

inż. Zuzanna Woźniak^{1)*}
 ORCID: 0000-0002-0168-5684
 mgr inż. Adrian Chajec¹⁾
 ORCID: 0000-0001-5329-9534

Wpływ mączki granitowej na wybrane właściwości zapraw cementowych

Effect of granite powder in cementitious mortars: selected properties

DOI: 10.15199/33.2022.04.11

Streszczenie. Celem badań było określenie wpływu częściowego zastąpienia cementu mączką granitową na wybrane właściwości zapraw cementowych. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości mączki granitowej w zaprawie zmniejsza się średnica rozplywu. Jest to związane z dużą powierzchnią właściwą ziaren mączki granitowej w porównaniu z cementem. Gęstość objętościowa próbki referencyjnej jest mniejsza niż próbek z mączką granitową. Ponadto dodatek mączki granitowej skraca proces wiązania o ok. 25 min i ma pozytywny wpływ na temperaturę świeżej zaprawy w porównaniu z próbką referencyjną. Powoduje jej obniżenie, co może ułatwić proces betonowania w warunkach letnich. Częściowa zamiana cementu mączką granitową powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie do 6% oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do 18,7% w porównaniu z próbką referencyjną.

Słowa kluczowe: odpady mineralne; konsystencja; gęstość objętościowa; czas początku i końca wiązania, temperatura.

Abstract. The aim of these studies is to determine the effect of partial replacement of cement with granite powder on selected properties of cement mortars. It was found that the spreading diameter decreased with the increase in the content of granite powder in the mortar. This is due to the large specific surface area of granite powder grains compared to cement. The volume density of the reference sample is lower than that of the samples with granite powder. The addition of granite powder shortens the setting process by 25 minutes, compared to the reference sample and has a positive effect on the temperature of the fresh mortar by lowering it, which may have a positive effect on the concreting process in summer conditions. Partial replacement of cement with granite powder results in a reduction up to 6% of the compressive strength compared to the reference sample and a reduction of up to 18.7% of the bending tensile strength.

Keywords: granite powder; consistency; mixture density; binding start and end time; temperature.

Szacuje się, że cement odpowiada za 5% całkowitej antropogenicznej emisji CO₂ i 7% zużycia paliw przemysłowych [1]. Zapotrzebowanie na cement stale rośnie. Rozwiązaniem tego problemu może być wykonywanie kompozytów cementowych z częściowym zastąpieniem cementu odpadami pochodzącymi z obróbki surowców naturalnych [2 ÷ 4].

Produktem ubocznym obróbki granitu jest mączka granitowa. Jej pokłady zwiększają się od wielu lat. Dodatek mączki granitowej do kompozytów cementowych wykorzystywany jest głównie w celu zwiększenia gęstości upakowania mieszanki, a w efekcie wytrzymałości na ściskanie kompozytu cementowego. Uzyskanie odpowiednich wyników zależy jednak od wielkości ziarna i zanieczyszczenia materiału. Częściowe zastąpienie cementu mączką granitową może zatem nie tylko zmniejszyć koszty związane z utylizacją tego mate-

riału, ale także zoptymalizować właściwości kompozytów.

Głównym celem badań przedstawionych w artykule jest określenie wpływu częściowego zastąpienia cementu mączką granitową na wybrane właściwości zapraw cementowych. Zbadano konsystencję; zmianę temperatury podczas wiązania; czas początku i końca wiązania oraz gęstość objętościową, a także wytrzymałość kompozytu cementowego na rozciąganie przy zginaniu i ściskanie. Otrzymane wyniki porównano z wartościami uzyskanymi w przypadku próbki referencyjnej bez dodatku mączki granitowej.

Metody badań

W celu określenia wpływu mączki granitowej na właściwości zapraw cementowych przeprowadzono badania czterech serii mieszanek, których skład opisano w tabeli 1. Spoiwem próbki referencyjnej był cement portlandzki CEM I 42,5R. Trzy serie wykonano z uwzględnieniem częściowej zamiany cementu za pomocą dodatku mączki granitowej. W pierwszej kolejności dokonano analizy sitowej mączki granitowej i cemen-

Tabela 1. Składniki zaprawy cementowej użytej do badań

Table 1. Components of cementitious mix used for testing

Seria	Cement CEM I 42,5R [kg/m ³]	Mączka granitowa [kg/m ³]	Piasek [kg/m ³]	Woda [kg/m ³]	w/c [-]
REF	240	0	960	96	0,40
GP10	216	24	960	96	0,44
GP20	192	48	960	96	0,50
GP30	168	72	960	96	0,57

tu. Następnie wykonano serie mieszanek zgodnie z tabelą 1. Do badania użyto mączki granitowej o gęstości 2,15 ± 0,2 g/cm³ i powierzchni właściwej 3950 cm²/g, cementu portlandzkiego CEM I 42,5R o gęstości 3,10 g/cm³ i powierzchni właściwej 3650 cm²/g, kruszywa o frakcji 0 – 1,8 mm oraz wody z miejskich wodociągów. Skład chemiczny spoiwa zastosowanego w badaniu opisuje tabela 2. Zgodnie z normą PN-B-10104:2014-03 [5] wyróżnia się trzy odmiany zapraw cementowych w zależności od stosunku cementu do kruszywa: 1 : 2; 1 : 3; 1 : 4. Zdecydowano się na stosunek spoiwa do kruszywa 1 : 4 w celu zminimalizowania wyko-

¹⁾ Politechnika Wroclawska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,

^{*)} Adres do korespondencji: zuzannazofiawozniak@gmail.com

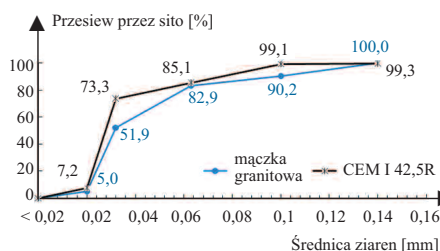
Tabela 2. Skład chemiczny spoiw użytych w badaniu [%]
Table 2. Chemical composition of binder used in research [%]

Składnik	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	FeO	NaO
CEM I 42,5R	–	1,54	5,73	18,86	5,89	1,30	63,94	2,75	–
Mączka granitowa	2,00	6,00	20,00	54,00	–	3,00	8,00	4,00	3,00

rzystania składników mających negatywny wpływ na środowisko. Mieszanie odbyło się w trybie trójstopniowym zgodnie z PN-EN 206+A1:2016-12 [6]. W pierwszej kolejności wymieszano kruszywo z 1/3 ilości wody. Następnie dodano cement lub cement modyfikowany mączką granitową. Podczas kolejnego mieszania dodano pozostałą ilość wody i poddano procesowi mieszania po raz trzeci przez 60 s. Po zakończeniu procesu mieszania sprawdzono temperaturę mieszanki. Ponadto wykonano badanie początku i końca wiązania za pomocą aparatu Vicata, zgodnie z normą PN-EN 196-3:2016-12 [7], a następnie badanie konsystencji mieszanki za pomocą stolika wstrząsowego oraz określono jej gęstość objętościową. Gęstość mieszanki została wyznaczona w takim samym czasie od wymieszania składników, aby można było porównać wyniki wszystkich serii badawczych. Po upływie 30 min od wymieszania składników zmierzono temperaturę po raz drugi. Po zakończeniu badań mieszankę ułożono w przygotowanych formach o wymiarach 40 x 40 x 160 mm. Próbkę rozformowano po 24 h i przetrzymywano na powietrzu w temperaturze 20 ± 2°C i o wilgotności względnej ok. 55%. Po 28 dniach przeprowadzono badanie wytrzymałości na zginanie na trzech belkach i wytrzymałości na ściskanie na sześciu belkach z każdej serii wg PN-EN 1015-11 [8]. Następnie obliczono wytrzymałość średnią każdej serii, określono odchylenie standardowe oraz błąd względny. Najpierw wykonano badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (3 próbki z każdej serii badawczej) zgodnie z [6], a następnie na połówkach beleczek badanie wytrzymałości na ściskanie (6 próbek z każdej serii badawczej).

Wyniki badań i ich analiza

Porównano krzywą przesiewu składników podlegających modyfikacji ilościowej w mieszance (rysunek 1). **Krzywa przesiewu** mączki granitowej i ce-



Rys. 1. Krzywa przesiewu materiałów będących spoiwem w przeprowadzonych badaniach

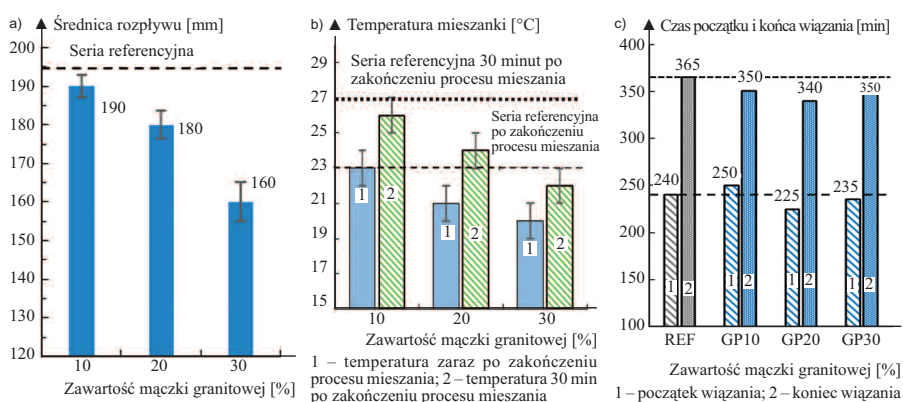
Fig. 1. Particle size distribution of binders used in research

mentu jest podobna, ale ilość ziaren mączki granitowej przechodząca przez oczko sita 0,06 mm wynosi 82,9%, a cementu 85,1%. Większa jest także ilość cząstek cementu przechodząca przez oczko sita 0,02 mm i wynosi 7,2%, a mączki granitowej 5%. Rysunek 2a przedstawia wyniki badania konsystencji mieszanek, rysunek 2b zmianę temperatury określoną natychmiast po zakończeniu procesu mieszania i po 30 min od pierwszego pomiaru temperatury, a rysunek 2c czas początku i końca wiązania poszczególnych serii.

Konsystencja zaprawy ma istotny wpływ na jej przyczepność do podłoża. W zależności od rodzaju podłoża zmie-

nia się ilość wody potrzebnej do wchłonięcia z zaprawy, aby uzyskać maksymalną przyczepność pozwalającą na scalenie elementów. Wraz ze wzrostem ilości dodatku mączki granitowej zmniejsza się średnica rozplywu zaprawy. W przypadku zamiany 30% cementu mączką granitową nastąpiło zmniejszenie rozplywu o 35 mm. Wiąże się to z większą chropowatością mączki granitowej niż cementu kojarzoną z powierzchnią właściwą ziarna. Powierzchnia właściwa ziaren mączki granitowej jest o 300 cm²/g większa niż cementu, co może prowadzić do większej wodożądności mieszanki. Z rysunku 2a wynika, że następuje zmniejszanie rozplywu wraz ze zwiększającą się ilością mączki granitowej w zaprawie. Podobne wnioski sformułowała Vijayalakshmi [9], która badała wpływ mączki granitowej na konsystencję mieszanki przez częściową zamianę piasku dodatkiem mączki.

W celu określenia wpływu mączki granitowej na zmianę temperatury, w zależności od czasu po wymieszaniu składników, zdecydowano się na pomiar temperatury mieszanki. Zmiana temperatury mieszanek w czasie wpływa na czas ich możliwego transportu. Widoczna jest różnica temperatury zależnie od ilości cementu zastąpionego mączką granitową (rysunek 2b). Temperatura po 30 min od zakończenia procesu mieszania jest o 2 – 4°C wyższa od temperatury mierzonej zaraz po jego zakończeniu. Różnica temperatury pomiędzy



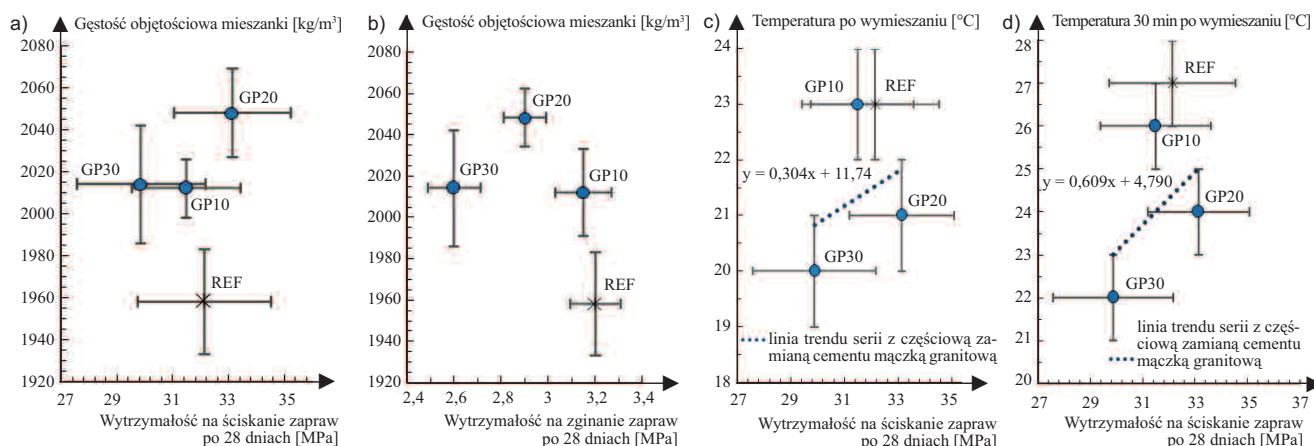
Rys. 2. Badanie konsystencji zaprawy, z częściowym zastąpieniem cementu dodatkiem mączki granitowej, za pomocą stolika wstrząsowego (a); temperatura mieszanki po wymieszaniu i 30 min po zakończeniu procesu mieszania w odniesieniu do procentowej zawartości mączki granitowej w zaprawie (b); czas początku i końca wiązania zapraw z częściowym zastąpieniem cementu dodatkiem mączki granitowej (c)

Fig. 2. Mortar with partial replacement of cement with addition of granite powder consistency test using shaking table (a); temperature of the mixture after mixing and 30 min after the end of the mixing process in relation to the percentage of granite powder in the mortar (b); time of beginning and end setting of mortars with partial replacement of cement with the addition of granite powder (c)

REF a GP30 wynosi 3°C w przypadku mieszanki badanej bezpośrednio po zmieszaniu i 5°C w przypadku mieszanek testowanych po 30 min. Zaobserwowano obniżanie się temperatury wraz ze wzrostem ilości mączki granitowej w mieszance. Cecha ta może ułatwić np. prace betoniarские w warunkach letnich. Niższa temperatura mieszanki wpływa bowiem pozytywnie na betonowanie w podwyższonej temperaturze otoczenia. Z rysunku 2c wynika, że dodatek mączki granitowej skraca proces wiązania nawet o 25 min w porównaniu z próbką referencyjną. Różnica pomiędzy trwaniem czasu procesu wiązania w przypadku serii GP20 i GP30 a REF wynosiła jedynie 10 min, co stanowi 8% całkowitego czasu wiązania serii REF. W przypadku serii GP10 i REF różnica ta wynosi 25 min, co odpowiada 20% czasu wiązania serii REF. Początek wiązania poszczególnych serii różnił się maksymalnie o 25 min, ale w porównaniu z próbką referencyjną największa różnica tej właściwości wynosiła 15 min w przypadku serii GP30, co stanowi 6,25% czasu od momentu wymieszania do początku wiązania REF. Dodatek mączki granitowej skraca czas od momentu wymieszania do końca procesu wiązania, ale różnice te są niewielkie. Koniec czasu wiązania różnił się od 10 do 25 min w przypadku poszczególnych serii, co stanowi 3 – 7% czasu od wymieszania do końca wiązania serii REF.

Gęstość próbki referencyjnej jest mniejsza niż próbek z mączką granitową. Może być to związane ze zwiększoną wodozgodnością mączki granitowej oraz występowaniem większej części pylastej w jej uziarnieniu, co sprzyja uzyskaniu większej gęstości mieszanki. Podobne obserwacje opisano w badaniach [10]. Próbki z dodatkiem mączki granitowej wykazywały większą gęstość objętościową, np. seria GP20 o 90 kg/m³ większą gęstość objętościową i o 1 MPa większą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w porównaniu z serią referencyjną. Większa gęstość objętościowa mieszanki jest zwykle spowodowana mniejszą liczbą pustek powietrznych, ale mogą na to wpływać również morfologia ziaren składników czy wodozgodność mieszanki. Dodanie mączki granitowej uzupełnia stos okruszowy, zwiększa gęstość objętościową i może pozytywnie wpłynąć na wytrzymałość na ściskanie. Jak wynika z rysunku 3a, gęstość nie wpłynęła jednak w istotny sposób na wytrzymałość na ściskanie. Serie GP10 i GP30 wykazały mniejszą wytrzymałość na ściskanie od próbki referencyjnej. Różnica wynosi do 2 MPa w przypadku GP30, co stanowi ok. 6% całkowitej wytrzymałości na ściskanie próbki referencyjnej. Najmniejszą różnicę w porównaniu z wytrzymałością na ściskanie próbek REF stwierdzono w przypadku serii GP10. Wynosiła ona

0,6 MPa, co stanowi ok. 1,9% wytrzymałości serii REF. Zauważono również, że wraz ze wzrostem ilości mączki granitowej w mieszance zmniejsza się wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (rysunek 3b). Największa różnica pomiędzy serią REF a seriami z dodatkiem mączki granitowej wynosi 0,6 MPa w przypadku GP30. Obecnie projektuje się coraz bardziej wytrzymałe zaprawy, co nie oznacza, że ich wbudowanie będzie powodowało lepszą pracę muru. Zaprawa powinna być odpowiednio dobrana do elementu murowego. Istnieje różnorodność materiałów konstrukcyjnych do murowania, dlatego różnica wytrzymałości może w niektórych przypadkach wpłynąć korzystnie na element murowy w aspekcie współpracy elementu murowego i spoiny. Zmiana temperatury mieszanki w czasie ma istotny wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Wyższa temperatura prowadzi do skrócenia procesu wiązania, natomiast szybsze dojrzewanie próbki może powodować zwiększenie odparowania wody oraz jej pękanie i kurczenie się, co wpływa na wytrzymałość na ściskanie kompozytu cementowego. Ilość wydzielanego ciepła hydratacyjnego wpływa na temperaturę zaprawy oraz wytrzymałość na ściskanie [11]. W artykule [12] wykazano, że całkowita ilość wydzielanego ciepła hydratacji jest mniejsza w przypadku zaprawy z dodatkiem mączki wapiennej w porównaniu z refe-



Rys. 3. Zależność między: a) gęstością objętościową a wytrzymałością na ściskanie zaprawy po 28 dniach dojrzewania próbek; b) gęstością objętościową a wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu zaprawy po 28 dniach dojrzewania próbek; c) temperaturą zaraz po wymieszaniu i wytrzymałością na ściskanie; d) temperaturą 30 min po wymieszaniu a wytrzymałością na ściskanie stwardniałej zaprawy po 28 dniach

Fig. 3. Relationship between: a) bulk density and compressive strength of the mortar after 28 days of specimen maturation; b) bulk density and flexural strength of the mortar after 28 days of specimen maturation; c) temperature immediately after mixing and compressive strength; d) temperature 30 min after mixing and the compressive strength of the hardened mortar after 28 days

rencyjną, czyli bez dodatku. Podobnie jest w przypadku zaprawy z mączką granitową (rysunki 3c i d). Zaobserwowano liniową zależność pomiędzy temperaturą mieszanki a wytrzymałością na ściskanie. Najniższą temperaturę osiągnęła zaprawa GP30 i również najniższą wytrzymałość na ściskanie. Zbliżoną temperaturę do serii referencyjnej osiągnęła seria GP10, co wynika z niewielkiej różnicy składu zaprawy. Seria referencyjna wykazała największą różnicę temperatury w czasie 30 min, która wyniosła 4°C, w przypadku GP10 to 3°C, a GP20 i GP30 – 2°C. Zmiana temperatury w czasie wynosiła do 2°C w porównaniu z próbką referencyjną, a więc miała niewielki wpływ na proces wiązania.

Wnioski

Na podstawie wyników uzyskanych z badań stwierdzono, że:

- wraz ze wzrostem ilości mączki granitowej w mieszance zmniejsza się jej rozptył, co jest związane z kształtem, teksturą i chropowatością cząstek mączki granitowej;
- dodatek mączki granitowej powoduje zmianę wytrzymałości na ściskanie zaprawy w porównaniu z próbką referencyjną od 1,9% w przypadku GP10 do 6% w przypadku GP30. Mączka granitowa wykazuje niewielkie negatywne zmiany wytrzymałości w porównaniu z korzyściami jej zastosowania. Każda, nawet najmniejsza procentowa zamiana cementu innym materiałem może pozytywnie wpłynąć na środowisko. Problem związany z materiałem odpadowym, jakim jest mączka granitowa, może być rozwiązany przez zastosowanie tego materiału w zaprawach cementowych. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zapraw zmniejsza się wraz z dodatkiem mączki granitowej do 0,6 MPa w przypadku serii GP30, co stanowi ok. 18,7% całkowitej wytrzymałości serii REF. Istnieje wiele zapraw różniących się właściwościami mechanicznymi, dlatego też rodzaj zaprawy należy dobierać odpowiednio do rodzaju materiału murowego;
- wraz ze wzrostem ilości mączki granitowej w mieszance zmniejsza się temperatura mieszanki zaraz po zakończeniu procesu mieszania i po 30 min od zakończenia tego procesu. Mączka grani-

towa powoduje obniżenie temperatury mieszanki, co może wpłynąć pozytywnie na proces betonowania w warunkach letnich. Niemniej dodatek mączki granitowej skraca proces wiązania o ok. 25 min w porównaniu z próbką referencyjną. Różnica pomiędzy czasem wiązania poszczególnych serii jest niewielka w porównaniu z całkowitym czasem od wymieszania do początku wiązania, ale nie należy jej bagatelizować, lecz dobrać odpowiednie przeznaczenie badanej zaprawy, np. do konstrukcji niewymagających długiego czasu wiązania.

W kolejnych badaniach należy przeprowadzić analizę wpływu mączki granitowej na pozostałe właściwości zapraw.

Literatura

- [1] Boesch ME, Hellweg S. Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. *Environmental Science and Technology*. 2010; doi: 10.1021/es100771k.
- [2] Czarnecki L. Moje poszukiwania prawdy w inżynierii materiałów budowlanych. *Materiały Budowlane*. 2020, vol. 8, no. 576, pp. 4 – 11.
- [3] Dębska B, Krasoń J, Lichoń L. Application of Taguchi method for the design of cement mortars containing waste materials. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2020; doi: 10.17512/bozpe.2020.1.02.
- [4] Szemiota N. Wpływ domieszki szkła wodnego na podciąganie kapilarnie zapraw cementowych. *Materiały Budowlane*. 2021; doi: 10.15199/33.2021.11.06.
- [5] PN-B-10104:2014-03 Wymagania dotyczące zapraw murarskich ogólnego przeznaczenia. Zaprawy murarskie według przepisu, wytwarzane na miejscu budowy.
- [6] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [7] PN-EN 196-3:2016-12. Oznaczenie czasów wiązania i stałości objętości.
- [8] PN-EN 1015-11:2020-04 Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.
- [9] Vijayalakshmi M, Sekar ASS, Ganesh Prabhu G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*. 2013; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018.
- [10] Chajec A. Granite powder vs. Fly ash for the sustainable production of air-cured cementitious mortars. *Materials*. 2021; doi: 10.3390/ma14051208.
- [11] Wilde K. Wpływ temperatury na zależność pomiędzy wytrzymałością zapraw na ściskanie a ilością wydzielonego ciepła hydratacji. *Monografie Technologii Betonu*. 2021; pp. 611 – 624.
- [12] Grzeszczyk S, Janowska-Renkas E. Wpływ mączki wapiennej jako mikrowypełniacza w cemencie na ciepło twardnienia. Materiały X Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Fizyka Budowli w teorii i praktyce”. 2005; pp. 111–117.

Autrzy uzyskali wsparcie finansowe z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR), (grant no. LIDER/35/0130/L-11/19/NCBR/2020 „Wykorzystanie odpadowej mączki granitowej do produkcji wybranych materiałów budowlanych”).

Przyjęto do druku: 28.02.2022 r.



AVASIL – The Water Repellent Forever

– spektakularny i trwały efekt hydrofobowy farb i tynków silikonowych,
– minimalna zdolność kumulacji zanieczyszczeń



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arboce@jrs.pl