als Bewertungshintergrund dienen [29].

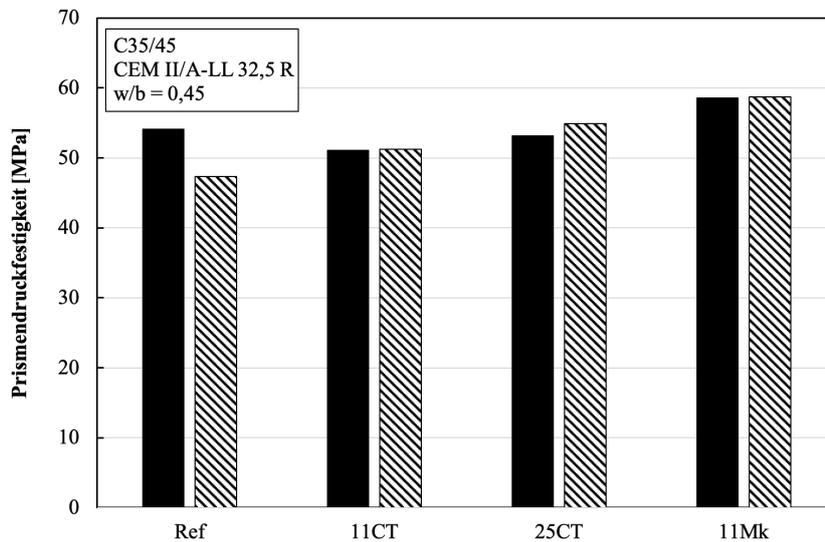


Bild 6: Druckfestigkeitswerte der Prismen aus Carbonatisierungsversuchen nach Wasserlagerung (schwarze Balken) und Luftlagerung (gestrichelte Balken)

## 6 Zusammenfassung

Calcinierte Tone werden zukünftig eine wesentliche Bedeutung als Zementhauptbestandteil und als Betonzusatzstoff erlangen. Ihr Potenzial kann in den aktuellen Normen nur über das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit erfasst werden, da es noch keine Normen für diese Stoffgruppe gibt. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen exemplarisch am Beispiel des Widerstands gegen das Eindringen von Chloriden und dem Carbonatisierungsverhalten Stärken und Grenzen des Einsatzes calcinierter Tone auf. Einerseits wird der Chloridmigrationskoeffizient deutlich verringert und damit der Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden verbessert. Andererseits nimmt die Carbonisierungstiefe im Vergleich mit dem Referenzbeton zu. Sie bewegt sich dabei allerdings in einer Größe, wie sie auch beim Einsatz anderer Kompositzemente bekannt ist. Die Festigkeit kann durch die hier untersuchten calcinierten Tone gesteigert werden. Alle vorgestellten Kompositzemente sind für die Exposition Chloride verwendbar. Anhand der Rezeptur 25CT wird deutlich, dass dies auch für den hier untersuchten Kompositzement CEM II-C/M (Q-LL) nach DIN EN 197-5 [5] gilt.

Mit calcinierten Tönen wird der Zement- und Betonindustrie in Zukunft ein leistungsfähiger Zementhauptbestandteil oder Betonzusatzstoff zur Verfügung stehen. Eine normative Abdeckung in den Regelwerken sollte angestrebt werden, um schneller auf dem Weg zum "Net-Zero"-Ziel voranzukommen.

## 7 Literatur

- [1] International Energy Agency (IEA), Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. 2018, Paris, France. 66 p.
- [2] Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. 2020, Düsseldorf. 60 p.
- [3] Pamenter, S.; Myers, R.J., *Decarbonizing the cementitious materials cycle: A whole-systems review of measures to decarbonize the cement supply chain in the UK and European contexts*. Journal of Industrial Ecology, 2021. 25(2): pp. 359-376.
- [4] Thienel, K.-C.; Beuntner, N., *Calcinierte Tone und ihr Potenzial für die moderne Betontechnologie*, in 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung KIT - Betone der Zukunft - Herausforderungen und Chancen, Nolting, U. et al., Editors. 2018, KIT Scientific Publishing: Karlsruhe. p. 37-48.
- [5] DIN EN 197-5. *Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI (Cement - Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI)*. 2021, p. 12.
- [6] DIN EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. 2011, p. 241.
- [7] CEN/TR 16639. *Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept*. 2014, p. 63.
- [8] DIN 1045-2. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1)*. 2008, p. 62.
- [9] DIN EN 206. *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (Concrete - Specification, performance, production and conformity)*. 2021, p. 105.

- [10] Müller, C.; Palm, S.; Wolter, A. and Bohne, T., *Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton*. beton, 2014. 64(7/8): pp. 305-309.
- [11] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), *Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC) - Änderung A1*. 2017, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Karlsruhe, Germany. p. 76.
- [12] DIN EN 197-1. *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement (Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements)*. 2011, p. 8.
- [13] Pierkes, R.; Schulze, S.E. and Rickert, J., *Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements, in Calcined Clays for Sustainable Concrete - Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Martirena, F.; Favier, A. and Scrivener, K., Editors. 2018, Springer Nature: La Havanna, Cuba. p. 366-371.
- [14] DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097). *Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit (Principles of the equivalent durability procedure)*. 2014, p. 39.
- [15] Liapor GmbH & Co. KG, *Technical datasheet for Liapor Calcined Clay - Natural calcined pozzolana, Q as described in EN 197-1*. 2021: Hallerndorf/Pautzfeld, Germany.
- [16] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.35-2051 "Metapor" als Betonzusatzstoff Typ II, in Z-3.35-2051*. 2016: Berlin, Germany. p. 10.
- [17] DIN EN 196-1. *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit (Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength)*. 2016, p. 31.
- [18] DIN EN 12390-2. *Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung (Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests; German Version of EN 12390-2)*. 2019, p. 8.
- [19] DIN EN 12350-5. *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß (Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test)*. 2019, p. 12.
- [20] DIN EN 12350-6. *Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte*. 2011, p. 7.
- [21] DIN EN 12390-3. *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens)*. 2019, p. 20.
- [22] Thienel, K.-C.; Beuntner, N., *Effects of calcined clay as low carbon cementing materials on the properties of concrete*, in *Concrete in the Low Carbon Era*, Jones, M.R. et al., Editors. 2012, University of Dundee – Concrete Technology Unit: Dundee, UK. p. 504-518.
- [23] Thienel, K.-C.; Beuntner, N., *Ökologisch und technisch verbesserte Betone durch den Einsatz alternativer Zusatzstoffe*, in *Nachhaltigkeit und Innovation*, Schwarz, J.; Thienel, K.-C., Editors. 2013, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften: Neubiberg. p. 58-65.
- [24] Beuntner, N.; Sposito, R. and Thienel, K.-C., *Potential of Calcined Mixed-Layer Clays as Pozzolans in Concrete*. ACI Materials Journal, 2019. 116(4): pp. 19-29.
- [25] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), *BAW Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL)*. 2012, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Karlsruhe, Germany. p. 13.
- [26] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), *Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)*. 2019, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Karlsruhe, Germany. p. 76.
- [27] DIN EN 1996-1-1. *Eurocode 6 – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk (Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures)*. 2013, p. 116.
- [28] Cordoba, G.; Sposito, R.; Köberl, M.; Zito, S.; Beuntner, N.; Tironi, A.; Thienel, K.-C. and Irassar, E.F., *Chloride migration and long-term natural carbonation on concretes with calcined clays: A study of calcined clays in Argentina*. Case Studies in Construction Materials, 2022. 17: pp. e01190.
- [29] Müller, C.; Palm, S. and Hermerschmidt, W., *Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen: Auswertung vorhandener Studien*. Beton, 2019. 69(10): pp. 362-371.
- [30] MC Bauchemie Müller GmbH & Co. KG. *Centril NC II - Pulver Calciniertes Schichtsilikat als Typ II Betonzusatzstoff*. 2017, p. 9.