



Verbesserung der Energieeffizienz und Reaktivität durch separate Mahlung von Ziegelbrechsand für den Einsatz in Portlandpuzzolanzementen

Kurzfassung zum Schlussbericht IGF-Vorhaben 20920 N

Essen, den 22. Dezember 2022

1 HINTERGRUND

Die Herstellung von Zement ist energieintensiv. Durch den effizienten Einsatz des Portlandzementklinkers in Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen ergibt sich die Möglichkeit, die CO₂-Emissionen (Prozessemissionen) bei der Herstellung von Zement zu senken. Hauptbestandteile, wie z. B. Hüttensand oder Flugasche, stehen jedoch in sinkender Quantität zur Verfügung. Es sind daher zunehmend neue Hauptbestandteile mit adäquaten Eigenschaften notwendig, um die CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung zu verringern.

2 ZIELSETZUNG

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „R-Beton“ wurde die prinzipielle Eignung von ziegelhaltigem Mauerwerksbruch als Zementbestandteil festgestellt. Es konnten im Einzelfall bis zu 30 M.-% eines gemahlten ziegelhaltigen Recyclingmaterials zugesetzt werden. Die gezielte Steuerung und effiziente Mahlung aller Zementbestandteile ist essentiell zum Erreichen der entsprechenden technischen Eigenschaften. Dies gilt insbesondere auch für die hier betrachteten Portlandpuzzolanzemente unter Verwendung ziegelhaltiger Ausgangsstoffe. Die Mahlprodukte sind aufgrund der Substitution des Klinkers granulometrisch aufeinander abzustimmen (z. B. feiner zu mahlen), um schließlich einen Kompositzement mit optimierten Eigenschaften herstellen zu können. Bei gemeinsamer Mahlung von Zementbestandteilen (z. B. Portlandzementklinker und ziegelhaltiges Recyclingmaterial) kann es zur Übermahlung des Mahlguts kommen, insbesondere, wenn sehr schwer und sehr leicht mahlbare Ausgangsstoffe nebeneinander vorliegen. Daher sollten im hier beschriebenen Forschungsvorhaben der Ziegelbruch (ZB), der ziegelhaltige Mauerwerksbruch (MWB) sowie der Baustellenrückläufer (BRL) separat gemahlen werden. Durch die Steuerung des Feinbereiches kann die Korngrößenverteilung (KGV) gezielt angepasst werden und dazu beitragen, die Klinkersubstitutionsrate zu erhöhen sowie die CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung zu senken. Die gezielte Beeinflussung der Korngrößenverteilung durch getrennte Mahlung kann die jeweils betrachteten Eigenschaften beeinflussen.

3 DURCHFÜHRUNG

Es wurden fünf Ziegelproben aus verschiedenen Quellen verwendet, darunter gebrochene Mauerziegel, Schleifstaub aus der Produktion von Planziegel und ein Baustellenrückläufer. Die drei Proben aus ziegelhaltigem MWB kamen aus Recycling-Werken, die in geographischer Nähe zu den Ziegelwerken lagen. Die stückigen, ziegelhaltigen Ausgangsstoffe wurden erneut zerkleinert und auf Korngrößen von ca. 0/2 mm bis ca. 0/4 mm gebrochen. (Die in der Vorzerkleinerung entstehenden Fraktionen aus ZB oder MWB wurden in diesem Projekt als „Ziegelbrechsande“ bzw. „Recyclingbrechsande“ bezeichnet.) Zur Vorbereitung der separaten Mahlung wurden die Ausgangsstoffe getrocknet. Die Mahlung der vorzerkleinerten, getrockneten Ausgangsstoffe erfolgte mit einer diskontinuierlich arbeitenden Chargenkugelmühle, das Mahlgut wurde auf verschiedene Feinheiten gemahlen, wobei für jede Feinheit die Leistungsaufnahme

der Mühle (bezogen auf die Masse des Mahlgutes) ermittelt wurde. Die Reaktivität der ziegelhaltigen Mahlprodukte wurde mittels Surana- und Chapelle-Test beurteilt. Unter Verwendung eines Portlandzements (CEM I als Klinkerkomponente) sowie eines ziegelhaltigen Mahlproduktes (Recyclingmehle aus ZB oder MWB) wurden sog. R-Zemente hergestellt und untersucht. Die Anteile der ziegelhaltigen Recyclingmehle wurden überwiegend mit 30 M.-% im R-Zement eingestellt. An den R-Zementen wurde die Druckfestigkeit im Alter von 2 und 28 Tagen (gemäß DIN EN 196-1) geprüft. Zementspezifische Einflussparameter können sich auf die Porosität und die Porengrößenverteilung (PGV) von Mörteln und Betonen auswirken. Die Porosität und die Porengrößenverteilung sind für viele dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften zementgebundener Baustoffe von grundlegender Bedeutung. An einigen Zementnormmörteln wurde daher im Alter von 28 Tagen die Porengrößenverteilung gemessen. Die Feststellung der Porengrößenverteilung erfolgte mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. Es wurden Intrusionskurven im Druckbereich von 0 bis 200 MPa aufgezeichnet. Dies entspricht einem Radienbereich von 50 µm bis 3,7 nm. Der Nachweis der Leistungsfähigkeit ausgewählter, ziegelhaltiger Versuchszemente sollte sich möglichst unmittelbar an den bauordnungsrechtlichen Verfahren orientieren. Daher wurden für die Anwendung der Versuchszemente die Prüfverfahren und Betonzusammensetzungen verwendet, die in bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen durch das DIBt relevant sind. Die eingesetzten Verfahren haben auch Eingang gefunden in das Europäischen Bewertungsdokument EAD 150001-00-0301 sowie in die Verfahrensgrundsätze CEN TR 16563 Anhang B. Das Dauerhaftigkeitspotenzial im Beton sollte jeweils in zulassungsrelevanten Grenzrezepturen geprüft werden. Dazu zählen die Untersuchungen des Frostwiderstandes, des Frost-Tausalz-Widerstandes, des Chloridmigrationswiderstandes und des Carbonatisierungswiderstandes.

4 ERGEBNISSE

Abb. 1 zeigt die Leistungsaufnahme der Labormühle beim separaten Mahlen der ziegelhaltigen Recyclingmaterialien auf verschiedene Feinheiten. Mit zunehmender Mahlfeinheit steigt der massebezogene

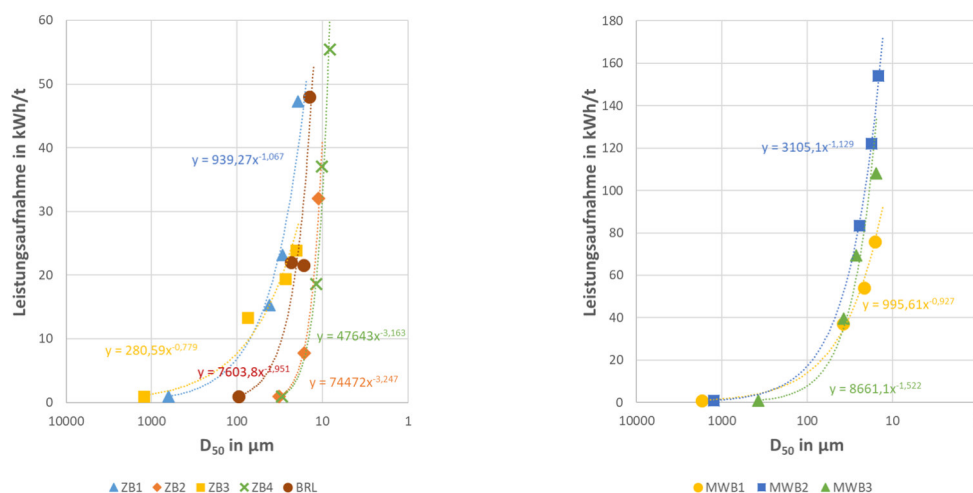


Abb. 1: Leistungsaufnahme des Mahlgreggats in Abhängigkeit des mittleren Korndurchmessers des ziegelhaltigen Mahlgutes (links: ZB, rechts: MWB)

Energiebedarf exponentiell an, wobei zur Mahlung von MWB (Bild rechts) ca. dreimal so viel Energie benötigt wurde wie zur Mahlung von ZB auf vergleichbare Feinheiten (Bild links). Verursacht wird dies durch den höheren Quarzgehalt des MWB. Da es sich bei Quarz um das härteste Mineral handelt, welches in beiden Materialien vorkommt, sind dessen Gehalt und Feinheit bestimmend für die benötigte Mahlenergie. Beim ZB liegt Quarz sowohl in geringeren Mengen als auch in feinerem Zustand vor.

Reaktivität der ziegelhaltigen Recyclingmehle

Ziegel hat puzzolanische Eigenschaften, da die Tonminerale beim Brand in einen amorphen Zustand übergehen, wodurch sie in basischem Milieu Al- und Si-Ionen freisetzen können. Diese reagieren mit Ca(OH)_2 , welches bei der Hydratation von Zement entsteht, zu Calcium-Aluminat- bzw. Calcium-Silikat-Hydratphasen. Es konnte gezeigt werden, dass die Reaktivität auch in Abhängigkeit der Mahlfeinheit zunimmt. Dies ist auf die mineralogische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe zurückzuführen, die sowohl die Mahlbarkeit bzw. die im Mahlgut entstehende Korngrößenverteilung als auch die Reaktivität bei feinerer Aufmahlung beeinflusst. Da die puzzolanischen Eigenschaften durch die Calcinierung der Tonminerale verursacht werden, besteht ein Zusammenhang zwischen der Reaktivität eines gebrannten Tons (z. B. Ziegel) und der Tonmineralart sowie dem Tonmineralgehalt des Ausgangstons. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Menge an löslichem Al_2O_3 mit dem Gehalt an (Meta-)Illit, der ein Calcinierungsprodukt der Tonminerale ist, korreliert (siehe Abb. 2). Sowohl die Menge des freigesetzten Al_2O_3 als auch der Gehalt an (Meta-)Illit sind beim ZB deutlich höher als beim MWB.

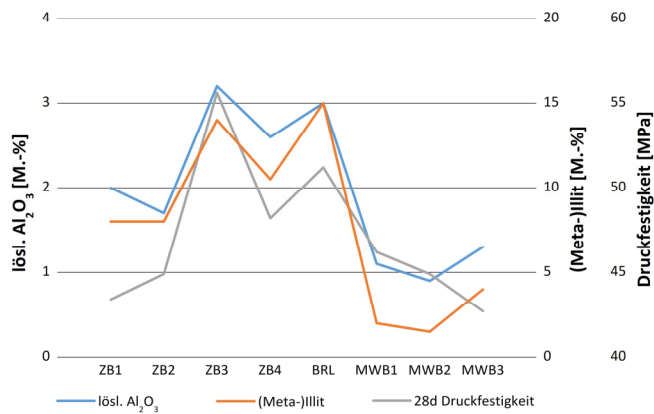


Abb. 2: Zusammenhang zwischen lösli. Al_2O_3 und (Meta-)Illit-Gehalt der Brechsande und der Druckfestigkeit eines R-Zements mit 30 M-% Brechsandmehl ähnlicher Mahlfeinheit in Kombination mit 70 M.-% CEM I 42,5 R

Die 28d-Druckfestigkeit der Zemente korreliert bei den ZB-Proben ebenfalls gut mit dem löslichen Al_2O_3 (siehe Abb. 2). Die höhere puzzolanische Aktivität hat Auswirkungen auf die Druckfestigkeit der ziegelhaltigen Zemente. Da die Reaktivität eines Ziegels von der Mineralogie des gebrannten Scherbens und somit von der Brenntemperatur und der Mineralogie des Ausgangstons abhängt, variiert sie stark. Dies zeigt die Tatsache, dass die Proben ZB4 und BRL aus dem selben Ziegelwerk stammen. Eventuell existieren Unterschiede in der Reaktivität je nach Produktionsdatum, da sich die Zusammensetzung einer Ton-

minerallagerstätte mit dem Abbauhorizont ändert. Vielleicht fand auch eine Variation bei Brenntemperatur oder Haltezeit statt. Des Weiteren können Lagerungs- und Aufbereitungsbedingungen des RC-Materials eine Auswirkung haben. Im Durchschnitt ist aber sowohl die Reaktivität der Mehle aus ZB als auch die 28d-Druckfestigkeit höher als die der Mehle aus MWB. Beim MWB ist der Zusammenhang zwischen Al_2O_3 -Löslichkeit und Druckfestigkeit so nicht erkennbar, da im MWB neben Ziegel auch andere Bestandteile eines Mauerwerks (z. B. Mörtelreste) vorliegen können und zudem nur drei MWB-Proben untersucht wurden.

Die höhere puzzolanische Aktivität des gemahlene ZB im Vergleich zum MWB wird auch in Abb. 3 verdeutlicht. Hier wurden die 2d- und 28d-Druckfestigkeiten der Zemente mit 30 M.-% ZB bzw. MWB in Bezug zur benötigten Mahlenergie gesetzt. Die durchschnittliche 2d Druckfestigkeit der Zemente mit MWB ist geringfügig höher als die der Zemente mit ZB, wohingegen die durchschnittliche 28d Druckfestigkeit der Zemente mit ZB deutlich höher ist als die der Zemente mit MWB. Dies ist das Ergebnis der puzzolanischen Reaktion im Alter von 28 Tagen. Dass diese sehr stark von der Mineralogie abhängt, zeigen die Unterschiede in der Druckfestigkeit der ziegelbruchhaltigen Zemente nach 28d, die größer sind als bei den Zementen mit MWB. Der gemahlene ZB besitzt nicht nur eine höhere Reaktivität, sondern benötigt auch deutlich weniger Energie bei der Mahlung als der MWB bei vergleichbarer Mahlfeinheit.

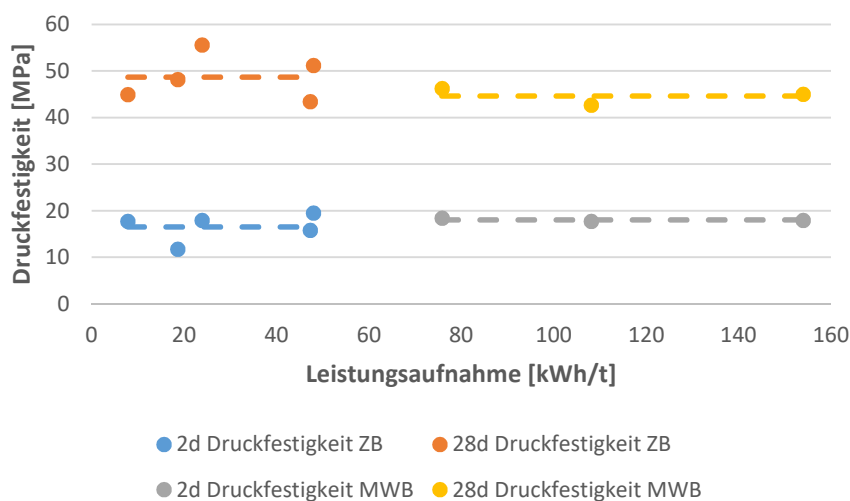


Abb. 3: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsandmehl ähnlicher Mahlfeinheit ($D_{50} = 11,8$ bis $20,3 \mu m$) in Kombination mit 70 M.-% CEM I 42,5 R und der Leistungsaufnahme der Chargenkugelmühle während der separaten Mahlung; gestrichelte Linien stehen für die durchschnittliche Druckfestigkeit aller R-Zemente mit ZB- bzw. MWB

Granulometrische Einflüsse der separaten Mahlung auf die Zement- und Gefügeeigenschaften der Normmörtel

Das Mahlverfahren und die Mahlbarkeit beeinflussen die granulometrischen Eigenschaften eines Mahlgutes. Es wurde untersucht, welche Auswirkungen die separate Mahlung der RC-Ausgangstoffe, insbe-

sondere die zunehmende Mahlfeinheit, auf die Druckfestigkeit der R-Zemente hatte. Es wurden die Effekte der groben Mahlprodukte (erste Mahlstufe) mit den Effekten der feinen Mahlprodukte (letzte Mahlstufe) verglichen. Abb. 4 zeigt die Druckfestigkeit der Zemente mit 30 M.-% grobem und feinem Ziegelbruch in der Prüfung am Normmörtel gemäß DIN EN 196-1 (Beispiel ZB 3).

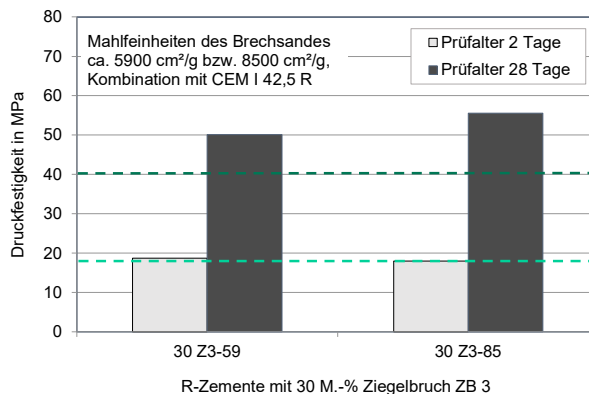


Abb. 4: Druckfestigkeit der R-Zemente mit 30 M.-% ZB 3 in Abhängigkeit der Mahlfeinheit des ZB, CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente

Aus der Darstellung geht beispielhaft hervor, dass mit höherer Feinheit des gemahlten ZB 3 die Normfestigkeit des Zements zunahm. Im Prüfalter von 28 Tagen wurde bei Verwendung des feineren ZB 3 eine ca. 6 MPa höhere Druckfestigkeit ermittelt als im Vergleich zum gröberem ZB 3. Mit ZB 3 wurde auf diese Weise eine um 15 MPa höhere Druckfestigkeit als im Vergleich zur Verdünnungslinie des CEM I 42,5 R erzielt. Im Prüfalter von 2 Tagen wurde bei Verwendung von ZB3 die Verdünnungslinie erreicht. Es wurde kein Effekt der Mahlfeinheit festgestellt. Die Verdünnungslinien für die 2d- und 28d-Druckfestigkeit des CEM I 42,5 R sind in den Bildern bei ca. 18 MPa bzw. ca. 40 MPa eingetragen.

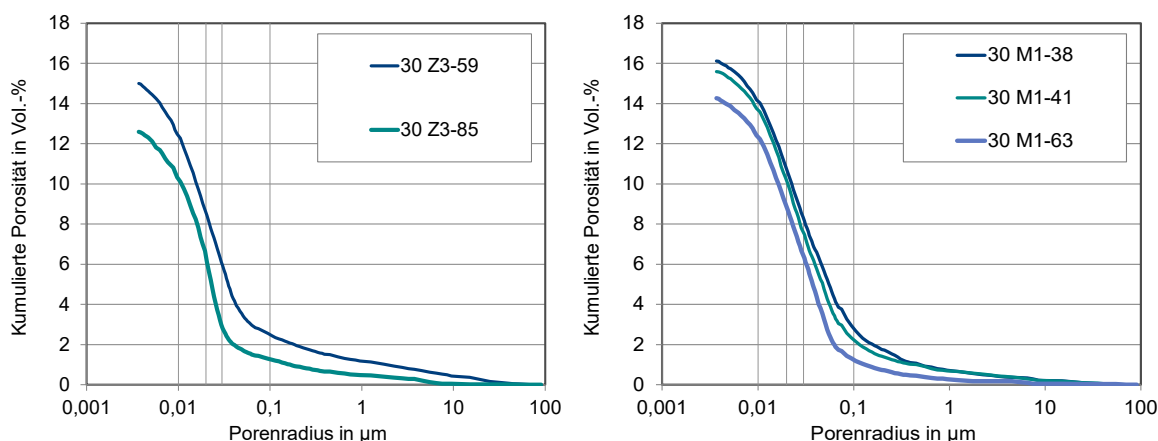


Abb. 5: PGV am Normmörtel im Alter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zement mit 30 M.-% ZB 3 (links) bzw. 30 M.-% MWB 1 (rechts) mit unterschiedlicher Mahlfeinheit sowie CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente

Jede signifikante Veränderung der Zementzusammensetzung hat Auswirkungen auf die Festigkeit und das Gefüge eines Normmörtels. Wie in der Druckfestigkeitsprüfung zeigen sich auch in der PGV am Normmörtel im Alter von 28 Tagen die granulometrischen Einflüsse. Abb. 5 verdeutlicht, wie sich die PGV-Kurven der Zementmörtel veränderten, sobald der im Zement verwendete ZB3 bzw. MWB 1 durch Mahlung auf der Chargenmühle weiter zerkleinert wurde und sich mit zunehmender Mahlfeinheit eine größere Oberfläche ausbildete.

Bei Substitution des gröbereren ZB 3 bzw. MWB 1 (erste Mahlstufe) durch das entsprechend feinere Mahlgut (letzte Mahlstufe ZB 3 bzw. MWB 1) verlagerte sich der linke Ast der PGV-Kurve in den feinporigen Bereich und endete bei einer geringeren Gesamtporosität. Die Gesamtporosität des ZB-haltigen Mörtels verringerte sich auf 12,6 Vol.-%, die Gesamtporosität des MWB-haltigen Mörtels wurde auf 14,3 Vol.-% verringert. Am ZB 3 wurde die Mahlfeinheit zwischen erster und letzter Mahlstufe am deutlichsten verändert. Aus Abb. 5 links geht hervor, dass im Mörtel 30 Z3-85 im Vergleich zum Mörtel 30 Z3-59 über alle Porenbereiche hinweg eine signifikante Verdichtung des Gefüges ermittelt wurde. Bei Anwendung von ZB 3 mit geringerer Mahlfeinheit wurden über alle Radienbereiche entsprechend höhere Porositäten inkl. Gesamtporosität ermittelt.

Zemente für Betonversuche

Für die Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Beton wurde je ein Zement mit ZB bzw. mit MWB ausgewählt. Die RC-Ausgangsstoffe aus ZB 3 und aus MWB 1 wurden separat auf vergleichbare Korngrößenverteilungen gemahlen, die einer Mahlfeinheit von etwa 5000 cm²/g entsprechen sollten. Anschließend wurden die Versuchszemente mit jeweils 30 M.-% ZB bzw. MWB und 70 M.-% CEM I 42,5 R gemischt. Die erzielten Ergebnisse zeigt Abb. 6. Die Verdünnungslinien für die 2d- und 28d-Druckfestigkeit des CEM I 42,5 R sind in den Bildern bei ca. 18 MPa bzw. ca. 40 MPa eingetragen.

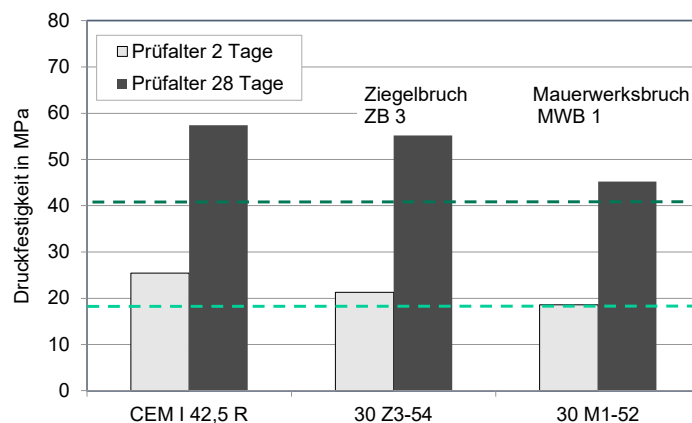


Abb. 6: Druckfestigkeit der R-Zemente mit 30 M.-% ZB 3 bzw. MWB 1 im Vergleich zum Referenzzement (CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente)

Beide R-Zemente erzielten Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen deutlich oberhalb der Verdünnungslinie für CEM I 42,5 R. Mit ZB 3 wurden im Alter von 2 Tagen und 28 Tagen Zementdruckfestigkeiten gemäß der Festigkeitsklasse 52,5 N ermittelt. Die Druckfestigkeiten des Zements mit MWB 1 erreichten die Festigkeitsklasse 42,5 N.

Frostwiderstand im Würfelverfahren

Die Prüfungen zur Bestimmung des Frostwiderstandes wurden nach dem Würfelverfahren durchgeführt. Sie entsprechen den Maßstäben, die bislang bei der Zulassung von Zementen durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) angelegt wurden. Die Prüfung der Betone mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,60$

und einem Zementgehalt $z = 300 \text{ kg/m}^3$ erfolgte bis zu 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) mit einem Wechsel pro Tag.

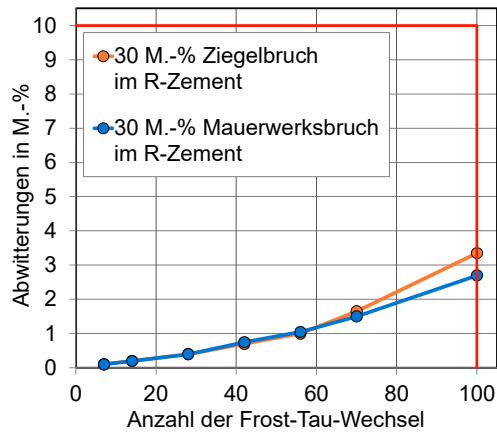


Abb. 7: Abwitterungen der Betone im Würfelverfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, R-Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw.- RC-Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R, Betone mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,60$

Die Abwitterungen der Betone zeigten nur sehr geringe Unterschiede in Abhängigkeit von der Art der RC-Ausgangsstoffe (siehe Abb. 7). Dem folgenden Bild ist zu entnehmen, dass bei Anwendung von Laborzementen mit bis zu 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw.- RC-Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R Abwitterungen von 2,7 M.-% bzw. 3,4 M.-% ermittelt wurden. Der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen von 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln wurde von beiden Betonen eingehalten.

Frost-Tausalz-Widerstand im CDF-Test

Das CDF-Verfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes kam bei Betonen mit künstlichen Luftporen zur Anwendung. Die Betone wurden mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ sowie einem Zementgehalt von $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und einem Luftgehalt im Frischbeton von 5,4 bzw. 5,6 Vol.-% hergestellt.

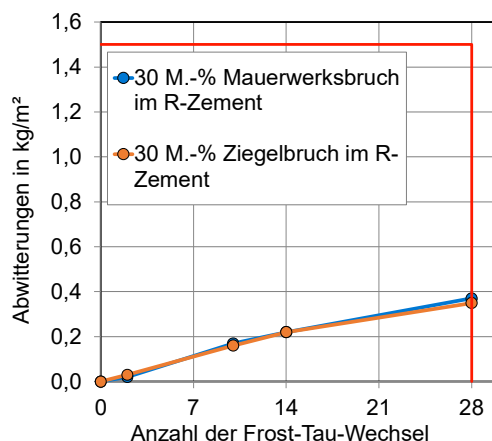


Abb. 8: Abwitterungen der Luftporenbetone im CDF-Test in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, R-Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw.- RC-Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R, LP-Betone mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,50$

In Abb. 8 sind die Ergebnisse der Abwitterungen aus dem CDF-Verfahren dargestellt. Dem Beispiel der R-Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. RC-Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R ist zu

entnehmen, dass das im BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ angegebene Kriterium von maximal 1,50 kg/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln eingehalten wurde. Es zeigte sich, dass die Betone Abwitterungen von maximal 0,37 kg/m² erzielten. Effekte in Abhängigkeit der Art der RC-Ausgangsstoffe wurden nicht festgestellt. Damit lagen die Abwitterungen der beiden im CDF-Test geprüften Luftporenbetone auf sehr niedrigem Niveau.

Chlorideindringwiderstand

Der Widerstand der Betone gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe des Migrationstests nach BAW-Merkblatt bzw. EAD 15001-00-0301 untersucht. Die Prüfkörper wurden bis zum Prüfalter von 35 bzw. 98 Tagen wassergelagert. Der Chloridmigrationskoeffizient der Betone wurde unter Verwendung der R-Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. - RC-Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 9 dargestellt.

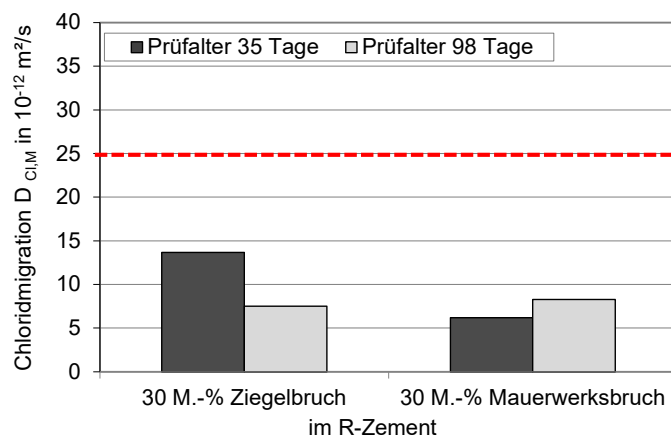


Abb. 9: Chloridmigrationskoeffizienten der Betone unter Verwendung der R-Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. - RC-Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R, Betone mit w/z = 0,50 und z = 320 kg/m³, Prüfalter 35 und 98 Tage

Das in den Zulassungsverfahren des DIBt herangezogene Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ im Prüfalter von 35 Tagen wurde in diesen Versuchen eingehalten. Die Betone unter Verwendung der R-Zemente wiesen mit ca. 14 bzw. $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ im Prüfalter von 35 Tagen Werte deutlich unterhalb des DIBt Beurteilungskriteriums für den Chloridmigrationskoeffizienten auf. Aufgrund der puzzolanischen Reaktivität des ZB 3 verringerten sich die Migrationskoeffizienten dieses Betons mit ZB zwischen dem Prüfalter von 35 Tagen und 98 Tagen und erreichten im Mittel Werte von $7,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Aus den Ergebnissen geht ebenfalls hervor, dass an den R-Zement-Betonen Migrationskoeffizienten ermittelt wurden, die die Anforderungen an den Chlorideindringwiderstand für Anwendungen im Wasserbau ($\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Exposition XS1-2, XD1-2) erfüllen. BAW-Anforderungen an die Expositionsklasse XS3 bzw. XD3 wurden nicht eingehalten.

Carbonatisierungswiderstand

Zur Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der Carbonatisierungstiefe wurden Feinbetone hergestellt. In Bezug auf die Druckfestigkeit der Feinbetone im Prüfalter von sieben Tagen bzw. 28 Tagen (jeweils

nach Vorlagerung) wurden die Carbonatisierungstiefen nach 140 Tagen Hauptlagerung ausgewertet und anhand des DIBt-Bewertungshintergrundes eingeordnet.

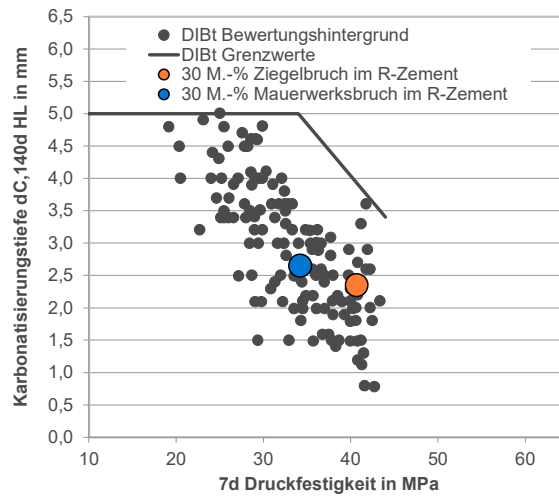


Abb. 10: Carbonatisierungstiefe an Feinbetonen ($w/z = 0,50$) im Prüfalalter von 140 Tagen (Hauptlagerung), Vorlagerung 7 Tage, Anwendung von R-Zementen mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. RC-Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente

Abb. 10 zeigt, dass die Ergebnisse an den Feinbetonen nach 7d-Vorlagerung innerhalb des DIBt-Bewertungshintergrundes liegen. Somit wurde auch die Prüfung des Carbonatisierungswiderstandes unter Verwendung der beiden R-Zemente bestanden.

Die in diesem Projekt untersuchten Betone unter Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% Recyclingmehl aus ZB bzw. MWB erfüllten die wesentlichen zulassungsrelevanten Bewertungskriterien des Deutschen Instituts für Bautechnik.

Es handelt sich um ein Forschungsprojekt der Forschungsgemeinschaft der Ziegelindustrie e.V. (FGZ). Es wurde vom Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF) und der VDZ Technology gGmbH durchgeführt. Das IGF-Vorhaben 20920 N der Forschungsvereinigung Ziegelindustrie wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.