

# Wpływ pielęgnacji cieplnej na właściwości determinujące trwałość prefabrykatów betonowych

■ J. R. Mackechnie, Concrete NZ, Uniwersytet Canterbury, Nowa Zelandia  
H. Beushausen, Uniwersytet w Kapsztadzie, RPA  
A. Scott i V. Shah, Uniwersytet Canterbury, Nowa Zelandia

**Rodzaj i czas pielęgnacji elementów betonowych jest w ostatnich latach szeroko dyskutowanym tematem wśród inżynierów projektantów i producentów prefabrykatów. W celu przyspieszenia wzrostu wczesnej wytrzymałości pielęgnację elementów betonowych często przeprowadza się w podwyższonych temperaturach, przy czym wymagany czas trwania obróbki cieplnej określa się zazwyczaj na podstawie koncepcji dojrzałości. Jednakże, obróbka cieplna betonu niekiedy prowadzi do większej porowatości betonu, a tym samym do mniejszej jego trwałości. Rzeczywisty wpływ pielęgnacji betonu na trwałość elementów betonowych może być tutaj oceniany za pomocą koncepcji ekwiwalentnych właściwości użytkowych. W niniejszej pracy zbadano wpływ temperatury i czasu trwania obróbki cieplnej na właściwości determinujące trwałość betonu. Wyniki badań pokazują, że w wielu przypadkach pielęgnacja cieplna typowych betonów wykorzystywanych do produkcji prefabrykatów może być zakończona po 24 godzinach bez negatywnego wpływu na trwałość.**

Powszechnie występująca różnica pomiędzy wytrzymałością projektowaną a rzeczywistą prefabrykatów betonowych, jak również wpływ pielęgnacji cieplnej, odbierają znaczenie konwencjonalnym wytycznym dotyczącym pielęgnacji betonu w przypadku produkcji prefabrykatów [1]. Zewnętrzne (sposób przetwarzania) i wewnętrzne (materiał) różnice pomiędzy betonem wylewanym na placu budowy i prefabrykowanym mogą pozwolić na skrócenie czasu pielęgnacji dla tego ostatniego, niekoniecznie z uszczerbkiem dla długoterminowej wytrzymałości lub trwałości betonu. W niniejszym artykule przeanalizowano, w jaki sposób można określić wymagany czas pielęgnacji betonu, stosując metodę oznaczania dojrzałości lub wyznaczając równoważną jej trwałość.

## Pielęgnacja cieplna i jej wpływ na właściwości betonu

Obróbka cieplna betonu sprzyja szybkiej hydratacji cementu, zwiększając tym samym jego wczesną wytrzymałość, ale powoduje też, że produkty hydratacji układają się przy powierzchni ziaren cementu, ograniczając tym samym dalszy

dopływ wody do nich, co z kolei zmniejsza dalszy stopień hydratacji [2]. Wpływa to na rozkład wielkości porów w strukturze betonu, w której ze względu na zmniejszony stopień hydratacji tworzy się proporcjonalnie więcej średnich i dużych porów, co potencjalnie może prowadzić do zmniejszenia trwałości [3]. Wysokie temperatury początkowe powyżej 60°C mogą jeszcze bardziej zwiększyć udział dużych porów w mikrostrukturze betonu, znacznie zmniejszając zamierzone korzyści wynikające z wcześniejszego dojrzewania [4].

Podjęcie bazujące na dojrzałości, które może być stosowane do oceny wymaganego czasu pielęgnacji, opiera się na założeniu, że wytrzymałość na ściskanie pozwala na ocenę ogólnej struktury porów [5]. Określenie dojrzałości nie pozwala jednak na bezpośrednią ocenę tych właściwości struktury porów, które wpływają na trwałość. Ilustruje to rysunek 1, gdzie równoważna dojrzałość prefabrykatów betonowych w porównaniu do standardowego twardnienia w środowisku mokrym wymagałaby pielęgnacji przez całą noc w temperaturze 60°C (por. też [6]).

Niektóre normy, np. norma australijska AS 3600, dopuszczają stosowanie metody dojrzałości w celu określenia wymaganego czasu pielęgnacji, który zazwyczaj jest liczony do momentu, gdy beton osiągnie 80% projektowanej wytrzymałości (np. 24 MPa dla betonu o projektowanej wytrzymałości 30 MPa) [7]. W niniejszych badaniach wykorzystano metodę równoważnej trwałości do zbadania wpływu pielęgnacji cieplnej na właściwości determinujące wytrzymałość i trwałość betonu.

## Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne zostały podzielone na dwie części: badania betonu o wysokiej wytrzymałości przeprowadzono na Uniwersytecie w Kapsztadzie (UCT) w RPA, a badania betonu o średniej do wysokiej wytrzymałości na Uniwersytecie Canterbury (UC) w Nowej Zelandii. Doświadczenia przeprowadzone na UCT miały na celu zbadanie ogólnego wpływu temperatury dojrzewania na mikrostrukturę betonu. Doświadczenia przeprowadzone na UC miały na celu porównanie parametrów



■ Dr James Mackechnie jest kierownikiem ds. edukacji, szkoleń i rozwoju w firmie Concrete New Zealand i pracuje w Christchurch w Nowej Zelandii. Poza tym jest adiunktem na Uniwersytecie Canterbury i dawnym przewodniczącym Learned Society of Concrete New Zealand. Ma ponad trzydziestoletnie doświadczenie w badaniach i rozwoju betonowych materiałów budowlanych w obszarze nauki, doradztwa i konstrukcji budowlanych zarówno w Nowej Zelandii, jak i w RPA. Jego zainteresowania badawcze dotyczą trwałości betonu oraz obszaru domieszek do betonu.  
james@concretenz.org.nz



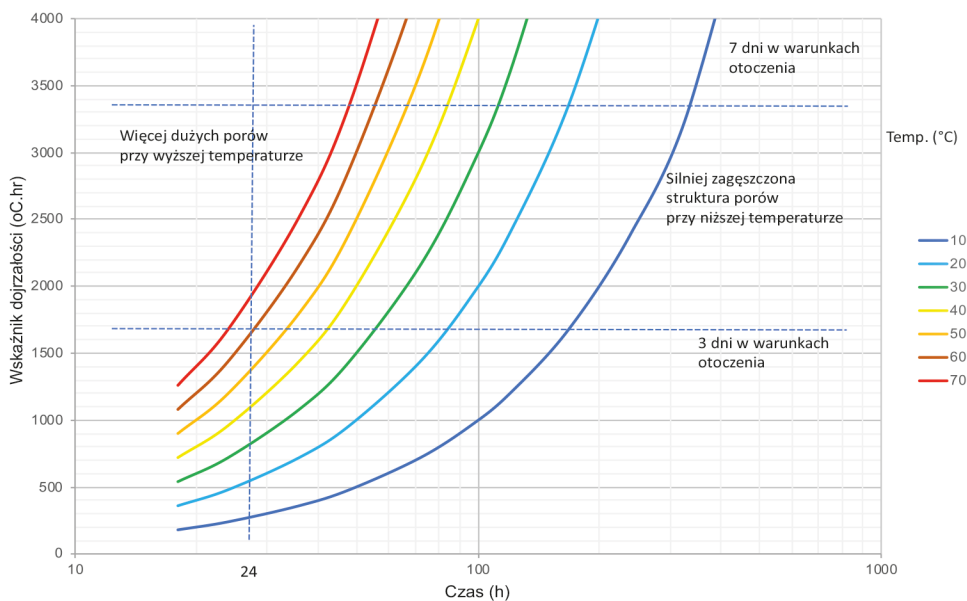
■ Prof. dr Hans Beushausen jest profesorem materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich oraz dyrektorem Instytutu Badań Materiałów Betonowych na Uniwersytecie w Kapsztadzie (UCT) w RPA. Po ukończeniu studiów inżynierii lądowej w HAW Hamburg (koniec lat 90.), uzyskał na UCT tytuł magistra w 2000 r. oraz stopień naukowy doktora w 2005 r. Jego zainteresowania badawcze obejmują technologię betonu, trwałość i prognozowanie okresu użytkowania konstrukcji betonowych oraz renowację betonu. Od 2004 r. jest redaktorem ZBI.  
Hans.beushausen@uct.ac.za



■ Vineet Shah jest post-doktorantem na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Zasobów Naturalnych Uniwersytetu Canterbury w Nowej Zelandii. W 2018 r. ukończył studia doktoranckie z zakresu inżynierii lądowej na IIT Delhi w Indiach. Jego główny obszar badań obejmuje charakterystykę i hydratację spoiw niskowęglowych oraz zrozumienie wpływu rodzaju spoiwa na długoterminową trwałość betonu pod wpływem karbonatyzacji.  
vineet.shah@canterbury.ac.nz



■ Allan Scott jest profesorem nadzwyczajnym budownictwa w specjalności zrównoważonych materiałów budowlanych na Uniwersytecie Canterbury w Nowej Zelandii. Jego zainteresowania badawcze obejmują rozwój zrównoważonych materiałów budowlanych (takich jak systemy spoiw magnezowo-krzemianowych), określanie resztkowej nośności konstrukcji, procesy degradacji w skorodowanych i sejsmicznie uszkodzonych konstrukcjach żelbetowych oraz możliwości wykorzystania zasobów dostępnych na miejscu.  
allan.scott@canterbury.ac.nz



### 1. Zależność pomiędzy wskaźnikiem dojrzałości a temperaturą dojrzewania betonu (na podstawie [6]).

użytkowych typowego betonu wylewanego na placu budowy z parametrami prefabrykatów betonowych w celu oceny związanych z nimi wymagań projektowych. W obu badaniach wykorzystano dwa różne rodzaje cementu produkowanego w Nowej Zelandii: cement ogólnego przeznaczenia CEM I (GP) oraz cement o wysokiej wytrzymałości (HE) typowy dla produkcji prefabrykatów. Zastosowane domieszki do betonu i ich ilości były zgodne z powszechną praktyką stosowaną w przemyśle prefabrykacji betonu [8].

## Beton wysokowytrzymały do produkcji prefabrykatów

Badania eksperymentalne na UCT przeprowadzono z użyciem dwóch receptur mieszanek betonowych o składzie podanym w tabeli 1. Jako kruszywo gruboziarniste zastosowano szarogłaz, a jako kruszywo drobnoziarniste lokalną mieszankę (50/50) naturalnego piasku wydumowego i kruszonego szarogłazu.

Badania betonów obejmowały określenie przyrostu wytrzymałości na ściskanie (mierzonej na próbkach sześciennych o długości krawędzi 100 mm) oraz określenie właściwości determinujących trwałość według południowoafrykańskiej metody badania przepuszczalności tlenu [9 - 11]. Wskaźnik przepuszczalności tlenu (Oxygen Permeability Index, OPI) umożliwia praktyczną i niezawodną ocenę struktury porów betonu oraz ich łączliwości i jest stosowany w RPA do projektowania i kontroli jakości konstrukcji betonowych w klasach ekspozycji XC (korozja zbrojenia spowodowana karbonatyzacją). Ta metoda badawcza pozwala przede wszystkim na bardzo niezawodne określenie wpływu składu mieszanki, zagęszczenia i warunków pielęgnacji betonu na jego mikrostrukturę.

Betonowe próbki sześciennie dojrzewały w pięciu różnych warunkach pielęgnacji, jak podano poniżej. Dojrzewanie

Tabela 1: Skład mieszanki betonu wysokowytrzymałego.

Składnik / właściwość	kg/m <sup>3</sup>
Cement portlandzki (GP albo HE)	381
Woda	160
Piasek (50/50 wydumowy / kruszony szarogłaz)	801
Kruszywo (19 mm)	1 050
SP SikaViscoCrete - 90 HE (ml)	1 524
Acc SikaRapid - 2 (ml)	2 960
Współczynnik w/c	0,42

Tabela 2: Składy mieszanek betonowych, prefabrykaty i beton towarowy (referencyjny) (kg/m<sup>3</sup>).

Składnik / właściwość	GP30 Próbka referencyjna	GP35 Próbka referencyjna	GP40 Prefabrykat	HE40 Prefabrykat	GP45 Prefabrykat	HE45 Prefabrykat
Cement portlandzki	265 GP	300 GP	360 GP	360 HE	380 GP	380 HE
Woda	162	165	165	158	165	158
Piasek	885	875	875	885	860	870
Kruszywo gruboziarniste	1100	1050	1050	1050	1050	1050
Domieszka zmniejszająca zawartość wody (ml)	1080	1500	1800	0	1900	0
Domieszka napowietrzająca (ml)	100	0	0	0	0	0
Superplastyfikator (ml)	0	0	0	1900	0	2000
Współczynnik w/c	0,61	0,55	0,46	0,43	0,43	0,41
f <sub>c</sub> , 28 dni (MPa)	33,4	42,3	50,9	58,5	56,2	72,6

betonu przebiegało następująco: po wyprodukowaniu pozostawić próbki na 4 godziny i zabezpieczyć folią przed utratą wody - umieścić formy w suszarce w temperaturze pokojowej i pozwolić, aby temperatura wzrosła do wymaganej wartości w ciągu 2 godzin - wystawić próbki na działanie temperatury docelowej przez 18 godzin, a następnie rozformować - przechowywać próbki w temperaturze 23°C i wilgotności 50% aż do momentu badania po 28 dniach.

- Pielęgnacja w normalnej temperaturze otoczenia (23°C, wilgotność powietrza 50%)
- Przechowywanie w wodzie (28 dni)
- Pielęgnacja cieplna w temperaturze 40°C
- Pielęgnacja cieplna w temperaturze 55°C
- Pielęgnacja cieplna w temperaturze 70°C

## Mieszanki o średniej do wysokiej wytrzymałości

Składy mieszanek badanych na Uniwersytecie Canterbury są wymienione w tabeli 2. Badania doświadczalne przeprowadzono na dwóch mieszankach referencyjnych i czterech mieszankach betonu używanego do produkcji prefabrykatów betonowych. Beton referencyjny był początkowo wystawiony na działanie temperatury 21°C, zgodnie z warunkami typowymi dla betonu towarowego, a następnie był trzy lub siedem dni pielęgnowany wodą. Podobnie jak opisano wcześniej, prefabrykaty przechowywano najpierw przez cztery godziny w temperaturze 21°C. Następnie, w ciągu dwóch godzin temperatura wzrastała, zanim próbki zostały poddane działaniu temperatury 21, 30, 40 lub 50°C; 18 godzin później cylindryczne próbki zostały rozformowane, a badana powierzchnia poddana suszeniu (21°C i wilgotność powietrza 60%).

Odporność betonu na karbonatyzację i chlorki oceniano po 28 dniach dojrzewania stosując badania przyspieszonej karbonatyzacji oraz test migracji chlorków (NT Build 492) [12 - 14].

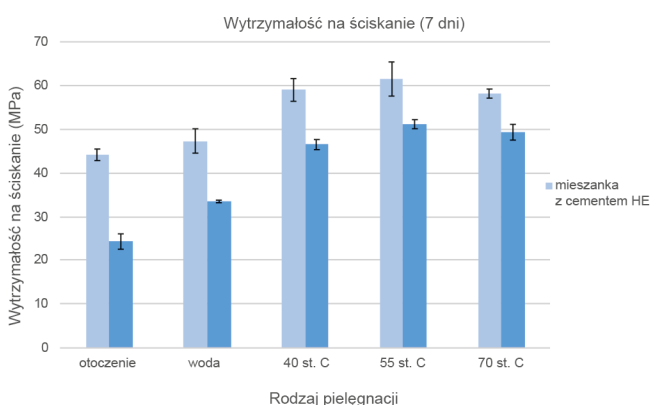
Badania eksperymentalne obejmowały następujące metody badawcze:

- Wytrzymałość na ściskanie (1, 7 i 28 dni).
- Testy migracji chlorków przeprowadzono zgodnie z NT Build 492, w której pomiar migracji chlorków następuje po przyłożeniu różnicy potencjałów 30V na 24 godziny [13].
- Przyspieszoną karbonatyzację określono zgodnie z normą ISO 1920, poddając próbki betonu działaniu podwyższonego stężenia dwutlenku węgla (2,5%) przez okres 56 dni [14].

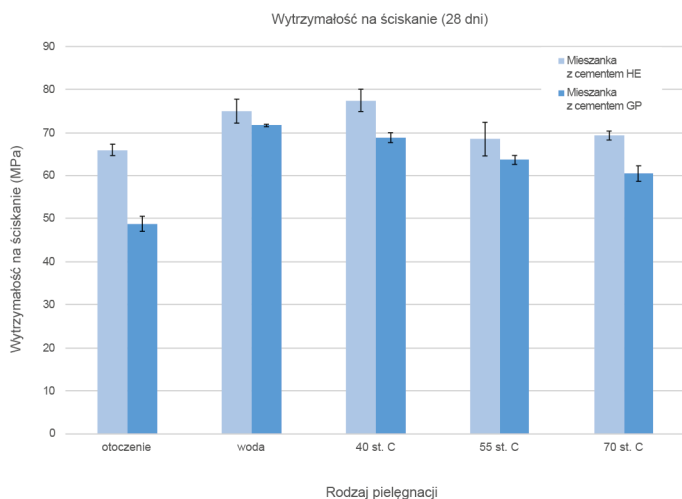
### Wyniki badań

#### Wpływ pielęgnacji cieplnej na przyrost wytrzymałości na ściskanie

Wpływ pielęgnacji cieplnej na przyrost wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunkach 2 i 3 (wraz ze słupkami błędów oznaczającymi odchylenie standardowe) na podstawie wyników uzyskanych na UCT. Zgodnie z oczekiwaniami, pielęgnacja cieplna prowadzi do początkowo wyższych wytrzymałości, przy czym w pierwszym dniu po wyprodukowaniu wartości są znacznie wyższe w porównaniu do betonu dojrzewającego w wodzie lub w warunkach otoczenia. Po okresie



#### 2. Wpływ początkowej temperatury pielęgnacji cieplnej na wytrzymałość na ściskanie po 24 godzinach.

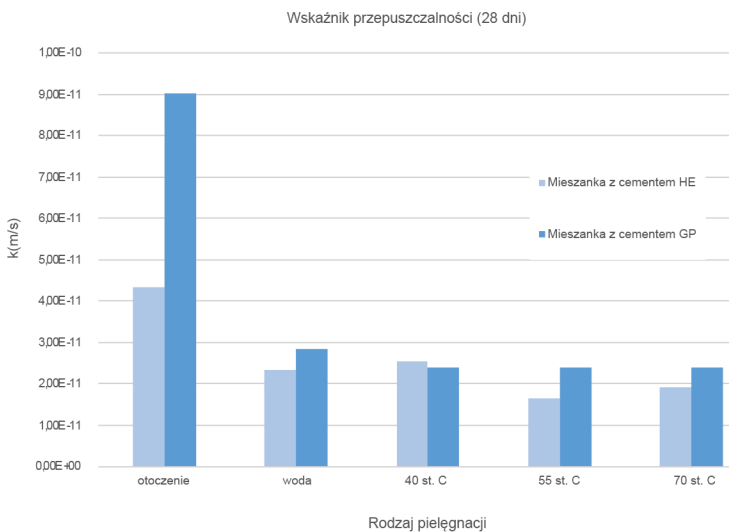


#### 3. Wpływ początkowej temperatury pielęgnacji cieplnej na wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach.

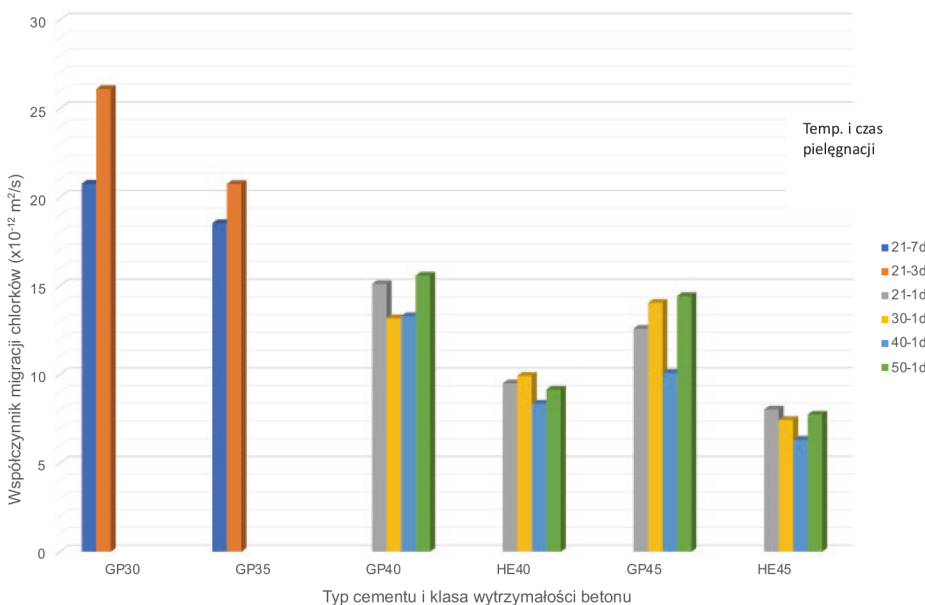
28 dni wytrzymałość na ściskanie próbek dojrzewających w warunkach pielęgnacji cieplnej była nadal wyższa niż próbek dojrzewających w warunkach otoczenia, zwłaszcza w przypadku betonu wyprodukowanego na bazie cementu ogólnego przeznaczenia (GP). Ogólnie rzecz biorąc, w niniejszych badaniach nie zaobserwowano znaczącego negatywnego wpływu pielęgnacji cieplnej na wytrzymałość na ściskanie w późniejszym wieku.

### Współczynnik przepuszczalności

Wyniki badań przepuszczalności tlenu przedstawiono na rysunku 4. Niższa wartość wskazuje na beton o większej trwałości. Ogólnie rzecz biorąc, pielęgnacja cieplna nie miała negatywnego wpływu na właściwości determinujące trwałość w przypadku badanych receptur mieszanek, niezależnie od rodzaju cementu. We wszystkich temperaturach dojrzewania, współczynnik przepuszczalności był zgodny z wartościami zmierzonymi na próbkach przechowywanych w całości w wodzie i był znacznie niższy niż dla betonu dojrzewającego w symulowanych warunkach otoczenia.



4. Wpływ początkowej temperatury pielęgnacji cieplnej na współczynnik przepuszczalności.



5. Współczynnik migracji chlorków, zmierzony po 28 dniach dojrzewania.

### Odporność na chlorki

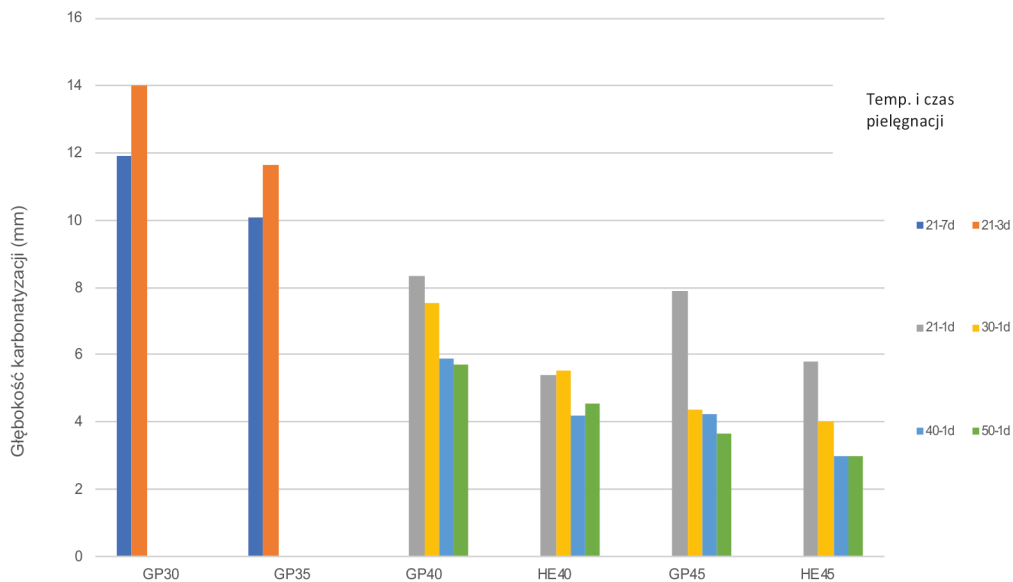
Badania przeprowadzone na Uniwersytecie Canterbury, dotyczące odporności na działanie chlorków betonu o klasach wytrzymałości 30 i 35 MPa, wykazały stosunkowo słabe wartości nawet po przechowywaniu w wodzie przez trzy lub siedem dni (rys. 5). Współczynniki migracji chlorków określone na podstawie tych badań wynosiły ponad  $18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , natomiast prefabrykaty betonowe wykazywały umiarkowaną lub dobrą odporność na chlorki przy współczynnikach dyfuzji w zakresie  $6-15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Optymalna początkowa temperatura pielęgnacji cieplnej wynosiła około  $40^\circ\text{C}$ , przy czym wyższe współczynniki dyfuzji zmierzono po zwiększeniu temperatury do  $50^\circ\text{C}$ . Podobny efekt obróbki cieplnej został już opisany przez innych badaczy [15, 16]. Generalnie beton z cementem HE charakteryzował się niższym współczynnikiem migracji niż podobny beton wyprodukowany z cementu GP.

### Przyspieszona karbonatyzacja

Przyspieszoną karbonatyzację określono zgodnie z normą ISO 1920, poddając próbki betonowe w wieku 20 dni działaniu dwutlenku węgla o stężeniu 2,5%. Głębokość karbonatyzacji określono po 56 dniach ekspozycji w komorze karbonatyzacyjnej (rys. 6). Wyniki badań pokazują, że mieszanki wykorzystywane do produkcji prefabrykatów mają podobną lub mniejszą głębokość karbonatyzacji, a tym samym lepszą trwałość w porównaniu z betonem referencyjnym, nawet bez aktywnej pielęgnacji wodą. Głębokość karbonatyzacji zmniejszała się również wraz ze wzrostem dojrzałości wywołanej ogrzewaniem betonu (wyższe temperatury początkowe temperatury pielęgnacji cieplnej powodowały poprawę odporności na karbonatyzację).

### Omówienie wyników

W celu określenia wymaganego czasu pielęgnacji betonu zwykła obserwacja dojrzałości betonu przy wysokich temperaturach dojrzewania daje jedynie niewystarczający obraz i ma zastosowanie jedynie dla temperatur poniżej  $50^\circ\text{C}$ . Ponadto,

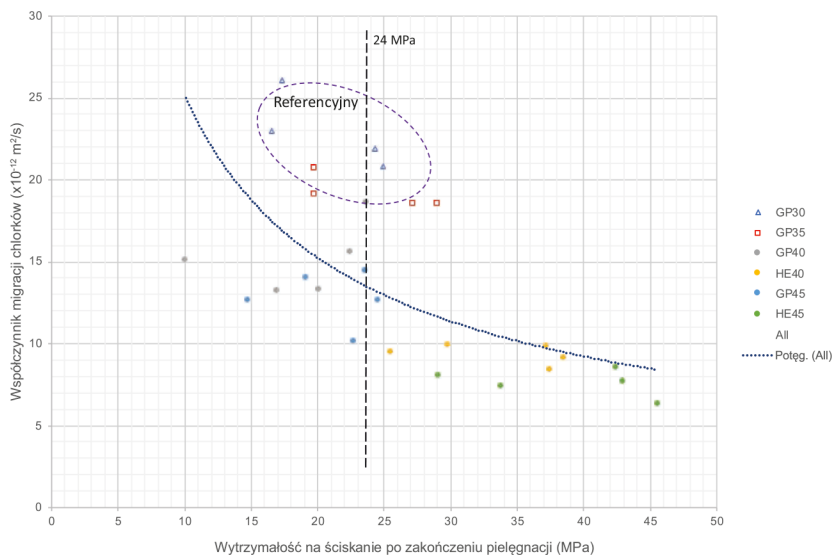


6. Wyniki badania przyspieszonej karbonatyzacji po 56 dniach ekspozycji.

szacowanie trwałości betonu na podstawie wytrzymałości na ściskanie jest mylące, co dotyczy zwłaszcza betonów produkowanych z użyciem spoiw o wolnej reaktywności, np. betonów z dodatkiem popiołu lotnego.

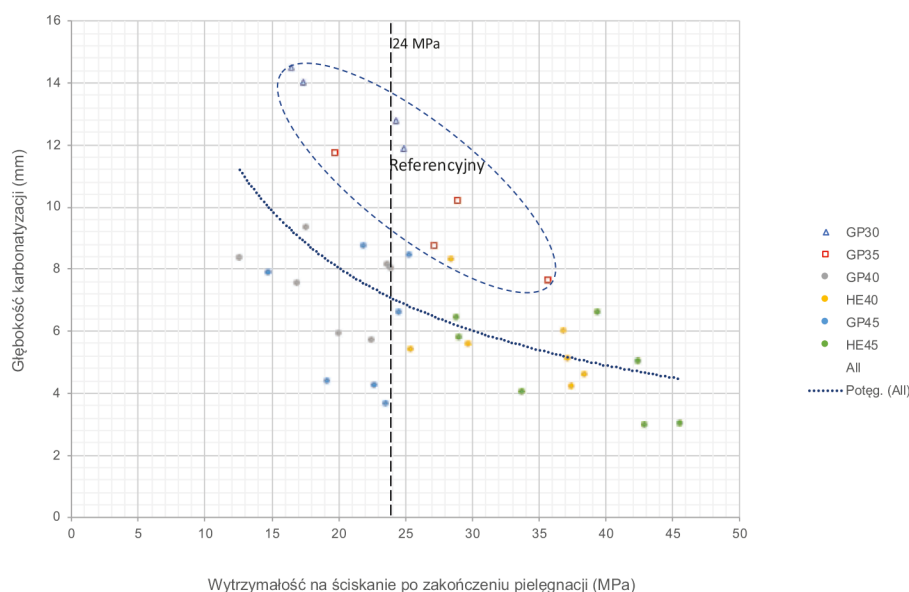
Widać to na rysunku 7, gdzie wytrzymałość na ściskanie po zakończeniu każdej z procedur pielęgnacji jest porównana

z 28-dniowym współczynnikiem migracji chlorków. Podczas gdy beton przeznaczony do produkcji prefabrykatów pielęgnowany przez 24 godziny wykazywał stosunkowo dobrą korelację z dojrzałością (np. umiarkowana do dobrej odporność na chlorki przy wytrzymałości większej niż 24 MPa), betony referencyjne w niektórych przypadkach miały wytrzymałość



7. Porównanie wytrzymałości na ściskanie po zakończeniu danej procedury pielęgnacji z współczynnikiem migracji chlorków zmierzonym po 28 dniach.

8. Porównanie wytrzymałości na ściskanie (po zakończeniu odpowiedniej pielęgnacji) z głębokością karbonatyzacji.



większą niż 24 MPa, ale nadal miały niskie wartości odporności na chlorki.

Podobnie zastosowanie metody wskaźnika dojrzałości nie daje wiarygodnych podstaw do prognozowania odporności na karbonatyzację, co zaobserwowano głównie dla betonów referencyjnych o umiarkowanej wytrzymałości ok. 30 MPa. Widać to na rysunku 8 - beton referencyjny o niższej wytrzymałości konsekwentnie wykazywał większą głębokość karbonatyzacji w porównaniu z betonem prefabrykowanym w teście ISO 1920.

### Zalecenia

Kiedy producenci prefabrykatów betonowych używają betonu, który ma wyższą wytrzymałość niż wytrzymałość wymagana w projekcie konstrukcji ze względu na wymagania dotyczące wczesnej wytrzymałości, pozwala to nie tylko na wcześniejsze rozformowanie elementów w zakładzie, lecz również zazwyczaj pozwala oczekiwać większej trwałości. Ta poprawa jakości mikrostruktury betonu jest również widoczna, gdy początkowe dojrzewanie jest przeprowadzane bez aktywnej pielęgnacji wodą. Aby wykorzystać związane z tym korzyści w produkcji, należy opracować metodę kontroli jakości, która może być wykorzystana do optymalizacji składu mieszanek

i metod produkcji. Jedną z praktycznych możliwości jest zastosowanie metod badawczych opartych na parametrach użytkowych w połączeniu ze wskaźnikami trwałości.

Z doświadczenia z dostawami prefabrykatów betonowych wynika, że prefabrykaty są często produkowane z betonu o wytrzymałości o dwie klasy wyższej niż określona w specyfikacji (np. klasa 40 MPa dla 30 MPa lub 45 MPa dla 35 MPa). Niniejsze badania wykazały, że takie podejście z reguły zapewnia wystarczającą trwałość, nawet jeśli prefabrykaty betonowe nie są poddawane aktywnej pielęgnacji w warunkach wysokiej wilgotności.

Zasadniczo inżynierowie projektanci i producenci prefabrykatów betonowych powinni w swoich projektach konstrukcyjnych i koncepcyjnych uwzględnić wyższą oczekiwaną wytrzymałość i związaną z tym lepszą trwałość w porównaniu z betonem wylewanym na placu budowy.

### Wnioski

Wyniki niniejszego badania wskazują, że metoda wskaźnika dojrzałości jest mało przydatna w szacowaniu wymaganego

czasu pielęgnacji dla betonu o umiarkowanej wytrzymałości. Było to widoczne przy porównywaniu właściwości użytkowych cementu HE i cementu GP, a także przy analizie zmian mikrostruktury betonu zachodzących w przypadku wysokiej temperatury dojrzewania. Proste obliczenia dojrzłości często nie stanowią wiarygodnej podstawy do oceny właściwości determinujących trwałość w przypadku wysokich temperatur dojrzewania, zwykle powyżej 50 - 60°C, oraz dla różnych rodzajów betonu.

Na jakość otuliny betonowej może mieć wpływ temperatura i czas pielęgnacji elementów w zakładzie prefabrykacji betonu. Zjawisko to może być kontrolowane i oceniane poprzez wdrożenie odpowiedniego doświadczalnego programu kontroli jakości, opartego na pomiarze prostych wskaźników trwałości.

## Podziękowania

Uniwersytet Canterbury dziękuje za dofinansowanie z Precast Sector of Concrete New Zealand, które umożliwiło zakup komory karbonatyzacyjnej.

## Bibliografia

- [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.