

WPŁYW ZMIENNOŚCI LITOLOGICZNEJ MELAFIRÓW NA ZRÓŻNICOWANIE FIZYCZNYCH I MECHANICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI PRODUKOWANEGO Z NICH KRUSZYWA O UZIARNIENIU CIĄGŁYM

AN IMPACT OF LITHOLOGICAL VARIABILITY OF MELAPHYRES ON THE DIVERSIFICATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE ALL-IN AGGREGATES MANUFACTURED

Marek Rembiś - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geologii Złóżowej i Górniczej

Melafiry, występujące w obrębie badanego złoża, są zróżnicowane między sobą pod względem cech litologicznych, co wynika z różnego przebiegu procesów wulkanicznych oraz pomagmowych i hipergenicznych zachodzących na tym obszarze. Zarówno kopalina, jak i surowiec z niej pozyskiwany (kruszywo o ciągłym uziarnieniu), wykazują zróżnicowanie właściwości fizyczno-mechanicznych i cech użytkowych. Najbardziej wartościowe pod względem surowcowym są zwarte melafiry o teksturze aphanitowej, jednak ze względu na parametry uziarnienia i wartość wskaźnika nośności uzyskaną po ich zagęszczeniu, znajdują one ograniczone zastosowanie w budownictwie drogowym. Kruszywa wykonane z melafirów uziarnionych oraz z brekcji melafirowych są źle uziarnione i trudne do zagęszczenia. Zupełnie nieprzydatne do stosowania w budownictwie drogowym, ze względu na złe uziarnienie oraz niską wartość wskaźnika CBR, są kruszywa uzyskane z melafirów o strukturze porowato-migdałkowej. Dla poprawy jakości produkowanego kruszywa możliwe jest opracowanie technologii jego przeróbki, zapewniającej uzyskanie ciągłości uziarnienia oraz poprawę zagęszczalności i wskaźnika nośności.

Słowa kluczowe: melafiry, parametry uziarnienia, wskaźnik Los Angeles, wskaźnik nośności CBR

Melaphyres of the deposit in question differ among themselves in their lithological features, resulting in the differences of the volcanic, postmagmatic and hypergenic processes within the area. Therefore, both the rocks and the all-in aggregate manufactured have diversified physical-mechanical properties and usable qualities. The most valuable are compact melaphyres with the aphanitic texture, although the values of the graining parameters and load bearing coefficients (CBR ratio) of the consolidated aggregates limit their applicability to the road construction. In turn, the aggregates produced of the veined melaphyres and the melaphyre breccias are poorly grained and make problems with their consolidation. Completely useless for the road constructing are the aggregates produced of the melaphyres with the porous-amygdaloidal structure with the regard to their graining and low values of the CBR ratio. The quality of the aggregates could be improved developing a technology which provides all-in aggregate products that could be easier consolidated and would have higher CBR ratios (higher load-bearing capacity).

Keywords: melaphyres, graining parameters, Los Angeles coefficient, California bearing ratio (CBR)

Wstęp

Kruszywo o ciągłym uziarnieniu, zgodnie z zapisem normy PN-EN 13242: 2013, stanowi mieszankę kruszyw drobnych i grubych o najmniejszych ziarnach przechodzących przez sito 0,063 mm i największych, przekraczających wielkość 6,3 mm. Według Wymagań Technicznych WT-4 [19] mogą być one stosowane do wykonywania konstrukcji nawierzchni drogowych i ulepszonego podłoża, jak również konstrukcji innych nawierzchni przeznaczonych do ruchu.

Wymagania dla kruszywa przeznaczonego do wytwarzania mieszanek niezwiązanych i związanych hydraulicznie zawarte są w normach PN-S-06102: 1997, PN-EN 14227-1: 2007 i PN-EN

13242: 2010 [14, 12, 9] oraz Wymaganiach Technicznych WT-4 i WT-5 [19, 20]. Właściwa stabilizacja podbudowy lub nawierzchni, możliwa jest przy zastosowaniu kruszywa o ciągłym uziarnieniu, przy optymalnej jego wilgotności i odpowiednim zagęszczeniu. Z materiałowego punktu widzenia, kluczowe znaczenie mają fizyczno-mechaniczne właściwości kopaliny oraz skład ziarnowy mieszanki, decydujące o wartości jej poszczególnych parametrów, a w konsekwencji o właściwościach warstwy podłoża lub nawierzchni wykonanych z jej użyciem. Z tego względu, w niniejszej pracy skoncentrowano się na wykazaniu zależności pomiędzy zmiennością litologiczną kopaliny a właściwościami powstałego z niej kruszywa, na przykładzie melafirów pochodzących z jednego ze złóż występujących w regionie dolnośląskim.

Zmienność litologiczna kopaliny

Złoże, z którego pochodził materiał badawczy, charakteryzuje się zróżnicowaniem przestrzennym i geometrycznym występujących w nim kompleksów skalnych, warunkowanym procesami wulkanicznymi, związanymi z tworzeniem się potoków lawowych oraz pomagmowymi i hipergenicznymi. Zróżnicowanie to wyraża się także zmiennością petrograficzną i strukturalno-teksturalną tych skał, decydując o zróżnicowaniu ich własności technologicznych.

Kopalina najbardziej wartościową pod względem surowcowym są ciemnoszare, zwięzłe i twarde trachybazalty o teksturze afanitowej, określane potocznie jako melafiry lub paleobazalty. Ich wychodnie tworzą nieregularne, prawie pionowe słupy, które wyklinowują się ku górze (rys. 1). W niektórych partiach złoża skały te wykazują cechy petrograficzne typowe dla diabazów. Dominują w nich minerały z grupy piroksenów i plagioklazów, przy podrzędnym udziale oliwinu.

W niektórych miejscach wyrobiska, w których intensywnie rozwinął się system spękań, powstały rdzawo-czerwone brekcje melafirów złożone z ostrokrawędzistych okruchów melafiru, połączonych spoiwem o charakterze tufowo-ilastym (rys. 2).

We fragmentach wyrobiska, w których intensywność spękań górotworu jest mniejsza, mają one bardziej regularny przebieg. Dominują prostopadłe względem siebie, pionowe lub prawie pionowe, rzadziej poziome płaszczyzny spękań. Na ich powierzchni zaobserwować można rdzawy nalot utlenionych związków żelaza. Żyłki, występujące w obrębie melafirów dość licznie, zbudowane są z węglanów i krzemionki (rys. 3).

W miejscach, gdzie spękania mają jeszcze bardziej regu-

larny i uporządkowany charakter, wyraźnie uwidaczniają się spękania poziome lub prawie poziome, natomiast płaszczyzny pionowe są słabiej podkreślone (rys. 4). Melafiry, które są tu zwięzłe i twarde, o teksturze afanitowo-porfirowej, rozpadają się na kostki o charakterystycznych romboidalnym kształcie.

W partiach wyrobiska reprezentujących górne fragmenty potoku lawowego, bezładnie rozmieszczone są wiśniowo-brunatne melafiry porowato-migdałowcowe. Tworzą one bulaste formy, które są słabo spękane, a płaszczyzny spękań mają nieuporządkowany i nieregularny przebieg. Często są powyginane, otaczając fragmenty skał o zupełnie innej orientacji spękań. Melafiry mają charakterystyczną gąbczastą strukturę, wynikającą z obecności pustych porów o zróżnicowanych rozmiarach. Część porów uległa wtórnemu wypełnieniu głównie przez zeolity, węglany i kwarc.

Wydzielone typy skał mają zbliżony skład petrograficzny. Różnią się wzajemnie przede wszystkim ilościowym udziałem poszczególnych składników, sposobem wykształcenia i stopniem przeobrażenia minerałów.

Pomiędzy melafirami obecne są warstwy mułowców i łupków mułowcowych o miąższości od 0,5 m do 11 m oraz cienkie pokłady skał wulkanoklastycznych i porwaki piaszczyców (rys. 5).

Obserwowany system spękań i zmienność litologiczna skał świadczą o dużej dynamice i prawdopodobnie wieloetapowości kształtowania się złoża na etapie wylewów magmy. Prawdopodobnie w obręb potoków lawowych były wciągane fragmenty wcześniejszych wylewów, a nawet starszych skał osadowych. Istotny wpływ na powstanie spękań miały także późniejsze deformacje tektoniczne.



Rys. 1. Fragment ściany wyrobiska. Widoczny jest złożony system spękań z dominacją płaszczyzn o pionowym ułożeniu

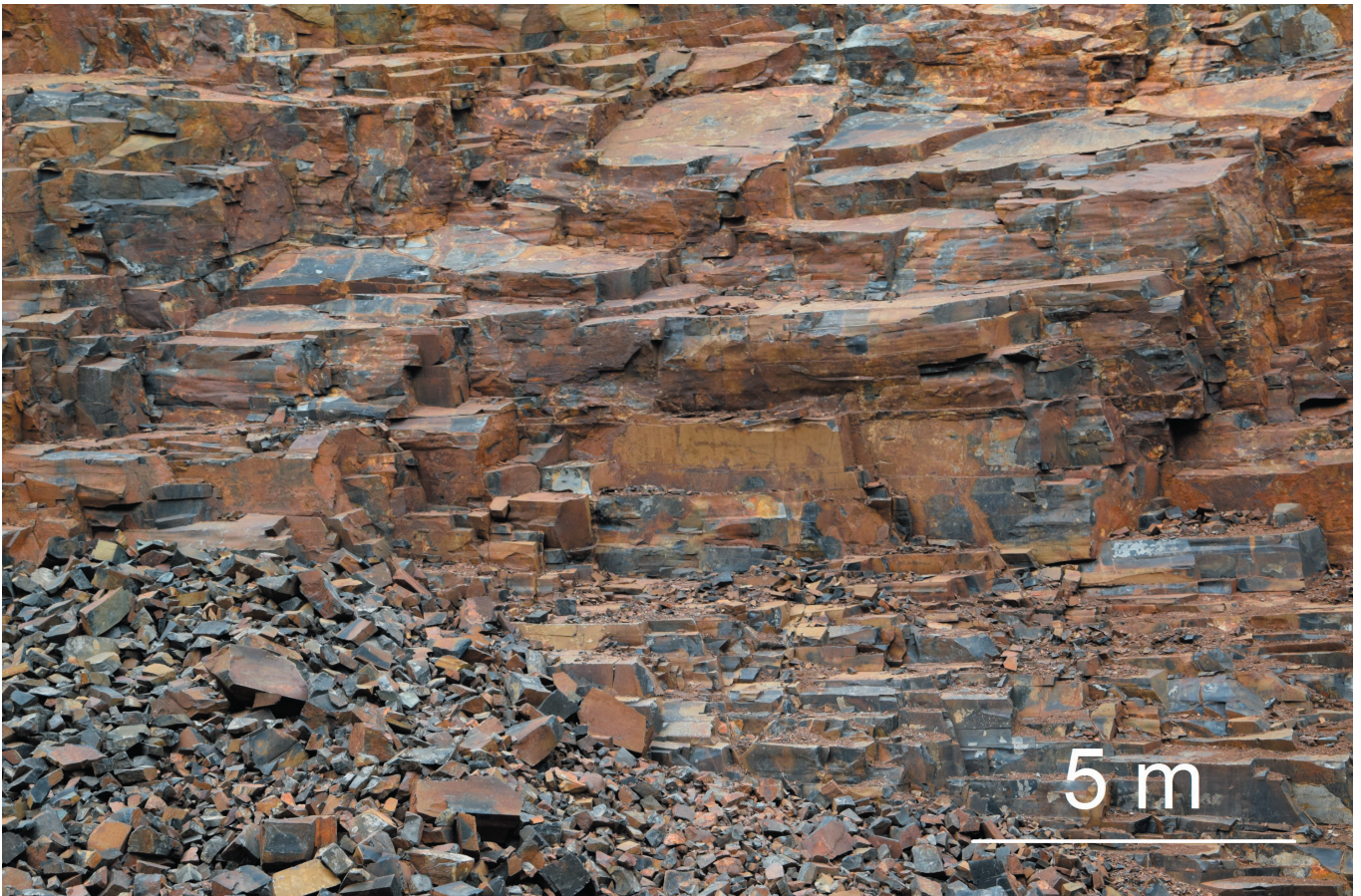
Fig. 1. A fragment of the part of the quarry. The rocks reveal complicated fracturing with the domination of the vertically developed surfaces



Rys. 2. Fragment bryły brekcji melafirowej
Fig. 2. A block of the melaphyre breccia (fragment)



Rys. 3. Fragment bloku melafirowego z licznymi żyłkami wypełnionymi kalcjtem
Fig. 3. A block of the melaphyre (fragment) with many veinlets filled with calcite



Rys. 4. Fragment ściany wyrobiska. Widoczne są silnie zaznaczone spękania poziome oraz słabiej zaznaczone płaszczyzny pionowe
 Fig. 4. A fragment of the part of the quarry. The rocks reveal strongly developed horizontal fracturing, while their vertical fracturing is weaker



Rys. 5. Fragment ściany wyrobiska. Warstwy mułowców i łupków mułowcowych występujące pomiędzy melafirami
 Fig. 5. A fragment of the part of the quarry. Layers of mudstones and mudstone shales occur within the melaphyres



Rys. 6. Kruszywo bez frakcji pylastej zdominowane przez melafiry o teksturze afanitowej i diabazy (próbka nr 1)

Fig. 6. The aggregate without the silt fraction: the product is dominated by the melaphyres with the aphanitic texture and by diabases (sample no. 1)



Rys. 7. Kruszywo bez frakcji pylastej zawierające głównie melafiry o strukturze porowato-migdałkowej oraz melafiry o teksturze afanitowej (próbka nr 4)

Fig. 7. The aggregate without the silt fraction: the product is dominated by the melaphyres with the porous-amygdaloidal structure and by the aphanitic melaphyres (sample no. 4)

Material i metody badań

Materiał badawczy składał się z dwóch rodzajów próbek. Pierwszy rodzaj stanowiły bryły skalne, pobrane ze ścian wyrobiska, reprezentujące melafiry o teksturze afanitowej oraz o strukturze porowato-migdałowcowej, a także brekcje melafirów. Na wykonanych z nich foremnych próbkach przeprowadzono badania gęstości objętościowej (PN-EN 1936: 2010) [7], nasiąkliwości (PN-EN 13755: 2008) [11] i wytrzymałości na ściskanie (PN-EN 1926: 2007) [6].

Drugi rodzaj materiału badawczego stanowiły próbki kruszywo o ciągłym uziarnieniu (mieszanek) 0/31,5 mm, reprezentujących kopalinę pochodzącą z różnych części wyrobiska:

- próbka nr 1: kruszywo zdominowane przez ziarna melafirów, o strukturze zwartej i teksturze afanitowej oraz diabazów (rys. 6)
- próbka nr 2: kruszywo z przewagą melafirów użyłonych oraz melafirów o teksturze afanitowo-porfirowej,
- próbka nr 3: kruszywo zawierające brekcje melafirów oraz melafiry o strukturze zwartej i teksturze afanitowej,
- próbka nr 4: kruszywo zawierające głównie melafiry o strukturze porowato-migdałowcowej oraz melafiry i diabazy o teksturze afanitowej (rys. 7).

Próbki te reprezentowały kruszywo wytworzone w kilkutygodniowych odstępach czasu, w tym samym zakładzie przerobczym, przy użyciu kruszarki szczękowej oraz stożkowej.

Właściwości mechaniczne kruszywa określono poprzez pomiar jego odporności na rozdrabnianie (LA) wykonany zgodnie z normą PN-EN 1097-2:2010 [5] oraz odporności na miażdżenie (wskaźnik rozkruszenia) określonej według PN-B-06714-40:1978 [3]. Pierwszy z tych parametrów, wyraża procentowy ubytek ziaren mniejszych niż 1,6 mm, zaistniały w wyniku ścierania w bębnie badawczym. Został on zbadany na przesianym kruszywie frakcji 10-14 mm. Wytrzymałość kruszywa na miażdżenie oznacza procentowy ubytek masy ziaren kruszywa, mniejszych niż 1 mm, powstały w wyniku miażdżenia próbki siłą nacisku równą 200 kN. Właściwość ta została określona na odsianej frakcji 4-8 mm.

Próbki kruszywa (mieszanki), zgodnie z zasadą podaną w normie PN-EN 933-1:2012 [4], zostały rozdzielone na frakcje przy użyciu mechanicznej wstrząsarki z sitami o średnicach zastępczych oczek kwadratowych: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 5,6; 8,0; 11,2; 16,0; 22,4 i 31,5 mm. Wykorzystując dane otrzymane z analizy sitowej, materiał został przeanalizowany pod kątem jego zdolności do zagęszczania. W tym celu wyznaczono na podstawie wzorów (1) i (2) wskaźnik jednorodności uziarnienia C_U i wskaźnik krzywizny uziarnienia C_C , charakteryzujące uziarnienie mieszanek.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{(d_{10} \cdot d_{60})} \quad (2)$$

gdzie:

d_{10} , d_{30} , d_{60} – średnice ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiednio 10%, 30% i 60% masy badanej próbki mieszanki.

Przydatność kruszywa jako materiału przydatnego do stabilizacji podbudowy i wykonywania konstrukcji nawierzchni

drogowych, określono poprzez badania kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR wykonane zgodnie z PN-EN 13286-47:2012 [10]. Parametr ten wyraża stosunek siły p , której należy użyć, aby trzpień w kształcie wydłużonego bolca walcowego wcisnąć w odpowiednio przygotowaną próbkę gruntu lub kruszywa do głębokości 2,5 mm lub 5,0 mm ze znormalizowaną prędkością, do siły standardowej p_s , którą trzeba zastosować aby taki sam trzpień, z taką samą prędkością oraz na taką samą głębokość wcisnąć w kruszywo standardowo zagęszczone. Zgodnie z wytycznymi technicznymi WT-4, próbki zostały wcześniej pięciokrotnie zagęszczone do wskaźnika zagęszczenia $I_s = 1$ przy użyciu energii zagęszczenia równej 0,577 MJ/m³. Badanie wykonano przy wilgotności optymalnej bez nasycania wodą oraz przy wilgotności optymalnej po nasycaniu wodą w czasie 96 godzin, dzięki czemu możliwe było ustalenie wrażliwości badanego kruszywa na zmiany wilgotności. Wskaźnik nośności określono ze wzoru (3):

$$CBR = \frac{p}{p_s} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

p - obciążenie jednostkowe niezbędne do wciśnięcia walcowego trzpienia o średnicy $d = 5$ cm w odpowiednio przygotowaną próbkę kruszywa do określonej głębokości 2,5 mm lub 5,0 mm, z jednostajną prędkością równą 1,25 mm · min⁻¹,

p_s - ciśnienie porównawcze, które podczas zagłębienia trzpienia na 2,5 mm wynosi 13,2 MPa, a przy zagłębieniu na 5,0 mm wynosi 20 MPa.

Wyniki badań

Badania wykazały, że podobnie jak w innych skałach wulkanicznych [14, 15], najkorzystniejsze wartości parametrów fizyczno-mechanicznych posiadają zwarte melafiry o teksturze afanitowej. Charakteryzują się one wysoką wytrzymałością na ściskanie w zakresie 188-317 MPa, niewielką nasiąkliwością wynoszącą 0,07-0,70%, a także dużą gęstością objętościową od 2,63 Mg/m³ do 2,71 Mg/m³ (tab. 1). Zdecydowanie gorszą jakość wykazują skały pozostałych odmian. Brekcje melafirów, zawierające w spoiwie niekiedy znaczny udział minerałów ilastych, posiadają gęstość objętościową w zakresie 2,43-2,62 Mg/m³, nasiąkliwość od 0,47-7,86% oraz wytrzymałość na ściskanie w przedziale 61-122 MPa. Z kolei melafiry odmiany porowato-migdałowcowej, z przejawami przeobrażenia i obecnością porów częściowo wypełnionych wtórnymi minerałami, posiadają wytrzymałość na ściskanie wynoszącą od 87 MPa do 111 MPa, niewielką gęstość objętościową (2,21-2,32 Mg/m³) i bardzo dużą nasiąkliwość dochodzącą do 11,21% (tab. 1).

Przedstawiona zmienność wartości fizyczno-mechanicznych właściwości kopaliny znajduje swój wyraz także w zróżnicowaniu parametrów kruszywo z niej uzyskanych. Badania wykazały, że największą odpornością na rozdrabnianie i miażdżenie charakteryzuje się kruszywo pozyskane z odmiany afanitowej (próbka nr 1). Wartość wskaźnika LA wynosi 13% (tab. 2), dzięki czemu omawiane kruszywo kwalifikuje się do najlepszych kategorii: LA₁₅ (według normy PN-EN 13043:2004) oraz LA₂₀ (według normy PN-EN 13242:2010). Tym samym spełnia ono wymagania WT-4 w zakresie jego przydatności do wszystkich rodzajów podbudowy oraz podłoża i nawierzchni drogowych. Wartość wskaźnika rozkruszenia, będącego miarą oznaczenia wytrzymałości kruszywa na miażd-

Tab. 1. Zmienność fizyczno-mechanicznych właściwości melafirów
 Tab. 1. Variability of the physical and mechanical properties of the melaphyres

Rodzaj skały <i>Type of the rock</i>	Nazwa parametru i metoda badania. <i>Parameter and the method of its determination</i>		
	Gęstość objętościowa <i>Bulk density</i> (PN-EN 1936: 2010) [Mg/m ³]	Nasiąkliwość <i>Water absorption</i> (PN-EN 13755: 2008) [%]	Wytrzymałość na ściskanie <i>Compression strength</i> (PN-EN 1926: 2007) [MPa]
	od-do; średnio <i>from-to; average</i>		
Melafir o teksturze afanitowej <i>Melaphyre with the aphanitic texture</i>	2,63-2,71 2,69	0,07-0,70 0,35	188-317 276
Melafir o strukturze porowato-migdałowcowej <i>Melaphyre with the amygdaloidal structure</i>	2,21-2,32 2,29	3,10-11,21 5,77	87-111 95
Brekcja melafirowa <i>Melaphyre breccia</i>	2,43-2,62 2,51	0,47-7,86 3,99	61-122 104

dzenie, jest równa 4,4%, a zatem według normy PN-86/B-06712 [2] może być ono stosowane także do wysokojakościowych betonów.

Nieznacznie mniejszą odporność na rozdrabnianie (15%) wykazuje kruszywo zawierające duży udział użylonych melafirów (próbka nr 2). Mimo tego należy ono także do tych samych kategorii: LA₁₅ (według normy PN-EN 13043:2004) oraz LA₂₀ (według normy PN-EN 13242:2010) i może być stosowane w budownictwie drogowym. W przypadku odporności na miażdżenie różnica pomiędzy obiema odmianami jest prawie dwukrotnie większa, gdyż wartość tego parametru wynosi aż 8,7%. Wskutek tego wykazuje ono przydatność jedynie do gorszych jakościowo betonów. Uzyskane wyniki wskazują, że żyłki stanowią w melafirach uprzywilejowane powierzchnie, wzdłuż których dość łatwo dochodzi do pęknięcia skały w trakcie jej miażdżenia, natomiast nie wykazują one nadmiernej podatności na ścieranie podczas badania w bębnie Los Angeles.

Próbka nr 3 reprezentująca kruszywo pozyskane z brekcji melafirowej i melafiru afanitowego posiada odporność na rozdrabnianie na poziomie 20%, a odporność na miażdżenie równą 11,3%. Wpływ na taką, stosunkowo dużą podatność mechaniczną kruszywa, ma najprawdopodobniej obecność

minerałów ilastych stanowiących spoiwo brekcji. Według klasyfikacji zawartej w normie PN-EN 13242:2010 kruszywo należy nadal do najlepszej kategorii, natomiast norma PN-EN 13043:2004 zalicza je już do kolejnej, nieco gorszej kategorii LA₂₀. Pozwala to na stosowanie kruszywa we wszystkich warstwach konstrukcyjnych nawierzchni drogowych i w ich podłożu.

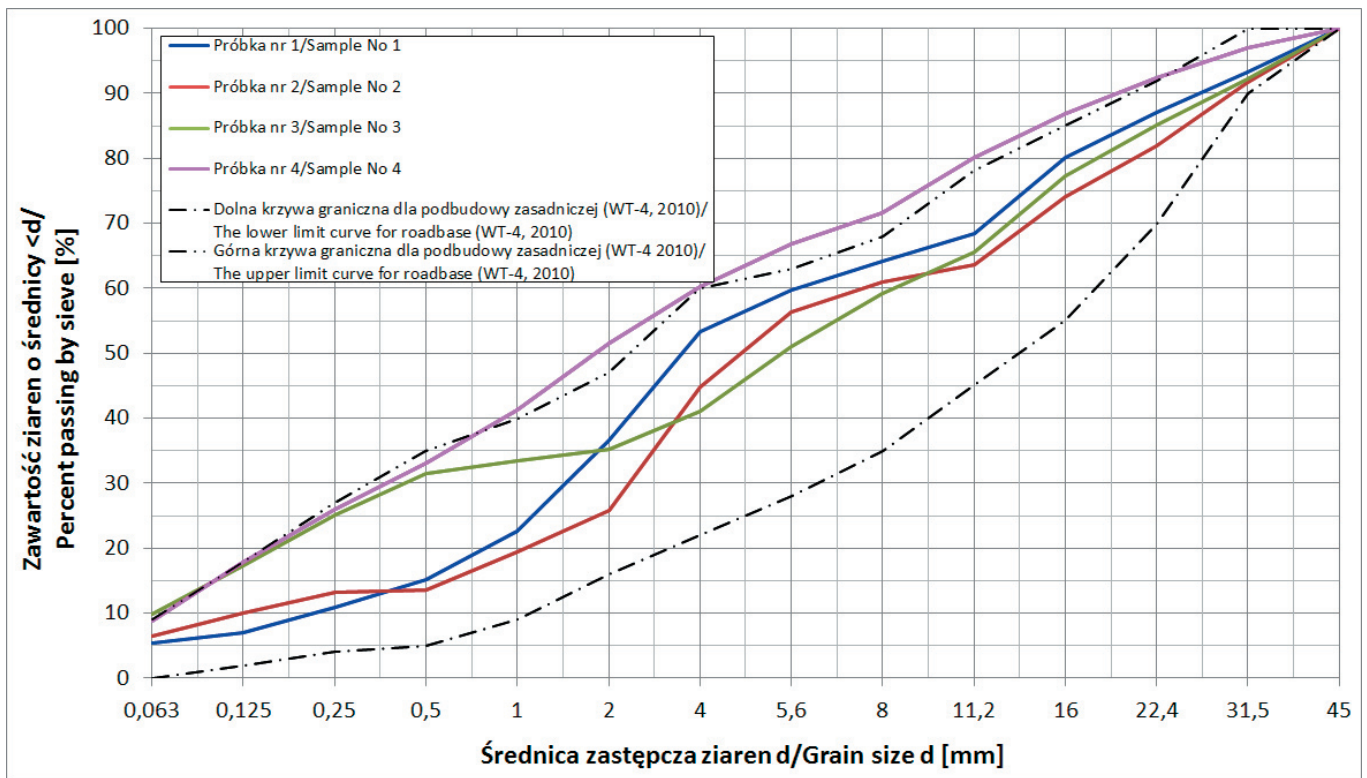
Najmniejszą zwięzłością charakteryzuje się kruszywo pozyskane z porowato-migdałowcowej odmiany melafirów (próbka nr 4), które obok dużej liczby porów zawierają znaczny udział miękkiej substancji, stanowiącej częściowo ich wypełnienie. Odporność na rozdrabnianie takiego kruszywa jest równa 37%, natomiast odporność na miażdżenie wynosi 24,9% (tab. 2). Według wymagań obu wspomnianych norm kruszywo należy do kategorii LA₄₀ i zgodnie z zapisem WT-4 może być stosowane we wszystkich rodzajach podbudowy oraz w podłożu i nawierzchni.

W przypadku kruszyw, oprócz właściwości fizycznych i mechanicznych, ważną ich cechą jest skład granulometryczny, który w pierwszej kolejności decyduje o kategorii uziarnienia. Uzyskane wyniki badań odniesione do wymagań dotyczących uziarnienia kruszywa, zawartych w normach, umożliwiły zaliczenie badanych kruszyw do kategorii G_A90 według normy PN-EN 13043:2004 oraz do kategorii G_A85 według normy PN-EN 13242:2010. Ponadto, kruszywa przydatne do stabilizacji podbudowy i wykonywania konstrukcji nawierzchni drogowych, powinny według wymagań technicznych WT-4, charakteryzować się ciągłością uziarnienia, a krzywa przesiewu (krzywa uziarnienia) winna mieścić się w odpowiednim polu wytyczonym krzywymi granicznymi. W szczególności nie może zachodzić sytuacja, w której dla frakcji określonych sąsiednimi sitami, krzywa uziarnienia kruszywa przebiegałaby od dolnej do górnej krzywej granicznej uziarnienia.

Analiza krzywej uziarnienia kruszywa zawierającego głównie zwięzłe melafiry o teksturze afanitowej (próbka nr 1) wykazała, że charakteryzuje się ono niecałkowicie ciągłym uziarnieniem. Wykres ma niejednorodny przebieg z licznymi załamaniami wskazującymi na nadmiernie duży lub zbyt

Tab. 2. Zmienność mechanicznych właściwości badanych kruszyw
 Tab. 2. Variability of the mechanical properties of the aggregates tested

Numer próbki <i>Sample number</i>	Odporność na rozdrabnianie <i>Resistance to fragmentation</i> (LA) wg PN-EN 1097-2:2010 [%]	Odporność na miażdżenie <i>Resistance to crushing</i> wg PN-B-06714-40:1978 [%]
1	13	4,4
2	15	8,7
3	20	11,3
4	37	24,9



Rys. 8. Krzywe uziarnienia badanych kruszyw
Fig. 8. The grading curves of the tested aggregates

mały udział ziaren poszczególnych frakcji (rys. 8). Pomimo, iż krzywa uziarnienia kruszywa mieści się w granicach pola określonego wymaganiami technicznymi WT-4, to jednak dla frakcji 4-8 mm nadmiernie zbliża się ona do górnych wartości granicznych pola tzw. dobrego uziarnienia. Rozkład uziarnienia tego kruszywa jest wielomodalny (rys. 9), jednak wykazuje ono korzystne wartości wskaźnika krzywizny uziarnienia $C_c = 1,89$ oraz wskaźnika różnoziarnistości $C_u = 37,54$ (tab. 2). W związku z tym, według klasycznego podziału [18] jest ono bardzo różnoziarniste, gdyż $C_u > 15$ i dobrze uziarnione, ponieważ spełniony jest warunek, że $C_c = 1 \div 3$. Według PN-EN ISO 14688-2:2006 [13] odpowiada ono gruntowi wielofrakcyjnemu. Zatem jest ono łatwo zagęszczalne, a tym samym przydatne do budowy podbudów i nasypów, w tym także do warstw ochronnych nowo budowanych dróg kolejowych o prędkości maksymalnej pociągów 160–250 km/h [17].

W próbce nr 2 reprezentującej melafiry użyłone i afanito-porfirowe, zauważa się, że w trakcie procesu produkcji kruszywa dość łatwo uległy rozdrobieniu ziarna frakcji 5,6-8 mm, wskutek czego zachowały się one tylko w niewielkim udziale. W zamian za to doszło do względnego wzrostu udziału ziaren sąsiednich frakcji drobniejszych (2-4 mm) (rys. 8, 9). Wyraża się to znacznie większą, niż w próbce nr 1 wartością wskaźnika

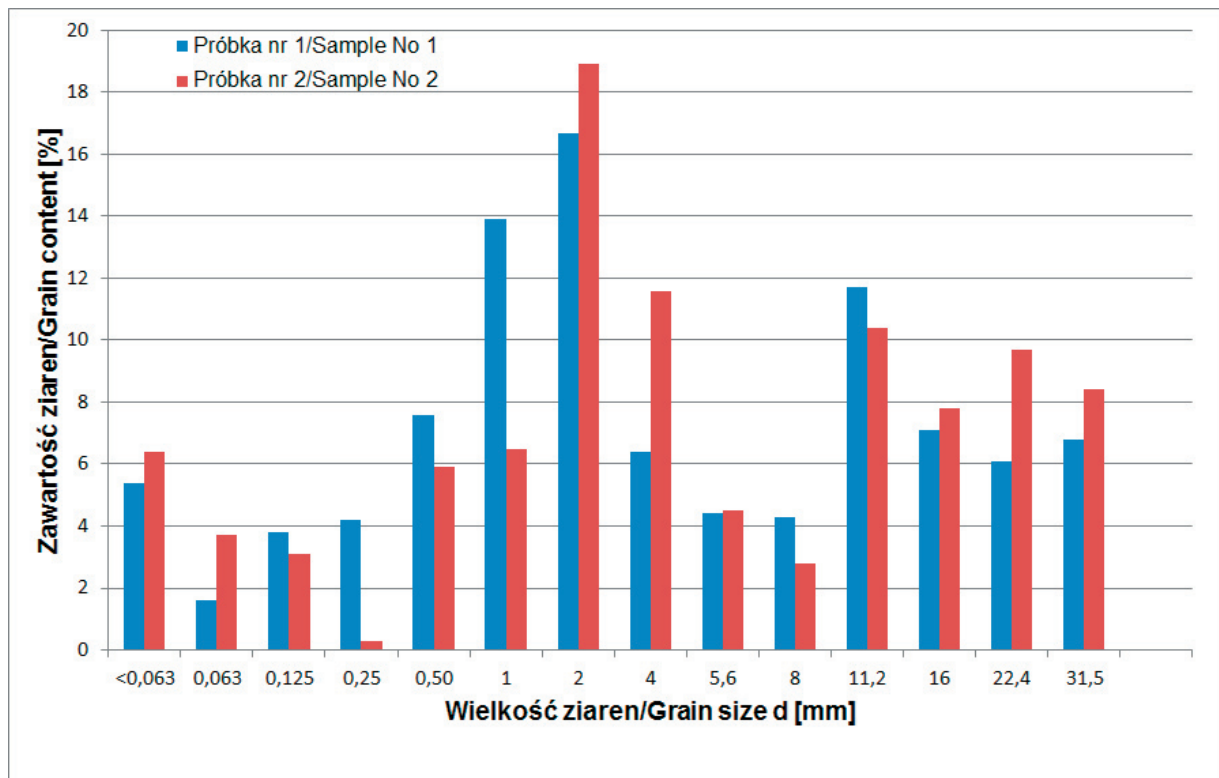
różnoziarnistości C_u równą 60,08 oraz wskaźnika krzywizny uziarnienia C_c wynoszącą 6,25 (tab. 3). Kruszywo jest wprawdzie również bardzo różnoziarniste, lecz źle uziarnione i trudne do zagęszczenia.

Odmiennym uziarnieniem charakteryzują się kruszywa uzyskane z brekcji melafirowej (próbka nr 3) oraz z melafirów o strukturze porowato-migdałowcowej z domieszką melafirów afanitowych (próbka nr 4). Obie próbki kruszywa wykazują nadmierny udział frakcji najdrobniejszych (poniżej 0,063 mm), zasobnych głównie w minerały ilaste oraz produkty przeobrażenia składników mineralnych melafirów. W próbce nr 3 dodatkowo zaobserwowano, że rozdrobnienie brekcji wywołane kruszeniem, spowodowało niewielki niedobór ziaren kruszywa o rozmiarach większych od 16,0 mm, a zarazem wpłynęło na dość duży udział frakcji 0,063-0,25 mm (rys. 10). Ze względu na wysoką wartość wskaźnika różnoziarnistości ($C_u = 133,81$) kruszywo to jest bardzo różnoziarniste, jednocześnie jednak wartość wskaźnika C_c wynosząca 0,36 (tab. 3), klasyfikuje je poza grupą mieszanek dobrze zagęszczalnych – jako kruszywo źle uziarnione.

Analiza przebiegu krzywej uziarnienia próbki nr 4 wskazuje, że proces kruszenia melafirów o strukturze porowato-migdałowcowej zachodził dość intensywnie i w efekcie doprowadził do zubożenia kruszywa o ziarna frakcji 11,2-31,5 mm, przy

Tab. 3. Parametry uziarnienia badanych kruszyw
Tab. 3. Graining parameters of the tested aggregates

Parametry uziarnienia Graining parameters	Numer próbki Sample number			
	1	2	3	4
Wskaźnik krzywizny uziarnienia C_c Coefficient of curvature C_c	1,89	6,25	0,36	0,58
Wskaźnik różnoziarnistości C_u Coefficient of uniformity C_u	37,54	60,08	133,81	57,97



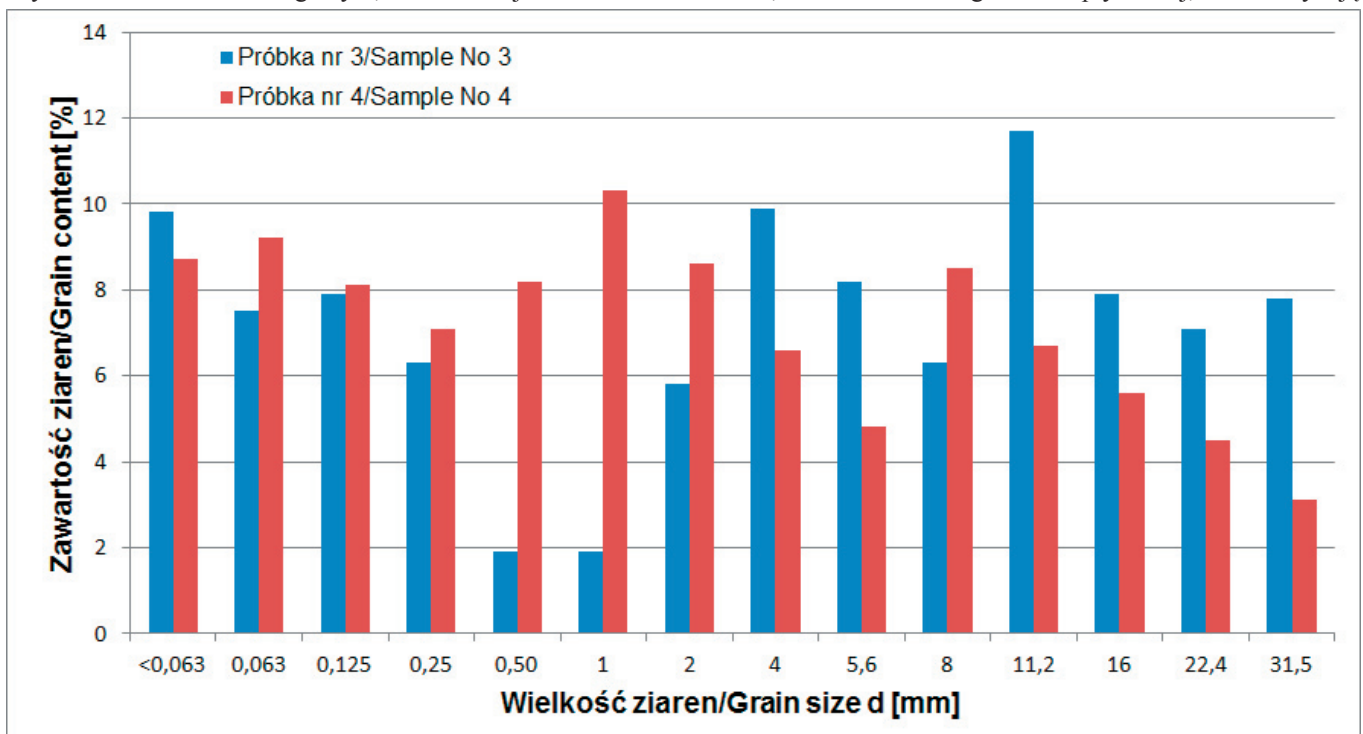
Rys. 9. Rozkład wielkości ziaren kruszyw
Fig. 9. Grain size distribution of aggregates

jednoczesnym wzroście udziału frakcji 0,5-4,0 mm (rys. 8, 10). Powoduje to, że krzywa uziarnienia niemal w całości znajduje się poza górną krzywą graniczną dobrego uziarnienia (rys. 8). Ze względu na wysokie wartości parametrów uziarnienia (tab. 3), kruszywo jest bardzo różnoziarniste ale źle uziarnione i trudno zagęszczalne.

Badanie wskaźnika CBR jest powszechnie stosowaną metodą oceny nośności materiału ziarnistego przewidzianego do użycia w budownictwie drogowym, w konstrukcji nawierzchni

drogowych, w tym podbudów zasadniczych i pomocniczych oraz w podłożu gruntowym, zalecaną przez AASHTO [1] i wytyczne krajowe WT-4 i WT-5 (2010) [19, 20]. Wartość tego parametru jest zależna od wielu czynników, między innymi takich jak: skład ziarnowy kruszywa i jego wilgotność, zawartość cząstek drobnych i ich odporność na działanie wody, cechy mechaniczne ziaren, ich kształt i szorstkość.

Kruszywa melafirowe badane bezpośrednio po zagęszczeniu, w warunkach wilgotności optymalnej, charakteryzują



Rys. 10. Rozkład wielkości ziaren kruszyw
Fig. 10. Grain size distribution of aggregates

Tab. 4. Wartości kalifornijskiego wskaźnika nośności badanych kruszyw
 Tab. 4. California bearing ratio results of the tested aggregates

Numer próbki <i>Sample number</i>	Wskaźnik nośności CBR <i>California bearing ratio (CBR)</i> [%]			
	Bezpośrednio po zagęszczeniu <i>After the compaction effort</i>		Po 96 godzinach nasączenia wodą <i>After 96 hours soaking</i>	
	2,5 mm	5,0 mm	2,5 mm	5,0 mm
1	87,4	101,2	44,3	53,3
2	76,2	99,1	40,9	51,6
3	49,4	56,1	37,6	42,7
4	25,3	31,4	15,6	19,8

się zróżnicowanymi wartościami wskaźnika CBR w zakresie 31,4-101,2% (tab. 4). Po 96 godzinnym nasycaniu wodą wartość tego parametru uległa zmniejszeniu o 23-48% jego wartości początkowej, przy czym największy spadek wartości stwierdzono w próbkach nr 1 i 2. W próbkach nr 3 i 4, które jeszcze przed nasycaniem wodą charakteryzowały się niższymi wartościami tego parametru, po namoczeniu wartość CBR zmniejszyła się w niewielkim stopniu (tab. 4). Odniesienie uzyskanych wyników do wymagań WT-4 wykazało, że kruszywa reprezentowane przez próbki nr 1, 2 i 3 mogą być stosowane jedynie do budowy podłoża ulepszanego dla dróg kategorii KR1-KR6 oraz w nawierzchniach dróg kategorii KR1-KR2. Nie wykazują one natomiast przydatności do konstrukcji podbudowy pomocniczej, gdzie wymagane są kruszywa o wartości wskaźnika CBR co najmniej 60% (KR1-KR2) lub 80% (KR3-KR6), jak też do podbudowy zasadniczej dróg wszystkich kategorii. Kruszywo zawierające głównie melafiry o strukturze porowato-migdałowcowej, reprezentowane przez próbkę nr 4, nie spełnia wymogów WT-4 w zakresie wskaźnika CBR i jest nieprzydatne w budownictwie drogowym.

Podsumowanie

Badania wykazały, że zróżnicowanie litologiczne kopaliny występującej w złożu powoduje, iż surowiec pozyskany w różnych jego częściach posiada zmienną jakość. Wyraża się ona istotnym zróżnicowaniem wartości nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie skały oraz dużą zmiennością odporności na rozdrabnianie i miażdżenie powstałego z niej kruszywa. Pomimo tego zróżnicowania, parametry fizyczno-mechaniczne kruszywa są na tyle korzystne, że spełnia ono pod tym względem wymagania techniczne WT-4, w zakresie jego przydatności do wszystkich rodzajów podbudowy oraz podłoża i nawierzchni drogowych.

Oprócz odpowiedniego poziomu właściwości fizycznych i mechanicznych, kruszywo powinno wykazywać także właściwy skład granulometryczny. Stwierdzono, że badane kruszywo

o ciągłym uziarnieniu, produkowane według takiej samej technologii, wykazuje jednak odmienne udziały poszczególnych frakcji ziarnowych. Zróżnicowanie to jest wynikiem różnej podatności poszczególnych odmian melafirów na proces rozdrabniania. Najbardziej korzystnymi parametrami uziarnienia, takimi jak wskaźnik krzywizny oraz wskaźnik różnoziarnistości, charakteryzuje się kruszywo uzyskane z melafiru związłego o teksturze afanitowej. Jest ono bardzo różnoziarniste i dobrze uziarnione, dzięki czemu łatwo zagęszczalne. Kruszywa wykonane z melafirów uziarnionych i afanitowo-porfirowych oraz z brekcji melafirowych, są również bardzo różnoziarniste, lecz źle uziarnione i trudne do zagęszczenia. Ze względu na strukturę uziarnienia, wymienione kruszywa charakteryzują się przeciętnymi wartościami wskaźnika nośności CBR, wskutek czego mogą być stosowane jedynie w budowie podłoża ulepszanego dla dróg kategorii KR1-KR6 oraz w nawierzchniach dróg kategorii KR1-KR2. Kruszywo uzyskane z melafirów o strukturze porowato-migdałowcowej z domieszką melafirów afanitowych, ze względu na złe uziarnienie oraz niską wartość wskaźnika CBR jest nieprzydatne w budownictwie drogowym.

W przypadku, gdy niektóre parametry kruszywa, takie jak: uziarnienie, w tym zawartość pyłów czy zagęszczalność kruszywa (wyrażona wskaźnikiem różnoziarnistości), nie spełniają wymagań, mogą zostać poprawione np. poprzez ponowne przekruszenie, dodanie określonych frakcji, odsianie nadziarna czy odpylenie frakcji drobnych.

W celu poprawy jakości badanych kruszyw wymagana byłaby modyfikacja technologii ich produkcji i uwzględnienie w niej zróżnicowanej podatności różnych odmian melafirów na kruszenie. Poprzez zestawienie w odpowiednich proporcjach różnych frakcji kruszywa, zawierającego zróżnicowane petrograficznie melafiry, możliwe jest otrzymanie pożądanej ciągłości rozkładu uziarnienia oraz uzyskanie przez takie kruszywo znacznie lepszych parametrów technicznych, takich jak zagęszczalność czy też nośność. Zapewni to kompleksowe wykorzystanie urobku górnictwa i zmniejszenie ilości odpadów.

Praca została zrealizowana w AGH Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska. Badania finansowane były ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na naukę, w ramach realizacji prac statutowych

Literatura

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2008. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. AASHTO Designation: MEPDG-1
- [2] PN-B-06712:1986 *Kruszywa mineralne do betonu*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1986
- [3] PN-B-06714-40:1978 *Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie wytrzymałości na miażdżenie*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1978
- [4] PN-EN 933-1:2012 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2012
- [5] PN-EN 1097-2:2010 *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2010
- [6] PN-EN 1926: 2007 *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2007
- [7] PN-EN 1936: 2010 *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2010
- [8] PN-EN 13043:2004 *Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2004
- [9] PN-EN 13242+A1:2010 *Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2010
- [10] PN-EN 13286-47:2012 *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 47: Metoda badania do określenia kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2012
- [11] PN-EN 13755: 2008 *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2008
- [12] PN-EN 14227-1:2007 *Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. Wymagania. Część 1: Mieszanki związane cementem*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2007
- [13] PN-EN ISO 14688-2:2006 *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2006
- [14] PN-S-06102:1997 *Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 1997
- [15] Rembiś M. 2011. *Mineralno-teksturalna zmienność wybranych skał bazaltowych Dolnego Śląska. i jej rola w kształtowaniu fizyczno-mechanicznych właściwości produkowanych kruszyw*. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 27, 3: 29–49
- [16] Rembiś M. 2017. *Styl budowy geologicznej złoży bazaltów „Targowica” jako czynnik warunkujący zmienność litologii i fizyczno-mechanicznych właściwości kopaliny*. *Górnictwo Odkrywkowe*, 58, 3: 5–12
- [17] Standardy Techniczne, 2009. *Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych*. Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa. Warszawa 2009
- [18] Wiłun Z. 2001. *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2001
- [19] WT - 4 2010. *Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. Wymagania Techniczne. Załącznik nr 3 do Zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010*
- [20] WT-5 2010. *Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych. Wymagania Techniczne. Załącznik nr 4 do Zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010*