

Der Einfluss der Wärmehärtung auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonfertigteilen

■ J. R. Mackechnie, Concrete NZ, University of Canterbury, Neuseeland
H. Beushausen, University of Cape Town, Südafrika
A. Scott und V. Shah, University of Canterbury, Neuseeland

Art und Dauer der Nachbehandlung von Betonbauteilen waren in den vergangenen Jahren ein unter Entwurfsingenieuren und Fertigteilproduzenten viel diskutiertes Thema. Zur Beschleunigung der Frühfestigkeitsentwicklung erfolgt die Nachbehandlung oft unter erhöhten Temperaturen, wobei die benötigte Dauer der Nachbehandlung in der Regel mit dem Reifeconcept bestimmt wird. Diese Art der Wärmeerhärtung wird jedoch bisweilen mit einer gröberen Porenstruktur des Betons und somit mit einer verminderten Dauerhaftigkeit in Verbindung gebracht. Die eigentliche Auswirkung der Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen kann hierbei mit dem Konzept der äquivalenten Leistungsfähigkeit beurteilt werden. In der vorliegenden Studie wurden die Einflüsse der Temperatur und der Dauer der Wärmebehandlung auf Betondauerhaftigkeitseigenschaften untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass in vielen Fällen die Nachbehandlung typischer Fertigteilbetone ohne negative Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit schon nach 24 Stunden beendet werden kann.

Der gewöhnlich auftretende Unterschied zwischen Entwurfsfestigkeit und eigentlicher Festigkeit von Betonfertigteilen sowie der Einfluss einer Nachbehandlung mit Wärme nehmen herkömmlichen Richtlinien zur Nachbehandlung ihre Relevanz, wenn es um die Fertigteilproduktion geht [1]. Die extrinsischen (Verarbeitung) und intrinsischen (materiellen) Unterschiede zwischen Ort beton und Fertigteilen können für letztere eine Verringerung der Nachbehandlungsdauer ermöglichen, ohne dass dadurch notwendigerweise die Langzeitfestigkeit oder Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigt wird. In diesem Beitrag wird untersucht, wie die benötigte Nachbehandlungsdauer entweder anhand der Reifeermittlung oder anhand der Bestimmung der gleichwertigen Dauerhaftigkeit beurteilt werden kann.

Nachbehandlung mit Wärme und Auswirkungen auf die Betoneigenschaften

Die Wärmebehandlung von Beton fördert die schnelle Hydratation von Zement und erhöht dadurch die Frühfestigkeit, führt aber auch dazu, dass sich Hydratationsprodukte in der

Nähe der Zementkornoberfläche anordnen und dadurch eine weitere Wasserzufuhr zu dem Zementkorn verringern, was im Gegenzug auch den weiteren Hydratationsgrad reduziert [2]. Dies wirkt sich auf die Porengrößenverteilung innerhalb des Betongefüges aus, das durch den verringerten Hydratationsgrad verhältnismäßig mehr mittelgroße und große Poren bildet, was potenziell zu einer verringerten Dauerhaftigkeit führen kann [3]. Hohe Ausgangstemperaturen von über 60°C können darüber hinaus die Betonmikrostruktur weiter vergrößern und dadurch den beabsichtigten Nutzen einer früheren Reife deutlich verringern [4].

Der Reifeansatz, der zur Beurteilung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer verwendet werden kann, basiert auf der Annahme, dass die Druckfestigkeit eine Beurteilung der allgemeinen Porenstruktur zulässt [5]. Jedoch erlaubt die Ermittlung der Reife keine direkte Bewertung jener Porenstruktureigenschaften, die auch die Dauerhaftigkeit beeinflussen. Dies wird in Abbildung 1 veranschaulicht, wo eine gleichwertige Reife von Betonfertigteilen im Vergleich zu einer Standard-Nasshärtung eine über Nacht andauernde Nachbehandlung bei 60°C erfordern würde (siehe auch [6]).

Einige Normen, z.B. die australische Norm AS 3600, erlauben die Verwendung der Reifemethode zur Ermittlung der benötigten Nachbehandlungsdauer, die typischerweise dann erreicht ist, wenn der Beton 80% seiner Entwurfsfestigkeit erlangt hat (z.B. 24 MPa für einen Beton mit einer Entwurfsfestigkeit von 30 MPa) [7]. In der vorliegenden Forschung wurde die Methode der gleichwertigen Dauerhaftigkeit verwendet, um den Einfluss der Wärmehärtung auf die Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons zu untersuchen.

Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden in zwei Teile unterteilt: Prüfung von hochfestem Beton, durchgeführt an der University of Cape Town (UCT) in Südafrika, und Prüfung von Beton mit mäßiger bis hoher Festigkeit an der University of Canterbury (UC) in Neuseeland. Die Experimente an der UCT zielten darauf ab, den allgemeinen Einfluss von Aushär-



■ Dr. James Mackechnie ist Education, Training and Development Manager bei Concrete New Zealand und in Christchurch, Neuseeland ansässig. Er ist außerdem Adjunct Senior Researcher an der University of Canterbury und ehemaliger Präsident der Learned Society of Concrete New Zealand. Er verfügt über dreißig Jahre Erfahrung in der Forschung und Entwicklung von Betonbaustoffen in den Bereichen Wissenschaft, Beratung und Baukonstruktion sowohl in Neuseeland als auch in Südafrika. Seine Forschungsinteressen gelten der Dauerhaftigkeit von Beton und dem Bereich Betonzusatzstoffe.
james@concretenz.org.nz



■ Prof. Dr. Hans Beushausen ist Professor für Baustoffkunde und konstruktiven Ingenieurbau und Leiter des Forschungsinstituts für Betonwerkstoffe an der Universität von Kapstadt (UCT), Südafrika. Er erwarb nach Abschluss seines Bauingenieurstudiums an der HAW Hamburg (Ende der 1990er) im Jahr 2000 seinen MSc an der UCT und promovierte dort 2005. Seine Forschungsinteressen gelten den Themen Betontechnologie, Dauerhaftigkeit und Lebensdauererhersage von Betonbauwerken sowie Betonsanierung. Seit 2004 ist er Redakteur für die BWI.
Hans.beushausen@uct.ac.za



■ Vineet Shah ist Postdoktorand am Department of Civil & Natural Resources Engineering der University of Canterbury in Neuseeland. 2018 promovierte er im Fachbereich Bauingenieurwesen am IIT Delhi, Indien. Sein Hauptforschungsgebiet umfasst die Charakterisierung und Hydratation von kohlenstoffarmen Bindemitteln sowie das Verständnis des Einflusses des Bindemitteltyps auf die langfristige Dauerhaftigkeit von Beton unter Einfluss der Karbonatisierung.
vineet.shah@canterbury.ac.nz



■ Allan Scott ist Associate Professor of Civil Engineering in Sustainable Materials an der University of Canterbury, Neuseeland. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Entwicklung nachhaltiger Baustoffe (wie Magnesiumsilikat-Bindemittelsysteme), die Bestimmung der verbleibenden konstruktiven Leistungsfähigkeit und der Abbauprozesse in korrodierten und seismisch beschädigten Stahlbetonkonstruktionen sowie Möglichkeiten zur Ressourcennutzung vor Ort (in situ resource utilization, ISRU) für außerirdische Baustoffe.
allan.scott@canterbury.ac.nz

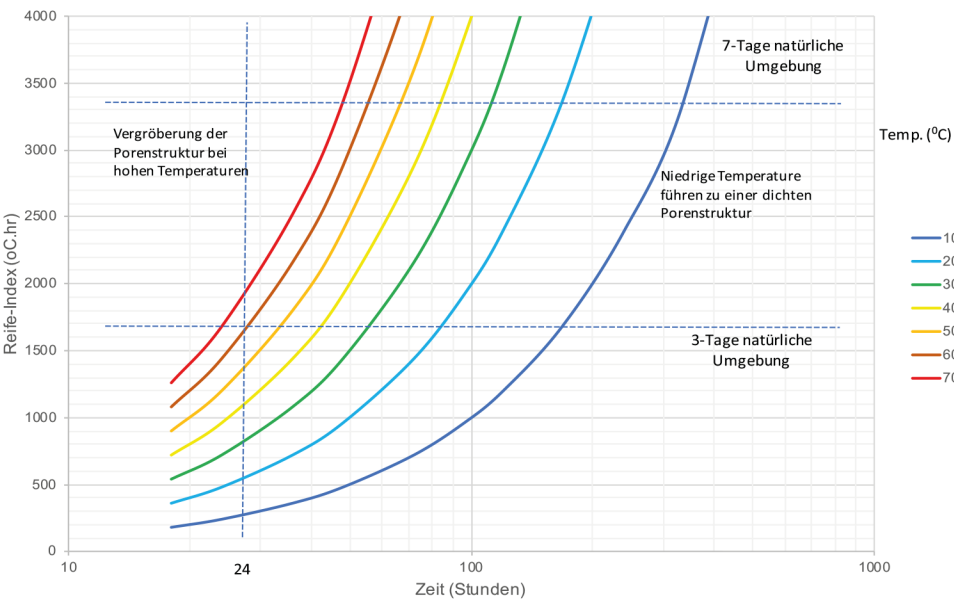


Abb. 1: Verhältnis zwischen Reifeindex und Betonhärtungstemperatur (basierend auf [6])

tungstemperaturen auf die Betonmikrostruktur zu untersuchen. Die Experimente an der UC zielten darauf ab, die Leistung typischer Ortbetone mit denen von Betonfertigteilen zu vergleichen, um die damit verbundenen Konstruktionsanforderungen zu bewerten.

In beiden Untersuchungen wurden zwei verschiedene Zementtypen verwendet, die in Neuseeland hergestellt wurden: ein Allzweck-CEM I (GP) und ein für die Fertigteilherstellung typischer hochfester Zement (HE). Die verwendeten Betonzusatzmittel und deren Zugabemenge entsprachen der in der jeweiligen Fertigteilindustrie gängigen Praxis [8].

Hochfester Beton für die Fertigteilproduktion

Die experimentellen Untersuchungen an der UCT wurden mit zwei Betonmischungsentwürfen unter Verwendung der in Tabelle 1 dargestellten Zusammensetzung durchgeführt. Der Grobzuschlag bestand aus Grauwacke und als Feinzuschlag wurde eine ortsübliche Mischung (50/50) aus natürlichem Dünen sand und gebrochener Grauwacke verwendet.

Die Prüfung der Betone umfasste die Ermittlung der Druckfestigkeitsentwicklung (gemessen an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge) und die Bestimmung der Dauerhaftigkeitseigenschaften nach der südafrikanischen Methode zur Sauerstoffdurchlässigkeit [9 - 11]. Der Sauerstoffdurchlässigkeitsindex (Oxygen Permeability Index, OPI) ermöglicht eine praktische und zuverlässige Bewertung der Betonporenstruktur und Porenkonnektivität und wird in Südafrika für Entwurf und Qualitätskontrolle von Betonbauwerken in den Expositionsklassen XC (Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung) eingesetzt. Insbesondere lassen sich mit dieser Testmethode sehr zuverlässig die Einflüsse der Mischungszusammensetzung, Verdichtung und Nachbehandlungsbedingungen auf die Mikrostruktur des Betons ermitteln.

Die Betonwürfel wurden unter fünf verschiedenen Nachbehandlungsbedingungen, wie unten aufgeführt, ausgehärtet.

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung hochfester Beton

Bestandteil / Eigenschaft	kg/m ³
Portlandzement (GP oder HE)	381
Wasser	160
Sand (50/50 dune / crusher dust)	801
Zuschlag (19 mm)	1050
SP SikaViscoCrete -90 HE (ml)	1524
Acc SikaRapid -2 (ml)	2960
w/z-Wert	0,42

Tabelle 2: Mischungszusammensetzungen, Fertigteilbeton und Ortbeton (Referenz) (kg/m³)

Bestandteil / Eigenschaft	GP30 Referenz	GP35 Referenz	GP40 Referenz	HE40 Referenz	GP45 Referenz	HE45 Referenz
Portlandzement	265 GP	300 GP	360 GP	360 HE	380 GP	380 HE
Wasser	162	165	165	158	165	158
Sand	885	875	875	885	860	870
Grobzuschlag	1100	1050	1050	1050	1050	1050
Wasserreduzierer (ml)	1080	1500	1800	0	1900	0
Luftporenbildner (ml)	100	0	0	0	0	0
Fließmittel (ml)	0	0	0	1900	0	2000
w/z-Wert	0,61	0,55	0,46	0,43	0,43	0,41
f _c , 28-Tage (MPa)	33,4	42,3	50,9	58,5	56,2	72,6

Die Wärmehärtung erfolgte wie folgt: Nach dem Gießen die Prüfkörper für 4 Stunden stehen lassen und mit Plastikfolie gegen Wasserverlust versiegeln, Formen bei Raumtemperatur in einen Ofen stellen und die Temperatur über einen Zeitraum von 2 Stunden auf den erforderlichen Wert ansteigen lassen, Prüfkörper 18 Stunden lang der Aushärtungstemperatur aussetzen und anschließend entschalen, Lagerung bei 23°C und 50% Luftfeuchte bis zum Erreichen des Prüfalters von 28 Tagen.

- Nachbehandlung bei normaler Umgebungstemperatur (23 °C, 50% Luftfeuchte)
- Wasserlagerung (28 Tage)
- Wärmebehandlung bei 40°C
- Wärmebehandlung bei 55°C
- Wärmebehandlung bei 70°C

Mischungen mit mäßiger bis hoher Festigkeit

Die an der University of Canterbury verwendeten Mischungszusammensetzungen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Experimentelle Untersuchungen wurden mit zwei Referenzmischungen und vier Betonfertigteilmischungen durchgeführt. Der Referenzbeton wurde entsprechend der bei Ortbeton gängigen Bedingungen anfangs einer Temperatur von 21° C ausgesetzt, bevor er entweder drei oder sieben Tage lang nass nachbehandelt wurde. Ähnlich wie oben beschrieben wurden die Fertigteilmischungen zunächst vier Stunden lang bei 21° C gelagert. In der Folge stieg über einen Zeitraum von zwei Stunden die Temperatur, bevor die Prüfkörper entweder 21, 30, 40 oder 50° C ausgesetzt wurden; weitere 18 Stunden danach wurden die zylindrischen Prüfkörper entschalt und die Testoberfläche der Trocknung ausgesetzt (21° C und 60 % Luftfeuchte).

Die Karbonatisierungs- und Chloridbeständigkeit des Betons wurden nach 28 Tagen Aushärtezeit anhand von Prüfungen bei beschleunigter Karbonatisierung und durch den Chlorid-Migrationstest (NT Build 492) [12 - 14] bewertet.

Die experimentellen Untersuchungen umfassten folgende Prüfmethode:

- Druckfestigkeit (1, 7 und 28 Tage).
- Chlorid-Migrationstests wurden gemäß NT Build 492 durchgeführt, wobei nach 24-stündiger Auftragung eines 30V-Potentialunterschiedes die resultierende Chloridmigration gemessen wird [13].
- Die beschleunigte Karbonatisierung wurde gemäß ISO 1920 ermittelt, wobei die Betonprüfkörper für einen Zeitraum von 56 Tagen einer erhöhten Kohlendioxidkonzentration (2,5%) ausgesetzt werden [14].

Untersuchungsergebnisse

Der Einfluss der Wärmehärtung auf die Druckfestigkeitsentwicklung

Der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Druckfestigkeitsentwicklung wird in den Abbildungen 2 und 3 (einschließlich Fehlerbalken für Standardabweichung) anhand der an der UCT erzielten Ergebnisse veranschaulicht. Die Wärme-

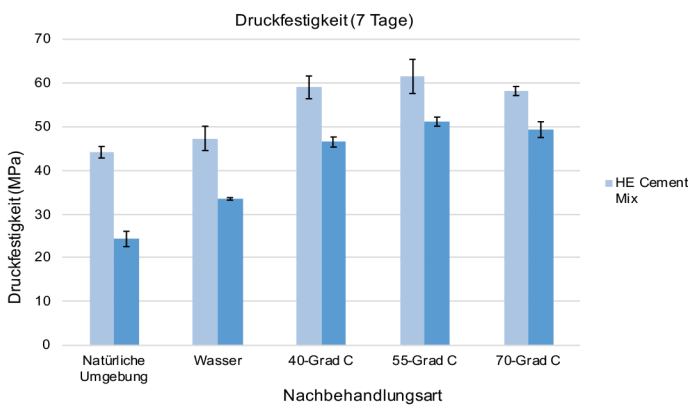


Abb. 2: Einfluss der Ausgangsnachbehandlungstemperatur auf die 24-Stunden-Druckfestigkeit

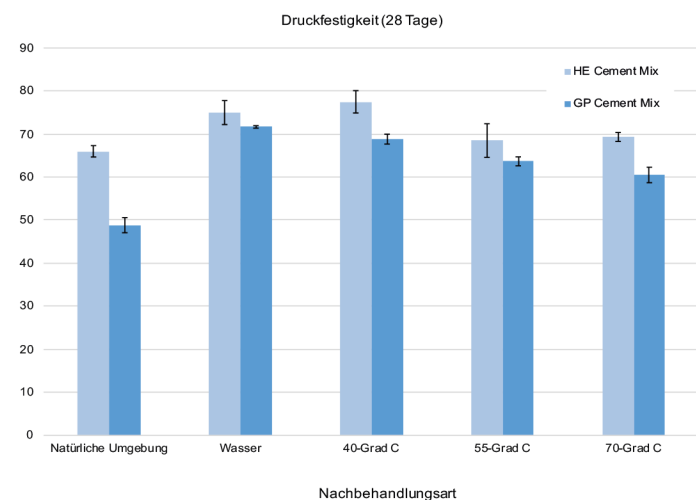


Abb. 3: Einfluss der Ausgangsnachbehandlungstemperatur auf die 28-Tage-Druckfestigkeit

härtung führt erwartungsgemäß vor allem in einem frühen Alter zu zunächst höheren Festigkeiten, wobei die Werte am ersten Tag nach der Herstellung im Vergleich zu Beton, der im Wasser oder unter Umgebungsbedingungen ausgehärtet wird, deutlich höher sind. Nach einer Dauer von 28 Tagen war die Druckfestigkeit von wärmegehärteten Prüfkörpern immer noch höher als die der unter Umgebungsbedingungen ausgehärteten Prüfkörper, insbesondere für den mit Allzweckzement (GP) produzierten Beton. Insgesamt wurde in dieser Studie kein signifikanter negativer Effekt der Wärmehärtung auf die Druckfestigkeit im späteren Alter beobachtet.

Permeabilitätskoeffizient

Die Testergebnisse für die Sauerstoffdurchlässigkeit sind in Abbildung 4 dargestellt. Ein niedrigerer Wert weist auf einen Beton mit höherer Dauerhaftigkeit hin. Insgesamt hatte die Wärmehärtung unabhängig vom Zementtyp keinen negativen Einfluss auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften der untersuchten Mischungszusammensetzungen. Bei allen Aushär-

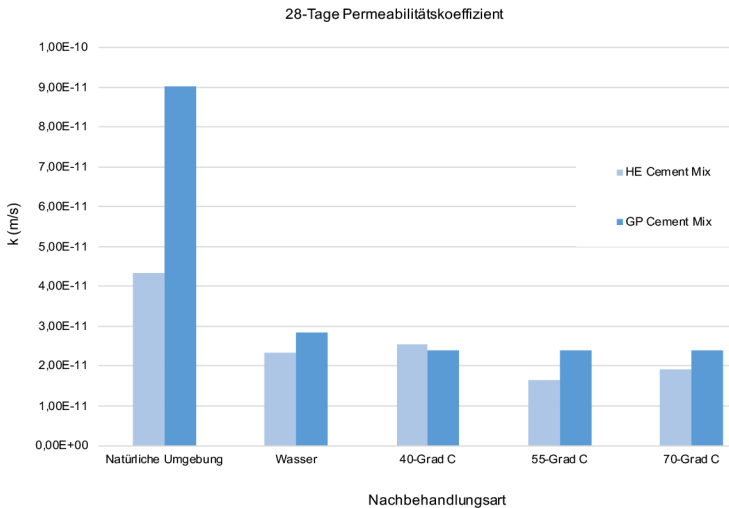


Abb. 4: Einfluss der Ausgangsnachbehandlungstemperatur auf den Permeabilitätskoeffizienten

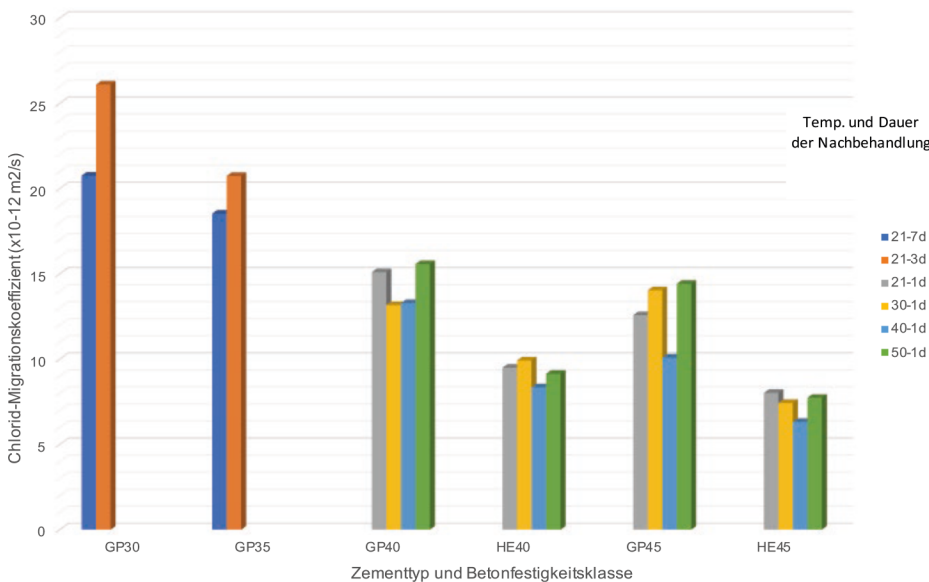


Abb. 5: Chlorid-Migrationskoeffizienten, gemessen nach 28 Tagen Aushärtezeit

tungstemperaturen entsprach der Permeabilitätskoeffizient den Werten, die an vollständig wassergelagerten Prüfkörpern gemessen wurden und war deutlich niedriger als der des Betons, der unter simulierten Umgebungsbedingungen ausgehärtet worden war.

Chloridbeständigkeit

Die an der University of Canterbury durchgeführte Prüfung der Chloridbeständigkeit von Beton der Festigkeitsklassen 30 und 35 MPa zeigte auch nach einer Nasslagerung von drei oder sieben Tagen relativ schlechte Werte (Abb. 5). Die aus den Testwerten ermittelten Chlorid-Migrationskoeffizienten lagen hierbei über $18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, während der Fertigteilbeton eine moderate bis gute Chloridresistenz mit Diffusionskoeffizienten zwischen $6\text{-}15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ aufwies. Die optimale Ausgangsnachbehandlungstemperatur lag bei etwa 40°C , wobei höhere Diffusionskoeffizienten gemessen wurden, wenn die Temperatur auf 50°C erhöht wurde. Eine ähnliche Auswirkung der Wärmebehandlung wurde bereits von anderen Forschern beschrieben [15, 16]. Im Allgemeinen hatte Beton, der HE-Zement enthält, niedrigere Migrationskoeffizienten als ähnlicher Beton aus GP-Zement.

Beschleunigte Karbonatisierung

Die beschleunigte Karbonatisierung wurde gemäß ISO 1920 ermittelt, wobei Betonproben im Alter von 28 Tagen 2,5% Kohlendioxid ausgesetzt wurden. Die Karbonatisierungstiefe wurde nach 56 Tagen Exposition in der Karbonatisierungskammer bestimmt (Abb. 6). Die Ergebnisse zeigen, dass Fertigteilbetonmischungen auch ohne aktive Nasshärtung im Vergleich zum Referenzbeton eine ähnliche oder geringere Karbonatisierungstiefe und somit eine bessere Dauerhaftigkeit aufweisen. Die Karbonatisierungstiefen verringerten sich auch mit erhöhter Reife, die durch die Erwärmung des Betons induziert wurde (höhere Ausgangshärtungstemperaturen führten zu einer verbesserten Karbonatisierungsbeständigkeit).

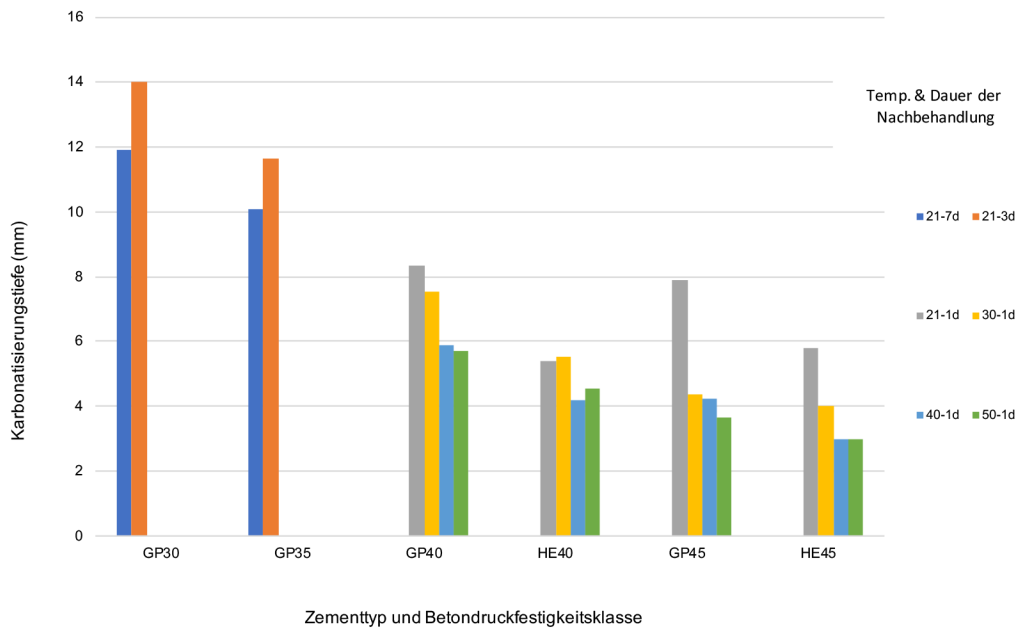


Abb. 6: Testergebnisse der beschleunigten Karbonatisierung nach 56 Tagen Exposition

Diskussion

Für die Ermittlung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer bietet die einfache Betrachtung der Reife des Betons bei hohen Aushärtetemperaturen nur ein unzulängliches

Bild und ist in der Regel nur für Temperaturen unter 50°C anwendbar. Darüber hinaus ist die Einschätzung der Betondauerhaftigkeit anhand der Druckfestigkeit irreführend, was vor allem für Betone zutrifft, die mit Bindemitteln langsamer Reaktivität produziert werden, z.B. Beton mit Flugasche.

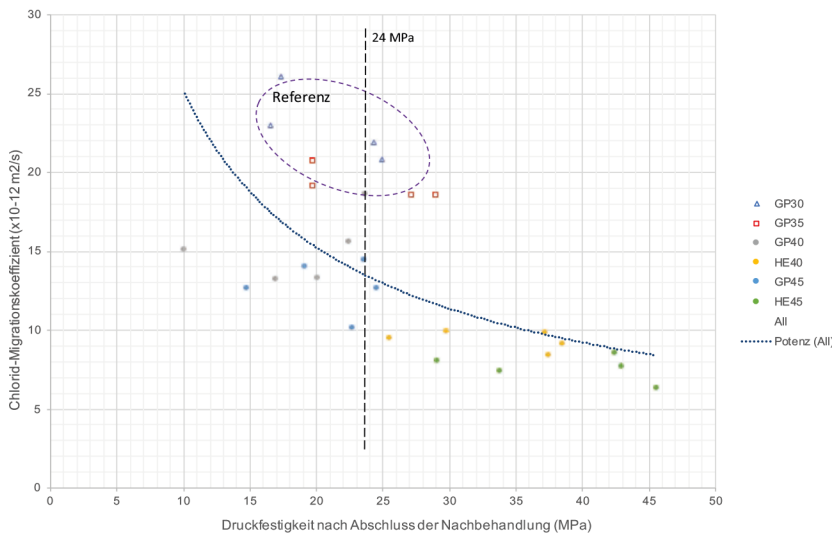
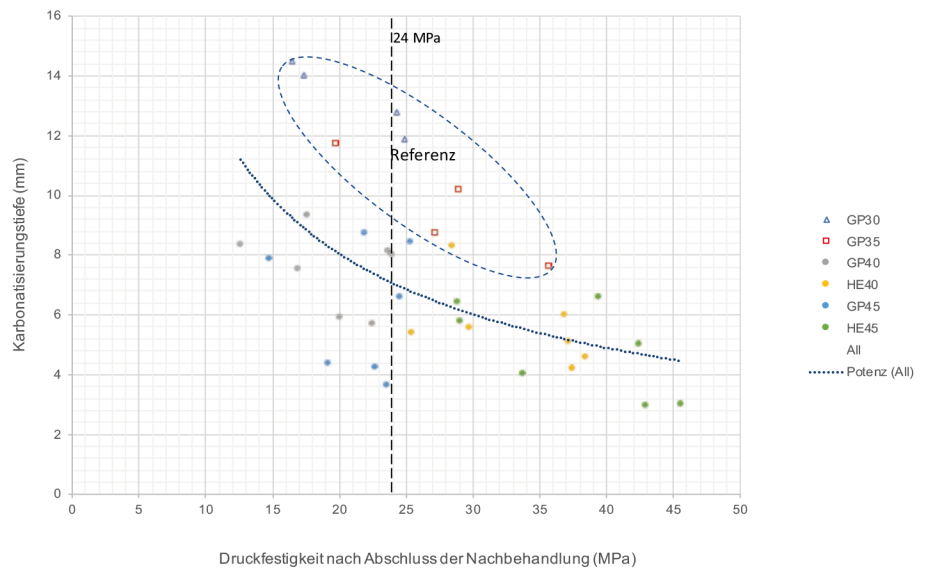


Abb. 7: Vergleich der Druckfestigkeit nach Abschluss der jeweiligen Nachbehandlung mit dem 28-Tage-Chlorid-Migrationskoeffizienten

Abb. 8: Vergleich der Druckfestigkeit (nach Abschluss der jeweiligen Nachbehandlung) mit der Karbonatisierungstiefe



Dies zeigt sich in Abbildung 7, wo die Druckfestigkeit nach Abschluss der jeweiligen Nachbehandlung mit dem 28-Tage-Chlorid-Migrationskoeffizienten verglichen wird. Während der für 24 Stunden nachbehandelte Fertigteilbeton einen angemessenen Bezug zur Reife zeigte (z. B. mäßige bis gute Chloridresistenz bei einer Festigkeit von mehr als 24 MPa), wiesen Referenzbetone in einigen Fällen zwar Festigkeiten von über 24 MPa auf, hatten aber dennoch niedrige Werte für die Chloridresistenz.

In ähnlicher Weise bietet die Verwendung des Reifeindex-Ansatzes keine zuverlässige Grundlage für die Vorhersage der Karbonatisierungsresistenz, was vor allem für Referenzbetone mit einer moderaten Festigkeit von etwa 30 MPa beobachtet wurde. Dies ist in Abbildung 8 dargestellt - der Referenzbeton mit niedrigerer Festigkeit wies im Vergleich zum Fertigteilbeton bei der Prüfung nach ISO 1920 konstant höhere Karbonatisierungstiefen auf.

Empfehlungen

Wenn Betonfertigteilproduzenten aufgrund der erforderlichen Frühfestigkeiten einen Beton einsetzen, der eine hö-

here als die im konstruktiven Entwurf geforderte Festigkeit aufweist, ermöglicht dies nicht nur eine frühzeitige Handhabung, sondern erzeugt in der Regel auch ein höheres Dauerhaftigkeitspotenzial. Diese Verbesserung der Qualität der Mikrostruktur des Betons zeigt sich auch dann, wenn die anfängliche Aushärtung ohne aktive Feuchtebehandlung erfolgt. Um die damit verbundenen Vorteile in der Produktion auszunutzen, sollte eine Methode zur Qualitätskontrolle entwickelt werden, anhand derer sich Mischungszusammensetzungen und Produktionsmethoden optimieren lassen. Eine praktische Möglichkeit besteht hierbei in der Verwendung leistungsbasierter Prüfmethode im Zusammenhang mit Dauerhaftigkeitsindikatoren.

Die Erfahrung mit der Lieferung von Betonfertigteilen legt nahe, dass Fertigteile oft aus Beton hergestellt werden, der eine um zwei Grad höhere Festigkeit hat als angegeben (z. B. Klasse 40 MPa für 30 MPa oder 45 MPa für 35 MPa). Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass dieser Ansatz in der Regel eine ausreichende Dauerhaftigkeit gewährt, auch wenn die Betonfertigteile keiner aktiven Nachbehandlung mit Feuchte ausgesetzt werden.

Im Allgemeinen sollten die Entwurfsingenieure und Produzenten von Betonfertigteilen die zu erwartende höhere Festigkeit und die damit verbundene bessere Dauerhaftigkeit im Vergleich zu Ortbeton in ihrer konstruktiven und konzeptionellen Gestaltung der Bauteile berücksichtigen.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass der Reifeindex-Ansatz bei der Abschätzung der benötigten Nachbehandlungsdauer für Beton mit moderater Festigkeit nur einen geringen Nutzen bietet. Dies zeigte sich beim Vergleich der Leistung von HE-Zement im Vergleich zu GP-Zement und auch bei der Analyse mikrostruktureller Veränderungen, die bei hohen Aushärtungstemperaturen auftreten. Einfache Reifeberechnungen bieten bei hohen Aushärtungstemperaturen, typischerweise über 50-60°C, und bei unterschiedlichen Betontypen oft keine zuverlässige Basis zur Beurteilung der Dauerhaftigkeitseigenschaften.

Die Qualität der Betonüberdeckung kann durch die Temperatur und Dauer der im Fertigteilwerk angesetzten Nachbehandlung beeinflusst werden. Dieser Effekt kann mit der Umsetzung eines geeigneten experimentellen Qualitätskontrollprogramms auf Basis der Messung einfacher Dauerhaftigkeitsindikatoren gesteuert und bewertet werden.

Danksagung

Die University of Canterbury würdigt die Finanzierung durch den Precast Sector of Concrete New Zealand, die den Kauf der Karbonatisierungskammer ermöglichte. ■

Literatur

- [1] American Society for Testing and Materials, ASTM C1074 - Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method, ASTM, 2017.
- [2] Verbeck, J.G. and Helmuth, R.H., 'Structures and physical properties of cement paste', Proc. 5th Int. Cong. Chem. Cem. Tokyo, (1968).
- [3] Reinhardt, R.-W. and Stegmaier, M., 'Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC', Cement and Concrete Research, 36 (2006) 879-885.
- [4] Detwiler, R.J., Fapohunda, C.A. and Natale, J., 'Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride ion penetration of concretes cured at elevated temperatures', ACI Mater. J. 91 (1994), 63-66.
- [5] Ballim, Y. and Graham, P.C., 'A maturity approach to the rate of heat evolution in concretes', Mag. Conc. Res., 55 (2003) 249-256.
- [6] Mackechnie, J., Scott, A. (2019), 'Time to cessation of curing of concrete using the maturity method or by equivalent durability testing', Concrete NZ Conference, 2019.
- [7] Standards Australia, AS 3600:2018 - Concrete structures standard, 2018, Canberra, Australia.
- [8] Mackechnie, J., Scott, A., Beushausen, H., Shah, V. (2021), 'Time to Cessation of Curing for Precast Concrete Based on Equivalent Durability Performance', SESOC Journal - Structural Engineering Society of New Zealand, Vol. 34, April 2021, pp. 66 - 73.
- [9] Nganga, G., Alexander, M.G., Beushausen, H., 'Practical Implementation of the Durability Index performance-based design approach', Construction and Building Materials, Vol 45, August 2013, pp. 251-261, 2013.
- [10] South African Bureau of Standards (SABS). South African National Standard (SANS): Civil engineering test methods Part CO3-1: Concrete durability index testing - Preparation of test specimens (SANS 3001-CO3:2015). Pretoria. SABS Standards Division, 2015.
- [11] South African Bureau of Standards (SABS). South African National Standard (SANS): Civil engineering test methods Part CO3-2: Concrete durability index testing - Oxygen permeability test (SANS 3001-CO3-2:2015). Pretoria. SABS Standards Division, 2015.
- [12] Alexander, M.G. and Beushausen, H. (2019), 'Durability, service life and modelling for reinforced concrete structures - review and critique', Cement and Concrete Research, 122, 17-29.
- [13] Nordtest Method, NT Build 492 - Chloride migration coefficients from non-steady-state migration experiments, 1999, Finland.
- [14] International Standards Organization, ISO 1920-12: Determination of the carbonation resistance of concrete - accelerated carbonation method, Geneva, 2015.
- [15] Wang, Q., Shi, M., Wang, D., 'Influence of elevated curing temperature on the properties of cement paste and concrete at the same hydration degree', Wuhan Univ. of Tech. (2017) 1344-1351.
- [16] Garcia Calvo, J.L., Alonso, M.C., Fernandez Luco, L., Robles Velasco, M., 'Durability performance of sustainable self-compacting concretes in precast products due to heat curing', Constr. Build. Mater. 111, (2016) 379-385.