

dr inż. Małgorzata Gołaszewska

Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski

Politechnika Śląska

Dr inż. Grzegorz Cygan

Politechnika Śląska

Wpływ rodzaju wapienia na właściwości betonów zwykłych

Effect of the type of limestone on the properties of ordinary concrete

Streszczenie

Mączka wapienna jest jednym z częściej stosowanych dodatków mineralnych do betonu, zwłaszcza betonów samozagęszczalnych. Pomimo to problematyka wpływu rodzaju i właściwości kamienia wapiennego na właściwości betonu była dotychczas podejmowana sporadycznie. Brakuje w tym zakresie szerszych i systematycznych badań, szczególnie w zakresie trwałości betonu. W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu mączek wapiennych różniących się pochodzeniem i stopniem przemiału na podstawowe właściwości mieszanek betonowych - konsystencję, zawartość powietrza, nasiąkliwość, oraz betonu - wytrzymałość po 2 dniach i 28 dniach, wodoszczelności, współczynnik dyfuzji chlorków oraz mrozoodporność. Stwierdzono znaczący wpływ rodzaju mączki wapiennej (właściwości kamienia wapiennego) na właściwości zarówno mieszanki betonowej jak i betonu stwardniałego. Wpływ powierzchni właściwej wapienia na właściwości betonów był najbardziej zauważalny w przypadku konsystencji, natomiast rodzaj wapienia był decydujący w przypadku wytrzymałości oraz napowietrzenia. Wpływ rodzaju czy uziarnienia wapienia na nasiąkliwość, mrozoodporność i przepuszczalność chlorków był niejednoznaczny.

Abstract

Limestone is one of the most frequently used mineral additives to concrete, especially self-compacting concrete. Despite this, the issue of the influence of the type and properties of limestone on the properties of concrete has been addressed sporadically so far. There is a lack of broader and systematic research in this area, especially in the field of concrete durability. The paper presents the results of research on the influence of limestone flours of different origin and degree of grinding on the basic properties of concrete mixes - consistency, air content, water absorption,

and concrete - strength after 2 days and 28 days, water resistance, chloride diffusion coefficient and frost resistance. A significant influence of the type of limestone (properties of limestone) on the properties of both the concrete mix and hardened concrete was found. The influence of the specific surface area of limestone on the properties of concrete was most noticeable in the case of consistency, while the type of limestone was decisive in the case of strength and aeration. The influence of the type or grain size of limestone on water absorption, frost resistance and chloride permeability was ambiguous.

1. Wprowadzenie

Dodatki do betonu odgrywają obecnie znaczącą rolę w przemyśle cementowym, ze względu na możliwość obniżenia zawartości cementu w betonach, a co za tym idzie, obniżenia śladu węglowego betonu i konstrukcji betonowych co jest istotne ze względu na założenia zrównoważonego budownictwa. Zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu, do roku 2050 Unia Europejska powinna osiągnąć neutralność klimatyczną, przy jednoczesnym zachowaniu silnej i konkurencyjnej gospodarki, co stawia przemysł cementowy na kluczowym miejscu ze względu na wysoką emisję CO₂ podczas produkcji klinkieru oraz strategiczną istotność betonu w procesie postępującej urbanizacji [1,2]. Jedną z możliwości ograniczenia emisji CO₂ związanej z produkcją betonu jest stosowanie dodatków pozwalających na częściowe zastąpienie cementu materiałem o niższym śladzie węglowym bez znaczącego pogorszenia jego właściwości. Pośród dodatków do betonu, jednym z najczęściej obecnie stosowanych dodatków mineralnych jest mączka wapienna, ze względu na powszechną dostępność oraz stosunkowo niski koszt.

Wapień jest skałą osadową, złożoną głównie z węglanu wapnia (CaCO₃) w postaci kalcytu lub rzadziej aragonitu. Może zawierać w swoim składzie także drobne ilości minerałów ilastych, dolomitów, minerałów siarczanowych, krzemianów oraz tlenków i wodorotlenków żelaza [3]. Zgodnie z normą PN-EN 206 [4], mączka wapienna jest klasyfikowana jako dodatek typu I do betonu, czyli jest dodatkiem prawie obojętnym, nie wykazującym ani właściwości hydraulicznych, ani pucolanowych. Mączka wapienna nie jest jednak całkowicie inerta, i niewielkie ilości węglanu wapnia reagują z fazami glinianowymi cementu tworząc uwodnione węglanogliniany wapnia, doszczelniające strukturę [5]. Oprócz niewielkiego wpływu chemicznego, mączka wapienna ma też znaczący fizyczny wpływ na proces hydratacji cementu – ze względu na wysoką mielność, a co za tym idzie drobne uziarnienie, ziarna mączki wapiennej mogą działać jako mikrowypełniacz, a także jako dodatkowe zarodki krystalizacji dla produktów hydratacji cementu [6]. To natomiast może prowadzić do przyspieszenia wiązania oraz zwiększenia szczelności kompozytów cementowych [7].

Wpływ dodatku mączki wapiennej jako dodatku typu I na właściwości betonów zwykłych był przedmiotem licznych badań [8,9].

Należy zauważyć jednak, że wpływ dodatku wapienia nie jest jednoznaczny. Jakkolwiek dodatek mączki wapiennej do betonu kojarzony jest z poprawą urabialności, dostępne badania nie potwierdzają jednak jednoznacznie takowego efektu, gdyż znaleźć można badania wskazujące na zwiększenie konsystencji (zwiększenie opadu stożka) wraz ze wzrostem zawartości mączki wapiennej w betonie [10], brak wpływu mączki na konsystencję [11] oraz pogorszenie konsystencji [12]. Dodatek wapienia może wpływać także na zawartość powietrza w mieszance betonowej, zwiększając ją [13], lub zmniejszając [14], natomiast można znaleźć przypadki kiedy dodatek wapienia nie zmienił w znaczący sposób napowietrzenia mieszanki [15]. Efekt ten może być związany z różnym wpływem wapienia na urabialność, a szczególnie lepkość mieszanki, co może powodować różnice w odpowietrzaniu i samoodpowietrzaniu mieszanek.

W kontekście właściwości betonu stwardniałego, wpływ na wytrzymałość na ściskanie jest również niejednoznaczny – jakkolwiek w przypadku substytucji części cementu, wraz ze wzrostem zawartości mączki wapiennej, wytrzymałość obniża się ze względu na zmniejszenie zawartości cementu w betonie, do pewnego poziomu substytucji betony z mączką wapienną mogą mieć wyższe lub porównywalne wytrzymałości jak

betony referencyjne. Liczne badania pokazują pozytywny efekt substytucji na wytrzymałość w zakresie 5-10% masy cementu, można natomiast także znaleźć badania w których poziom ten wynosi 30% [14,16].

Wszystko to wskazuje na znaczący wpływ rodzaju wapienia na właściwości betonu, natomiast należy zauważyć, że wpływ rodzaju wapienia nie był dotychczas tak szeroko badany, co może wpływać na efektywność jego praktycznego wykorzystania. Wapień charakteryzuje się dużą zmiennością składu, nie tylko pomiędzy złożami ale także w obrębie jednego kamieniołomu, co może prowadzić do różnic w jego właściwościach [17,18], a co za tym idzie jego wpływu na właściwości kompozytów cementowych.

Celem artykułu jest więc analiza różnic we właściwościach betonów zwykłych z dodatkiem różnych rodzajów wapienia jako dodatku typu I do betonu. W badaniach zastosowane zostało pięć rodzajów wapienia, pochodzących z czterech różnych Polskich złóż. Dla wapienia z jednego złoża sprawdzono dwa stopnie przemiału. Przeprowadzone badania obejmowały badania mieszanki betonowej: konsystencji i zawartości powietrza, oraz badania betonu stwardniałego: wytrzymałości po 2 dniach i 28 dniach, nasiąkliwości betonu, współczynnika dyfuzji chlorków oraz mrozoodporności.

2. Składy betonów oraz przeprowadzone badania

W badaniach użyty został cement portlandzki CEM I 42.5R, którego skład przedstawiono w Tab. 1, oraz pięć rodzajów wapienia, których uziarnienie przedstawione jest na Rys. 1 a powierzchnia właściwa – w Tab. 2.

Przygotowane zostało 6 betonów – beton referencyjny bez dodatku wapienia oraz pięć betonów z dodatkiem wapienia, który został wprowadzony masowo, zamiast części stosu okruszowego. Beton projektowany został z myślą o spełnieniu klasy ekspozycji XC3 zgodnie z normą PN-EN 206-1 [4]. Zastosowany został piasek zwykły frakcji 0-2 mm oraz kruszywo żwirowe 2-8 mm i 8-16mm. W celu uzyskania takiej samej konsystencji mieszanek betonowych zastosowano superplastifikator na bazie polikarboskylanów, w ilości pozwalającej na uzyskanie rozplwy 380 ±20mm (klasa konsystencji F2). Dokładne składy zastosowanych betonów przedstawione zostały w Tab.3.

Tabela 1. Skład zastosowanego cementu

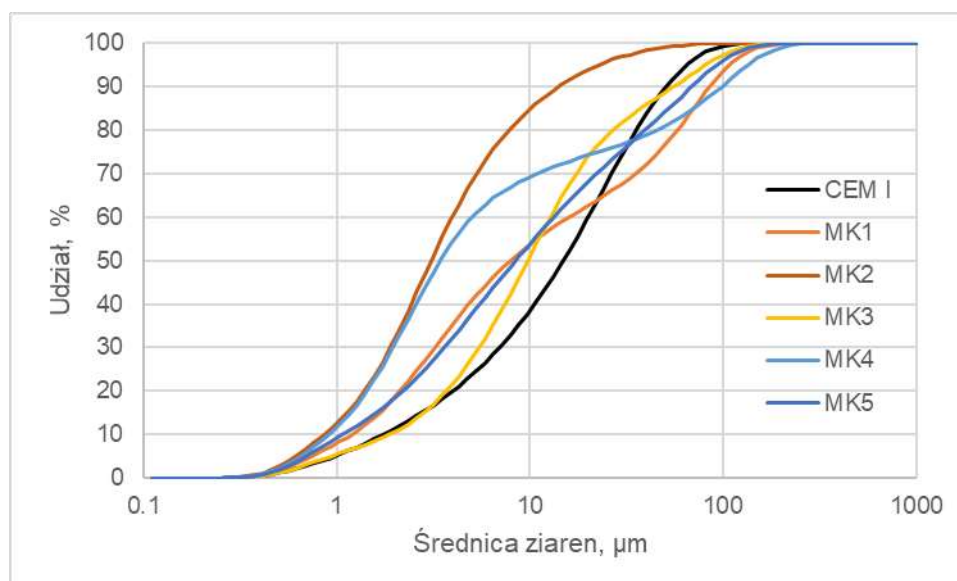
Składnik	Zawartość składnika, % wag,									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eq}	SO ₃	Cl
CEM I 42,5R	19,9	6,2	2,7	62,6	1,5	0,33	0,72	0,8	2,6	0,05

Tabela 2. Powierzchnia właściwa cementu i wapieni

	CEM I	MK1	MK2	MK3	MK4	MK5
Powierzchnia właściwa, m ² /kg	482,2	690,3	1097	522	696,7	706,2

Tabela 2. Składy i oznaczenia zastosowanych betonów

	REF1	B-MK1	B-MK2	B-MK3	B-MK4	B-MK5
Cement CEM I, kg/m ³	280	280	280	280	280	280
Piasek 0-2 mm, kg/m ³	700	615.6	615.6	615.6	615.6	615.6
Kruszywo 2-8 mm, kg/m ³	655.6	655.6	655.6	655.6	655.6	655.6
Kruszywo 8-16 mm, kg/m ³	563.1	563.1	563.1	563.1	563.1	563.1
Mączka wapienna, kg/m ³		84	84	84	84	84
Woda, kg/m ³	182	182	182	182	182	182
W/(C+MK)	0.65	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Superplastyfikator, % C	0	0.3	0.17	0.2	0.26	0.22



Rys. 1. Uziarnienie cementu i wapieni zastosowanych w badaniach.

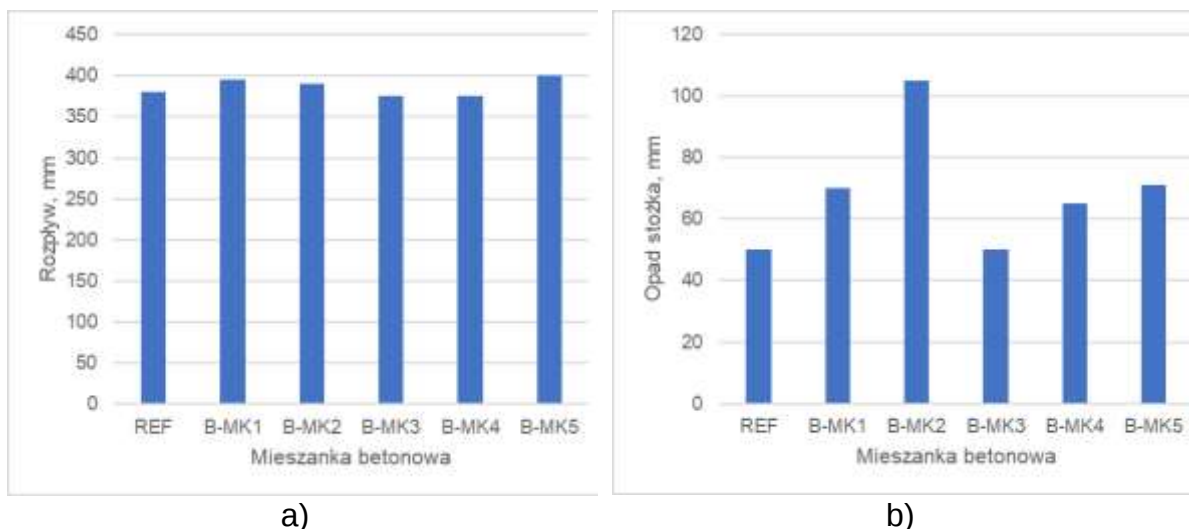
Przeprowadzono następujące badania betonów zwykłych:

- Konsystencja mieszanki została określona na dwa sposoby: badaniem metodą stolika rozpliwowego (według normy PN-EN 12350-5 [19]), oraz badaniem metodą opadu stożka (według normy PN-EN 12350-2 [20]).
- Zawartość powietrza w mieszance betonowej została określona metodą ciśnieniową, zgodnie z normą PN-EN 12350-7 [21].
- Wytrzymałość na ściskanie została określona zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2019-07 po 2 i 28 dniach pielęgnacji.
- Nasiąkliwość betonu badana była na próbkach 15x15x15 cm³ zgodnie z procedurą normy PN-88-B-06250 [22].
- Przepuszczalność chlorków została określona zgodnie z normą ASTM C 1202-97 [23], .
- Mrozoodporność została określona poprzez badanie ubytku masy oraz spadku wytrzymałości po 100 cyklach zamrażania/rozmarzania, zgodnie z normą PN-B-06265:2018-10 [24].

3. Wyniki badań

3.1. Konsystencja

Wyniki badania konsystencji przedstawione są na Rys. 2.



Rys. 2. Wyniki badań konsystencji a) metodą stolika rozpliwowego, b) metodą opadu stożka

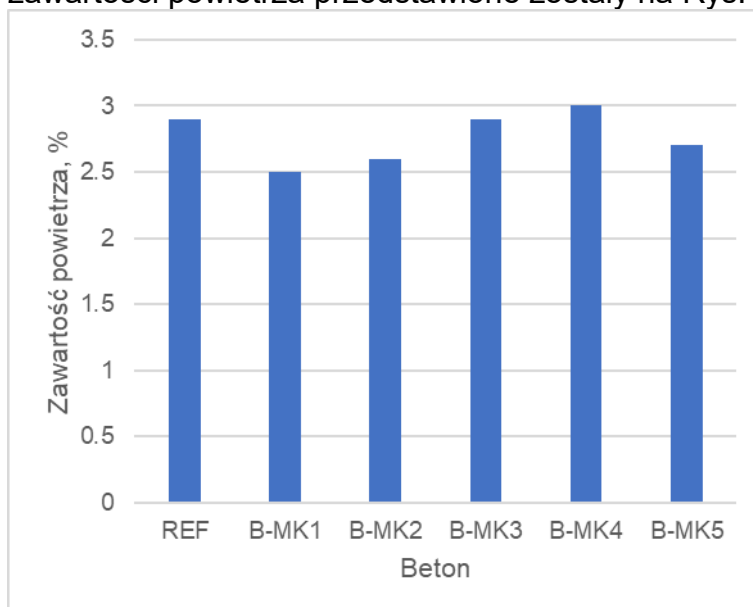
Wyniki badań konsystencji betonu stolikiem rozpliwu są porównywalne dla wszystkich betonów, co było założeniem przygotowywanego składu, i ilość superplastifikatora dodana do każdej mieszanki była dobrana pod tym względem. Należy więc zauważyć, że dodatek wszystkich wapieni pogorszył konsystencję mieszanki, gdyż w celu uzyskania porównywalnej konsystencji do betonu referencyjnego należało użyć superplastifikatora, co może być związane z wysoką mialnością mielonych wapieni, a co za tym idzie, możliwą wysoką absorpcją wody na powierzchni cząstek wapienia. Pomimo że dodatek wapienia sprawia że w mieszance znajduje się więcej zaczynu a mniej kruszywa, większa absorpcja wody sprawia że dostępność wody jest mniejsza a co za tym idzie, konsystencja się pograsza.

W przypadku opadu stożka, można zauważyć różnice pomiędzy konsystencją mieszanek, co wskazuje na różnice w ich właściwościach reologicznych. Jedynie mieszanka MK3 uzyskała podobny opad stożka, natomiast inne mieszanki charakteryzowały się większym opadem stożka, w szczególności w przypadku mieszanki MK2, której opad stożka był dwukrotnie większy niż mieszanki referencyjnej. Należy przy tym zauważyć, że mieszanki MK1 oraz MK3-MK5 mieściły się, tak jak mieszanka referencyjna, w klasie konsystencji S2, jedynie MK2 była w klasie S3. Wskazuje to, że pomimo różnic we wpływie właściwości reologicznych, różnice w konsystencji mogą być dla niektórych wapieni pomijalne w praktyce. Wapieniem który poprawił znacząco konsystencję był wapień MK2, w przypadku którego do uzyskania założonej konsystencji zastosowano najmniejszą porcję superplastifikatora, oraz miał największy opad stożka – jak można zauważyć na Rys. 1 charakteryzuje się on najdrobniejszym uziarnieniem, co w obecności superplastifikatora przekładać się może na poprawę konsystencji mieszanek [25].

Wskazuje to na wyraźny wpływ powierzchni właściwej wapienia na konsystencję – wraz ze wzrostem powierzchni właściwej wapienia, opad stożka betonów z wapieniem i superplastifikatorem zwiększa się. Wpływ rodzaju mączki nie jest natomiast wyraźny, gdyż mączki z tego samego źródła, a o innym uziarnieniu (MK1 i MK2) różnią się znacząco, a mączki o podobnym uziarnieniu (MK1, MK4 i MK5) charakteryzują się porównywalną konsystencją.

3.2. Zawartość powietrza

Wyniki badania zawartości powietrza przedstawione zostały na Rys. 3.

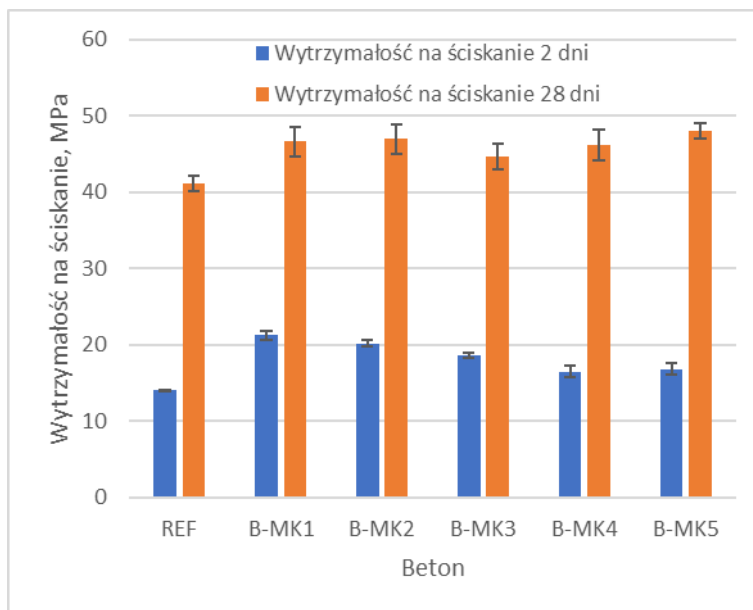


Rys. 3. Wyniki badania zawartości powietrza

Jak można zauważyć, dodatek wapienia zmniejsza lub nie zmienia zawartości powietrza w mieszance betonowej. Różnice, które można zaobserwować w przypadku betonów z wapieniem MK1, MK2 i MK5, są jednak niewielkie, bo różnica między zawartością powietrza w mieszance referencyjnej w i mieszankach z wapieniem nie przekracza 0.5 punktu procentowego. Wskazuje to na niewielki wpływ dodatku wapienia na zawartość powietrza w mieszance betonowej – wapien może doszczelniać strukturę mieszanki i poprawić upakowanie cząstek w mieszance, a co za tym idzie, może zmniejszać ilość powietrza. W przypadku zawartości powietrza, rodzaj wapienia miał większe znaczenie niż powierzchnia właściwa, jako że betony z wapieniem MK1 i MK2, różniące się jedynie powierzchnią właściwą wapienia, uzyskały porównywalne wyniki. Powód dla którego rodzaj wapienia wpływa na zawartość powietrza w większym stopniu niż uziarnienie nie jest jasny, ale może być to związane z kształtem ziaren wapienia – temat ten wymaga jednak dodatkowych badań.

3.3. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 2 i 28 dniach przedstawione zostały na Rys. 4. Wszystkie betony spełniają wymagania założonej klasy wytrzymałości C30/37.



Rys. 4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie

Jak można zauważyć, dodatek każdego wapienia do betonu zwiększył zarówno wczesną wytrzymałość betonów, jak i 28 dniową wytrzymałość. W przypadku dwudniowej wytrzymałości różnica jest wysoka – najwyższą wytrzymałość osiągnął beton z MK1, i wytrzymałość ta jest o 51% wyższa niż wytrzymałość betonu referencyjnego, natomiast beton z dodatkiem wapienia o najniższej wytrzymałości był mocniejszy od betonu referencyjnego o 17%. Po 28 dniach różnica wytrzymałości nie jest aż tak wysoka, i zawiera się w przedziale 9% - 17%.

Należy także zauważyć, że jakkolwiek różnice we wpływie wapienia na wczesną wytrzymałość na ściskanie są bardzo wyraźne i sięgają 34 punktów procentowych, w przypadku wytrzymałości 28 – dniowej różnica jest znacząco mniejsza, i sięga jedynie 8 punktów procentowych, co przekłada się na różnice między wytrzymałością betonów z wapieniem rzędu 2 MPa, i choć beton z wapieniem MK3 uzyskał najniższą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach pośród betonów z wapieniem, różnica nie jest znacząca.

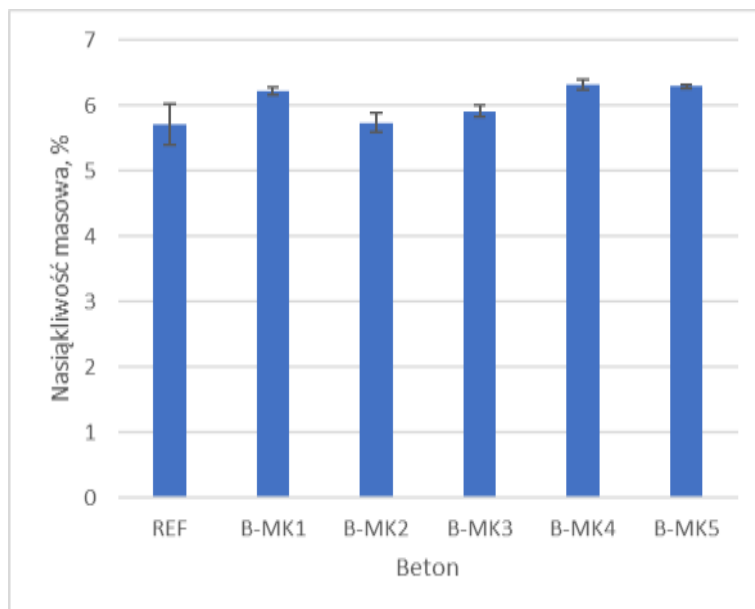
Pozytywny wpływ dodatku wapienia na wytrzymałość wapienia jest związany z kilkoma nakładającymi się efektami. Wapień wprowadzony był do betonu zamiast kruszywa, bez redukcji w ilości cementu, a dzięki swojej mianości wapień może współpracować z cementem i być wliczony w poczet spoiwa w kontekście stosunku wodno-cementowego. Oznacza to, że stosunek w/s betonów z wapieniem jest niższy, a co za tym idzie, można oczekiwać wyższej wytrzymałości na ściskanie. Oprócz tego wapień ma wpływ fizyczny i chemiczny na hydratację cementu, działając jak załączek nukleacji i wypełniacz zapobiegający aglomeracji ziaren cementu, co przyspiesza hydratację cementu i prowadzi do wyższego stopnia hydratacji cementu [26].

Wpływ wapienia na wytrzymałość nie był bezpośrednio zależny od powierzchni właściwej czy uziarnienia wapieni, gdyż najwyższą wytrzymałość 2 dniową i 28 dniową osiągnęły beton z wapieniem MK1 i MK2, które pochodzą z jednego kamieniołomu, natomiast mają bardzo różne uziarnienie. Istnieją więc przesłanki by sądzić, że wpływ wapienia na wytrzymałość jest zależny w większym stopniu od

rodzaju wapienia, jego składu chemicznego i pochodzenia, niż powierzchni właściwej, natomiast dokładny charakter tego wpływu wymaga dodatkowych badań.

3.4. Nasiąkliwość betonu

Wyniki badania nasiąkliwości betonu pokazane zostały na Rys. 5.



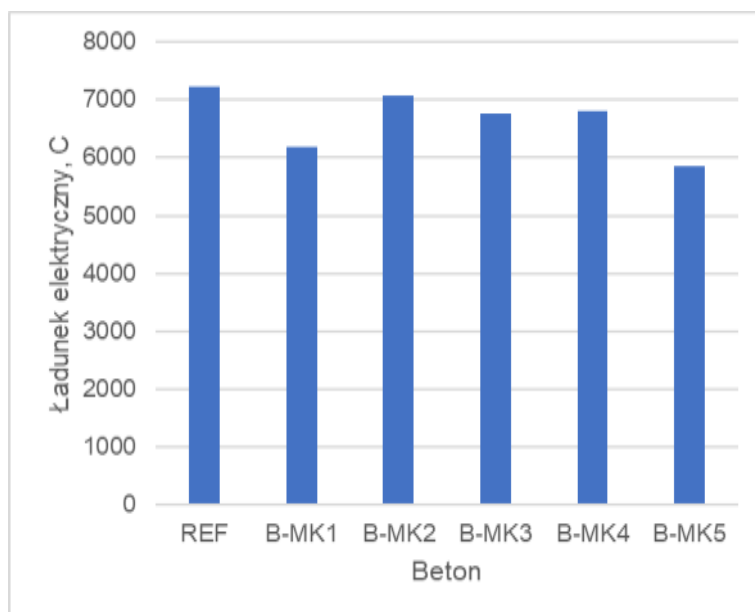
Rys. 5. Wyniki badania nasiąkliwości masowej betonów

Dla wszystkich badanych betonów nasiąkliwość masowa przekroczyła najczęściej przyjmowaną graniczną nasiąkliwość wynoszącą 4% [27]. Nasiąkliwość masowa betonów z wapieniem była porównywalna (MK2, MK3), lub nieznacznie wyższa niż betonu referencyjnego. Należy jednocześnie zauważyć, że różnica w nasiąkliwości jest niewielka i wynosi maksymalnie 0.5% (MK1). Może być to związane z większą absorpcją wody przez wapień niż przez kruszywo w miejsce którego został wprowadzony.

Nie zaobserwowano jednoznacznego wpływu ani rodzaju wapienia, ani uziarnienia i powierzchni właściwej na nasiąkliwość.

3.5. Przepuszczalność chlorków

Wyniki badania przepuszczalności chlorków zostały przedstawione na Rys. 6.



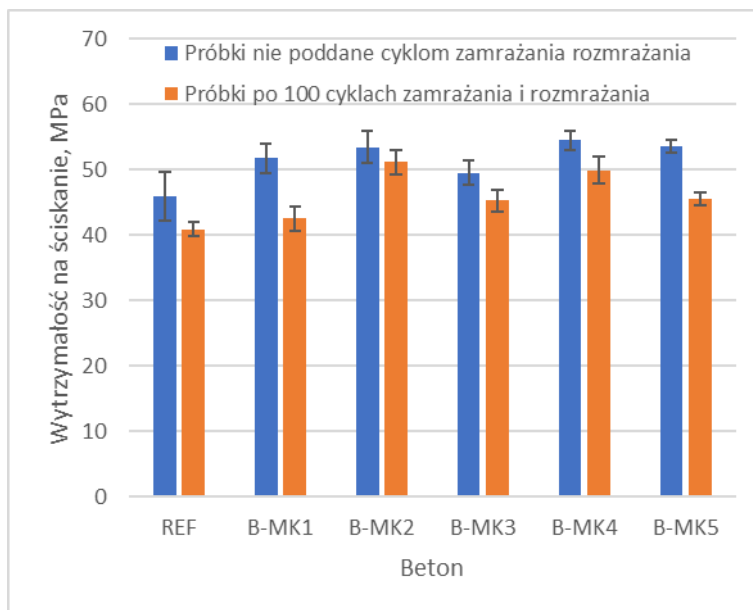
Rys. 6. Wyniki badania przepuszczalności chlorków

Wszystkie przebadane betony charakteryzują się znaczną przepuszczalnością chlorków mierzoną przepływem ładunku elektrycznego wynoszącym >4000 kulombów, co według normy ASTM C 1202 [23] plasuje je w kategorii wysokiej przepuszczalności jonów chlorkowych. Jakkolwiek dodatek wapienia nie poprawił kategorii przepuszczalności chlorków betonu, należy zauważyć że przepływający ładunek elektryczny był porównywalny dla wapieni MK2-4 (różnica <6%), natomiast w przypadku dodatku wapienia MK1 i MK5 można zauważyć wyraźny spadek, o odpowiednio 14% i 19%. MK1 i MK2 różnią się tylko przemiałem, co wskazuje na wpływ uziarnienia lub powierzchni właściwej na przepuszczalność chlorków w większym zakresie niż składu chemicznego wapienia, natomiast nie ma jasnego związku pomiędzy uziarnieniem badanych wapieni czy ich powierzchnią właściwą a przepuszczalnością chlorków.

Jakkolwiek można więc wnioskować że wpływ dodatku wapienia na przepuszczalność chlorków jest pozytywny, konieczne są dodatkowe badania mikrostruktury i porowatości które mogą pozwolić na dokładniejsze scharakteryzowanie wpływu rodzaju i przemiału wapienia na przepuszczalność chlorków.

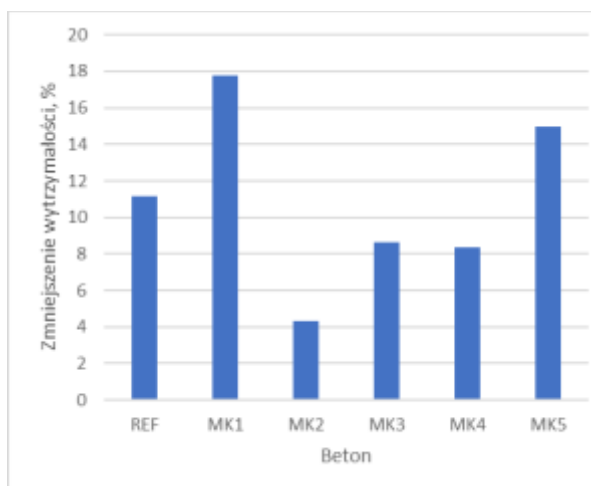
3.6. Mrozoodporność

Wyniki badania wytrzymałości betonów poddanych 100 cyklom zamrażania i rozmrażania zostały przedstawione na Rys. 7. Na Rys. 8 przedstawiono ubytek masy i zmniejszenie wytrzymałości betonów poddanych 100 cyklom zamrażania i rozmrażania

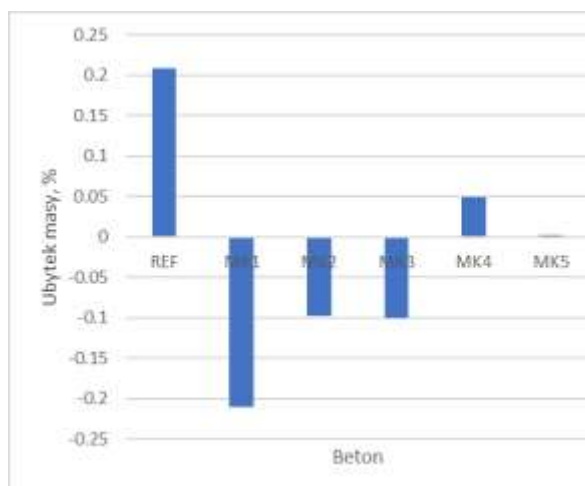


Rys. 7. Wyniki badania wytrzymałości betonów poddanych 100 cyklom zamrażania i rozmrażania

Wytrzymałość na ściskanie betonów zarówno referencyjnych, jak i poddanych 100 cyklom zamrażania i rozmrażania spełniają wymagania klasy wytrzymałości C30/37 (założoną przy projektowaniu mieszanki) za wyjątkiem betonu referencyjnego poddanego cyklowi zamrażania i rozmrażania. Podobnie jak w wynikach badania wytrzymałości na ściskanie betonów po 28 dniach, wytrzymałości betonów z wapieniem są wyższe od wytrzymałości betonu referencyjnego. W przypadku betonów po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania, wytrzymałość betonów z dodatkiem wapienia pozostała wyższa od wytrzymałości betonu referencyjnego, z wyjątkiem betonu z dodatkiem wapienia MK1.



a)



b)

Rys. 7. Wyniki badania betonów poddanych 100 cyklom zamrażania i rozmrażania:
a) spadek wytrzymałości, b) ubytek masy

Spadek wytrzymałości wszystkich badanych betonów mieścił się w granicach spadku dla betonów mrozoodpornych, czyli 20%. Największym spadkiem wytrzymałości charakteryzowały się betony MK1 i MK5, i sięgał on odpowiednio 17.7% i 15.0%. Najmniejszy spadek wytrzymałości wystąpił w przypadku betonu z wapieniem MK2 i wynosił 4,1%. Wskazuje to na brak dominującego wpływu rodzaju wapienia na spadek wytrzymałości, jako że MK1 i MK2 pochodzą z tego samego złoża i różnią się jedynie przemiałem. Należy jednocześnie zauważyć, że powierzchnia właściwa i uziarnienie także nie mają jednoznacznego wpływu na spadek wytrzymałości. Ubytek masy betonów po 100 cyklach zamrażania rozmrażania (Rys. 7b) dla wszystkich badanych betonów był mniejszy niż 5 procent masy i nie przekraczał 0,25%, co oznacza że wszystkie próbki spełniły wymagania dla betonów mrozoodpornych. Należy zauważyć, że betony z dodatkiem wapienia charakteryzowały się mniejszym ubytkiem masy niż próbka referencyjna, i w przypadku betonów z wapieniem MK1, MK2 oraz MK3 wystąpił niewielki przyrost masy, co może być związane z wnikaniem wody do wnętrza próbki przez spękania powstałe w procesie zamrażania-rozmrażania. Ani rodzaj wapienia, ani powierzchnia właściwa nie miały jednoznacznego wpływu na ubytek masy betonów.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazały na szereg pozytywnych efektów zastosowania wapienia jako dodatku do betonu. Betony z dodatkiem wapienia charakteryzowały się wyższą wytrzymałością 2dniową i 28 dniową, mniejszą przepuszczalnością chlorków i mniejszym ubytkiem masy po 100 cyklach zamrażania rozmrażania, oraz większą nasiąkliwością i powodowały pogorszenie konsystencji badanej stolikiem rozplwowym. Zaobserwowano następujący wpływ rodzaju wapienia na badane właściwości:

- W przypadku konsystencji betonu badanej stolikiem rozplwu i opadem stożka, powierzchnia właściwa wapienia odgrywała znaczącą rolę i wapienie o wyższej powierzchni właściwej w większym stopniu poprawiały konsystencję w obecności superplastyfikatora. Rodzaj wapienia nie miał wyraźnego wpływu na konsystencję.
- Rodzaj wapienia w większym stopniu niż powierzchnia właściwa wpływał na zawartość powietrza, należy jednak zauważyć że wpływ wapienia był niewielki.
- Wpływ wapienia na wytrzymałość jest zależny w większym stopniu od rodzaju wapienia, niż powierzchni właściwej, natomiast dokładny charakter tego wpływu wymaga dodatkowych badań.
- Nie zaobserwowano jednoznacznego wpływu ani rodzaju wapienia, ani wpływu uziarnienia i powierzchni właściwej na nasiąkliwość.
- Nie ma jasnego związku pomiędzy uziarnieniem badanych wapieni czy ich powierzchnią właściwą a przepuszczalnością chlorków.
- Wpływ uziarnienia na przepuszczalność chlorków jest większy niż rodzaju wapienia, natomiast nie ma jasnego związku pomiędzy uziarnieniem badanych wapieni czy ich powierzchnią właściwą a przepuszczalnością chlorków.
- Ani rodzaj wapienia, ani powierzchnia właściwa nie miały jednoznacznego wpływu na spadek wytrzymałości, ani na ubytek masy betonów.

2. Literatura

- [1] CEMBUREAU The European Cement Association, Cements for a low-carbon Europe, CEMBUREAU The European Cement Association, 2013.
- [2] Spajamy Europejski Zielony Ład – ROADMAP 2050, (n.d.).
https://www.polskicement.pl/content/uploads/2025/01/CEMBUREAU-2050-ROADMAP_PL-OK-final.pdf (accessed May 24, 2025).
- [3] Z. Krzowski, Mineralogia i petrografia dla inżynierów budownictwa i drogownictwa, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2005.
- [4] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność,.
- [5] M. Zajac, A. Rossberg, G. Le Saout, B. Lothenbach, G.L. Saout, B. Lothenbach, Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Composites* 46 (2014) 99–108.
- [6] T. Matschei, B. Lothenbach, F.P. Glasser, The role of calcium carbonate in cement hydration, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 551–558.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2006.10.013>.
- [7] P. Turcry, A. Loukili, P. Mounanga, J. Legrand, Influence of limestone filler on cement hydration and chemical shrinkage at early age, in: *Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures CONCREEP7*, Nantes, France, 2005. <https://hal.science/hal-01008328> (accessed May 24, 2025).
- [8] D. Wang, C. Shi, N. Farzadnia, Z. Shi, H. Jia, A review on effects of limestone powder on the properties of concrete, *Construction and Building Materials* 192 (2018) 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>.
- [9] G. Bajorek, M. Barć, S. Warchoł, Ł. Kosturkiewicz, Możliwość zastosowania mączek wapiennych jako dodatku w betonie, in: *Dni Betonu 2023*, Wisła, 2023: pp. 646–658.
- [10] C. Varhen, I. Dilonardo, R.C. de Oliveira Romano, R.G. Pileggi, A.D. de Figueiredo, Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes, *Construction and Building Materials* 125 (2016) 375–386.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.062>.
- [11] L. Courard, R. Degeimbre, A. Darimont, X. Willem, F. Michel, S. Flamant, S. Flamant, Some effects of limestone fillers as a partial substitute for cement in mortar composition, *ConMat'05 Third International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, Vancouver, Canada (2005).
- [12] J. Gołaszewski, M. Gołaszewska, G. Cygan, Performance of Ordinary and Self-Compacting Concrete with Limestone after Freeze–Thaw Cycles, *Buildings* 12 (2022) 2003. <https://doi.org/10.3390/buildings12112003>.
- [13] S. Grzeszczyk, P. Podkowa, W. Putra, Wpływ mączki wapiennej i granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie na właściwości betonów samozagęszczalnych, in: *Wisła*, 2008: pp. 533–542.
- [14] J. Gołaszewski, M. Gołaszewska, G. Cygan, Wpływ rodzaju mączki wapiennej na mrozoodporność betonów zwykłych i samozagęszczalnych, in: *Wisła*, 2021.

- [15] Y.-J. Kim, R. van Leeuwen, B.-Y. Cho, V. Sriraman, A. Torres, Evaluation of the Efficiency of Limestone Powder in Concrete and the Effects on the Environment, *Sustainability* 10 (2018) 550. <https://doi.org/10.3390/su10020550>.
- [16] Z. Guemmadi, M. Resheidat, H. Chabil, B. Toumi, Modeling the Influence of Limestone Filler on Concrete: A Novel Approach for Strength and Cost, *Jordan Journal of Civil Engineering* 3 (2009).
- [17] P. Boos, R. Haerdtl, Experience report Portland limestone cement, 2004.
- [18] N. Bouazza, A. El Mrihi, A. Maate, Geochemical Assessment of Limestone for Cement Manufacturing, *Procedia Technology* 9th Intern (2016) 211–218.
- [19] PN-EN 12350-5:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozplwowego,
- [20] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej -- Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka,
- [21] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 7: Zawartość powietrza -- Metody ciśnieniowe,
- [22] PN-88-B-06250 Beton zwykły,
- [23] ASTM C 1202-97 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration,
- [24] PN-B-06265:2018-10 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12,
- [25] Stefania Grzeszczyk, Reologia mieszanek betonowych z proszków reaktywnych – przegląd zagadnienia, *Cement Wapno Beton* 302–323. <https://doi.org/10.32047/CWB.2024.29.4.4>.
- [26] S. Adu-Amankwah, L. Black, Z. M, Effect of Limestone Addition on the Early Age Hydration and Microstructure Evolution of Composite Slag Cements, 2015. <http://eprints.whiterose.ac.uk/94482/>.
- [27] Artur Golda, Sebastian Kaszuba, Nasiąkliwość betonu – wymagania a metody badawcze, *Cement Wapno Beton* (2009) 308–313.