

KRUSZYWA MINERALNE

t. 8



Oficyna Wydawnicza
Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2025

Kruszywa mineralne

t. 8



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2025

Redaktor naukowy

Wojciech GLAPA

Recenzenci

Wiesław KOZIOŁ

Jerzy MALEWSKI

Redaktor techniczny

Stanisław GANCARZ

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2025

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-298-1

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

SPIS TREŚCI

Ireneusz BAIC, Wiesław KOZIOŁ, Artur MIROS, Analiza zmian wydobycia kruszyw mineralnych w latach 2000–2024. Prognoza na lata 2025–2027	5
Aleksandra BORECKA, Beata FIGARSKA-WARCHOŁ, Wpływ obciążeń dynamicznych i statycznych na właściwości geometryczne kruszyw	17
Magdalena DUCHNOWSKA, Alicja BAKALARZ, Tomasz STĘPIEŃ, Piotr KARWOWSKI, Ocena efektywności separacji składników użytecznych z drobnouziarnionych odpadów granitowych z obróbki kamienia	31
Magdalena DUCHNOWSKA, Paweł STRZAŁKOWSKI, Alicja BAKALARZ, Urszula KAŻMIERCZAK, Piotr KARWOWSKI, Michał WOLNY, Tomasz STĘPIEŃ, Analiza wpływu rozdrabniania na parametry geometryczne kruszywa bazaltowego	41
Tomasz GAWENDA, Agata STEMPKOWSKA, „Kompozycja mineralna wspomagająca wzrost roślin”. Wynalazek efektu ubocznego produkcji kruszyw kubicznych	53
Stefan GÓRALCZYK, 25 lat konferencji „Kruszywa Mineralne”. Nauka i przemysł razem do innowacji	71
Katarzyna GUZIK, Handel zagraniczny kamieniami budowlanymi i blocznymi w Polsce w latach 2014–2023	75
Urszula KAŻMIERCZAK, Rewitalizacja terenów pogórnich w kontekście dobrych praktyk	91
Łukasz MACHNIAK, Konrad SŁOWIŃSKI, Przegląd aktualnej legislacji UE wraz z oceną potencjalnego wpływu na prowadzenie działalności producentów kruszyw	97
Jerzy MALEWSKI, 25 lat obecności w dorocznych konferencjach „Kruszywa Mineralne”	103
Piotr MATUSIAK, Daniel KOWOL, Rafał BARON, H2GEO – innowacyjne technologie przetwarzania i kierunki wykorzystania odpadów pogórnich	125
Przemysław MOCZKO, Adam BAJCAR, Marcin BARANOWSKI, Marek CAŁA, Przemysław SZULC, Jędrzej WIĘCKOWSKI, Tomasz ZAWADZKI, Wykorzystanie terenów pogórnich na potrzeby magazynowania energii	135
Daniel SARAMAK, Agnieszka SARAMAK, Analiza energochłonności rozdrabniania metodą Bonda dla produktów rozdrabniania wapienia w wysokociśnieniowej prasie walcowej	147
Dagmara SOLATYCKA, Żaklina KONOPACKA, Modelowanie wypadków przy pracy	155
Agata STEMPKOWSKA, Tomasz GAWENDA, Mikołaj OSTROWSKI, Izabela POLNIASZEK, Dariusz FOSZCZ, Kruszywo lekkie rozjaśnione z produktów ubocznych klasyfikacji surowców kaolinowych do ograniczania miejscich plam ciepła	169
Autorzy	188

CONTENTS

Ireneusz BAIC, Wiesław KOZIOŁ, Artur MIROS, Analysis of changes in mineral aggregate extraction in the years 2000–2024 with a forecast for the years 2025–2027	5
Aleksandra BORECKA, Beata FIGARSKA-WARCHOŁ, Influence of dynamic and static loading on geometrical properties of aggregates	17
Magdalena DUCHNOWSKA, Alicja BAKALARZ, Tomasz STĘPIEŃ, Piotr KARWOWSKI, Evaluation of separation efficiency of useful components from fine-grained granite waste from stone processing	31
Magdalena DUCHNOWSKA, Paweł STRZAŁKOWSKI, Alicja BAKALARZ, Urszula KAŻMIERCZAK, Piotr KARWOWSKI, Michał WOLNY, Tomasz STĘPIEŃ, Analysis of the effect of grinding on geometric parameters of basalt aggregate	41
Tomasz GAWENDA, Agata STEMPKOWSKA, “Mineral composition promoting plant growth” as an invention of a side effect of cubic aggregate production	53
Stefan GÓRALCZYK, 25 years of the conference “Mineral Aggregates”. Science and industry together for innovation	71
Katarzyna GUZIK, Foreign trade in construction and block stones in Poland in the years 2014–2023	75
Urszula KAŻMIERCZAK, Revitalisation of post-mining areas in the good practice context	91
Łukasz MACHNIAK, Konrad SŁOWIŃSKI, A review of current EU legislation, along with an assessment of the potential impact on the operations of aggregate producers	97
Jerzy MALEWSKI, 25 years present in the annual conferences on “Mineral Aggregates”	103
Piotr MATUSIAK, Daniel KOWOL, Rafał BARON, H2GEO – innovative processing technologies and directions for the utilization of post-mining waste	125
Przemysław MOCZKO, Adam BAJCAR, Marcin BARANOWSKI, Marek CAŁA, Przemysław SZULC, Jędrzej WIĘCKOWSKI, Tomasz ZAWADZKI, Use of post-mining areas for energy storage	135
Daniel SARAMAK, Agnieszka SARAMAK, Analysis of grinding energy consumption by means of Bond method for limestone grinding products in HPGR roller press	147
Dagmara SOLATYCKA, Żaklina KONOPACKA, Modelling of occupational accidents	155
Agata STEMPKOWSKA, Tomasz GAWENDA, Mikołaj OSTROWSKI, Izabela POLNIASZEK, Dariusz FOSZCZ, Lightweight aggregate lightened from by-products classification of kaolin raw materials for reduction of urban heat spots	169
Authors	188

Ireneusz BAIC
Wiesław KOZIOŁ
Artur MIROS

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny.
Centrum Nowych Technologii w Budownictwie, Warszawa

ANALIZA ZMIAN WYDOBYCIA KRUSZYW W LATACH 2000–2024. PROGNOZA NA LATA 2025–2027

Przedstawiono tendencje zmian wydobycia kruszyw budowlanych – piasków i żwirów, kruszyw łamanych w Polsce w latach 2000–2024 i porównano z kierunkami zmian produkcji tych kruszyw w Unii Europejskiej. Omówiono zmiany struktury litologicznej i regionalnej wydobywanych kruszyw oraz ich zasobów bilansowych i przemysłowych. Z opracowanych ekonometrycznych prognoz wydobycia tych kruszyw w Polsce na lata 2025–2027 wynika wzrost do ok. 300 mln Mg w 2027 r.

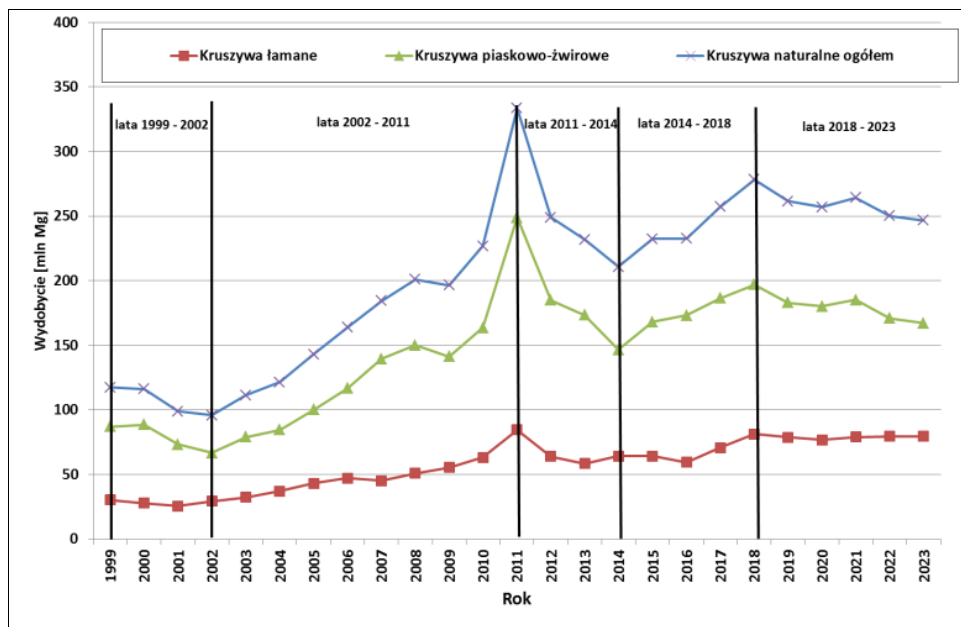
1. WPROWADZENIE

Pierwsza konferencja „Kruszywa Mineralne” zorganizowana w 2001 r. odbyła się w sytuacji osłabionej koniunktury gospodarczej w Polsce, czego odzwierciedleniem były niskie wskaźniki dynamiki PKB w latach 2001–2002, tj. 1,2 i 2,0%, a także bardzo małe wydobycie kruszyw, poniżej 100 mln Mg/rok (rys. 1). Tematyka przygotowanych wówczas referatów i obrad dotyczyła głównie zagadnień dostosowania polskich norm w zakresie badań jakościowych i zastosowań kruszyw w budownictwie do wymagań europejskich, zmian w technologii ich produkcji, realizacji programu budowy autostrad oraz bezpieczeństwa pracy. W artykule przedstawiono zmiany wydobycia kruszyw mineralnych w okresie 25 lat, z uwzględnieniem zmian strukturalnych i regionalnych oraz prognozy na najbliższy okres.

2. WYDOBYWANIE KRUSZYW W LATACH 2000–2023

W okresie transformacji ustrojowej w latach 90. XX w. wydobycie i produkcja kruszyw kształtowały się na bardzo niskim poziomie 80–100 mln Mg/rok, a dynamiczny

wzrost nastąpił na początku lat dwutysięcznych (od 2003 r.) – wówczas w 2011 r. wydobyte osiągnęło maksymalną jak dotychczas wielkość – ponad 330 mln Mg/rok [2, 4, 5]. Impulsem szybkiego wzrostu zapotrzebowania na kruszywa był rozwój budownictwa kubaturowego i infrastrukturalnego, w tym szczególnie budowa dróg i autostrad oraz akces Polski do Unii Europejskiej. Kształtowanie się wydobywania kruszyw w okresie XXI w. przedstawiono na rys. 1. Wynika stąd, że 2011 r. zapotrzebowanie, czego skutkiem było wydobywanie kruszyw, ulegało początkowo znacznym zmianom – najpierw spadki, później wzrosty, po czym ustabilizowało się na wielkości ok. 250 mln Mg/rok.



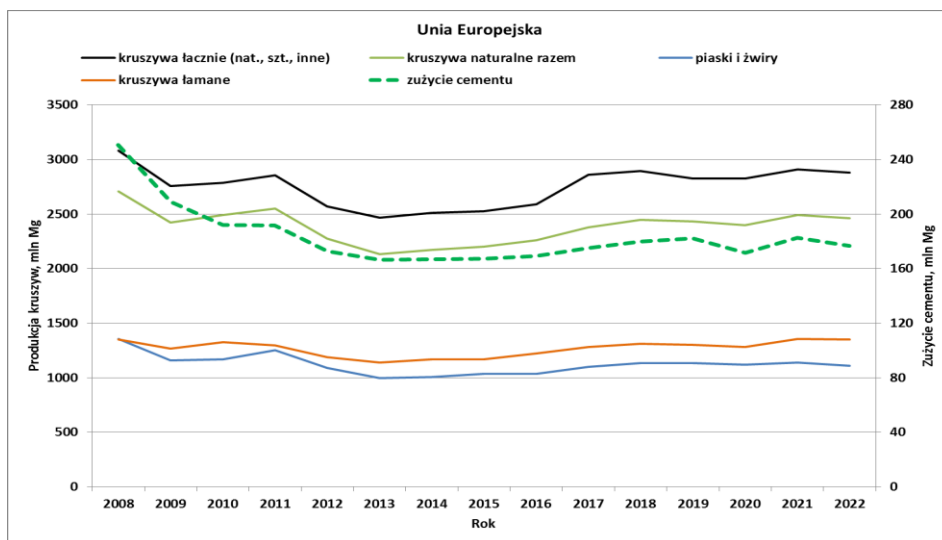
Rys. 1. Wydobywanie kruszyw w latach 2000–2023 [2]

Fig. 1. Extraction of aggregates in the years 2000–2023 [2]

Tego typu stabilizacja wydobywania i produkcji kruszyw budowlanych jest charakterystyczna również dla większości krajów Unii Europejskiej. Przykładem może być łączna produkcja kruszyw w UE, utrzymująca się od 2017 r. na poziomie ok. 2,8 mld Mg (rys. 2). W Polsce w latach 2000–2023 (dane z 2024 r. będą opublikowane w połowie 2025 r.) wydobywanie kruszyw wykorzystywanych głównie w budownictwie i drogownictwie wzrosło ponad dwukrotnie – z 116,1 do 246,7 mln Mg/rok (tab. 1).

Znacznie większy wzrost odnotowano w pozyskiwaniu tzw. kamieni łamanych do produkcji kruszyw łamanych – prawie trzykrotny, zaś wydobywanie piasków i żwirów

wzrosło ok. 2-krotnie. W efekcie udział wydobycia kruszyw łamanych wzrósł w tym czasie z ok. 24 do 32,3%, a odpowiednio zmniejszył się udział piasków i żwirów z 76 do 67,7% łącznego wydobycia kruszyw (tab. 1). Zestawione dane dotyczą danych według PIG-PIB w corocznych bilansach [2], w dwóch grupach surowców skalnych – kamienie łamane i bloczne oraz piaski i żwiry.



Rys. 2. Produkcja kruszyw w Unii Europejskiej [1]
Fig. 2. Aggregates production in the European Union [1]

W rzeczywistości wydobycie kruszyw budowlanych w niektórych innych grupach złóż, np. wapienie dla przemysłu cementowego i wapienniczego, dolomity, piaski podsadzkowe, surowce szklarskie, węgiel brunatny itd. – wydobywane są kopaliny i produkowane kruszywa zarówno łamane, jak i piaski i żwiry. Wielkość wydobycia zasobów kruszywa łamanych w tych grupach złóż szacuje się na ok. 10 mln Mg/rok.

Tabela 1. Wydobycie kruszyw w Polsce w latach 2000–20223 [2]
Table 1. Aggregate extraction in Poland in the years 2000–2023 [2]

Kruszywa	Lata							
	2000		2010		2020		2023	
	mln Mg	%	mln Mg	%	mln Mg	%	mln Mg	%
Łamane	27,7	23,9	63,2	27,9	76,6	29,8	79,6	32,3
Piaski i żwiry	88,4	76,1	163,4	72,1	180,2	70,2	167,1	67,7
Razem naturalne	116,1	100,0	226,6	100,0	256,8	100,0	246,7	100,0

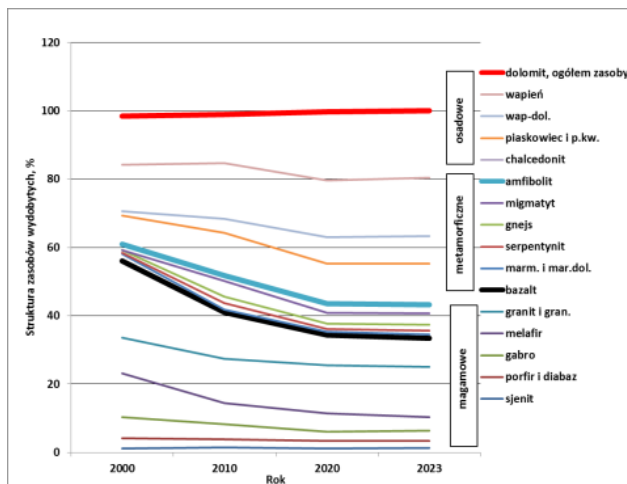
W tabeli 2 oraz na rys. 3 i 4 przedstawiono zmiany w strukturze litologicznej wydobywanych zasobów kruszyw łamanych. W latach 2000–2023 znacząco zmniejszył się udział kruszyw ze skał magmowych z 56,0 do 33,5%, chociaż ich wydobywanie podwoiło się z 13,5 do 26,7 mln Mg, a wzrósł udział kruszyw ze skał osadowych z 39,0 do 56,7% – wydobywanie wzrosło prawie pięciokrotnie z 9,4 do 45,1 mln Mg i skał metamorficznych z 5,0 do 9,8 % przy wzroście pozyskiwania tych skał z 1,2 do 7,8 mln Mg. Największe spadki udziału w wydobywaniu dotyczą bazaltów (z 22,4 do 8,5%) i melafirów (z 12,9 do 4,1%).

Tabela 2. Struktura litologiczna wydobytych zasobów kamieni łamanych i blocznych w latach 2000–2023 [2]

Table 2. Lithological structure of the excavated resources of broken stones and block stones in the years 2000–2023 [2]

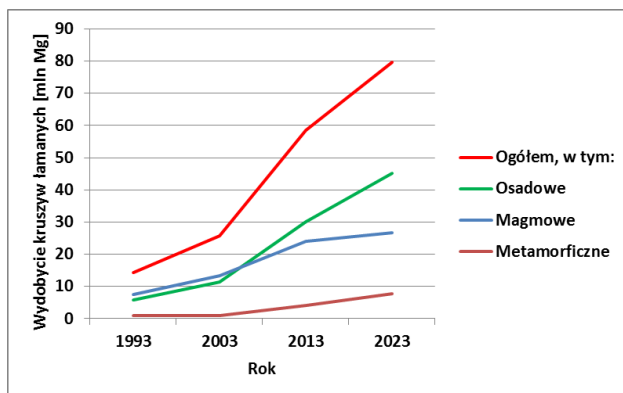
Zasoby bilansowe	Zasoby wydobyte w latach, mln ton, %							
	2000		2010		2020		2023	
Ogółem, w tym:	24,1	100	63,2	100	76,6	100	79,6	100
1. Magmaowe	13,5	56,0	25,9	41,0	26,4	34,5	26,7	35,5
bazalt	5,4	22,4	8,6	13,6	6,8	8,9	6,8	8,5
granit i granodioryt	2,5	10,4	8,2	13,0	10,7	14,0	11,6	14,6
melafir	3,1	12,9	3,9	6,2	4,2	5,5	3,3	4,1
gabro	1,5	6,2	2,7	4,3	2,1	2,7	2,4	3,0
porfir i diabaz	0,7	2,9	1,6	2,5	1,6	2,1	1,6	2,0
sjenit	0,3	1,2	0,9	1,4	0,9	1,2	1,0	1,3
2. Osadowe	9,4	39,0	30,5	48,4	43,2	56,4	45,1	56,7
dolomit	3,4	14,1	9,0	14,2	15,5	20,2	15,6	19,6
wapień	3,3	13,7	10,3	16,3	12,6	16,5	13,5	17,0
wapień i dolomit	0,3	1,2	2,6	4,1	6,0	7,8	6,5	8,2
piaskowiec, szarogłaz	2,0	8,3	7,9	12,5	9,0	11,8	9,5	11,9
chalcedonit	0,2	0,8	0,2	0,3	0,1	0,1	–	–
3. Metamorficzne	1,2	5,0	6,8	10,8	7,0	9,1	7,8	9,8
amfibolit	0,4	1,7	1,0	1,6	2,1	2,7	2,1	2,6
migmatyt	–	–	2,9	4,6	2,4	3,1	2,6	3,3
gnejs	0,2	0,8	1,2	1,9	1,2	1,6	1,4	1,8
serpentyt	0,1	0,4	1,2	1,9	0,6	0,8	0,9	1,1
marmur, marmur dol.	0,5	2,1	0,5	0,8	0,7	0,9	0,8	1,0

Wzrósł natomiast udział kruszyw granitowych i granodiorytowych (z 10,4 do 14,6%) oraz metamorficznych: amfibolitowych, migmatytowych i gnejsowych. W kruszywach osadowych nastąpił wzrost udziału praktycznie wszystkich typów skał: dolomitowych, wapiennych, piaskowcowych itp.



Rys. 3. Struktura wydobycia poszczególnych rodzajów kruszyw łamanych w latach 2000–2023 [2]

Fig. 3. Lithological structure of the excavated resources of broken stones and block stones in the years 2000–2023 [2]



Rys. 4. Wydobycie kruszyw łamanych w poszczególnych grupach skał latach 1993–2023 [2]

Fig. 4. Extraction of crushed aggregates in individual rock groups in the years 1993–2023 [2]

W tabelach 3 i 4 oraz na rys. 5 i 6 przedstawiono z kolei zmiany w wielkości i strukturze udokumentowanych zasobów bilansowych i przemysłowych złóż kamieni łamanych i blocznych. Zasoby bilansowe ogółem w latach 2000–2023 zostały powiększone o ok. 46% – z 8119 do 11 833 mln Mg. W największym stopniu wzrosły zasoby złóż metamorficznych, o ok. 116% i zasoby kopalni osadowych o 50%, a dla skał magmowych wzrost wyniósł ok. 28%.

Tabela 3. Zasoby bilansowe kamieni łamanych i budowlanych w latach 2000–2023 [2]

Table 3. Balance resources of crushed and building stones in the years 2000–2023 [2]

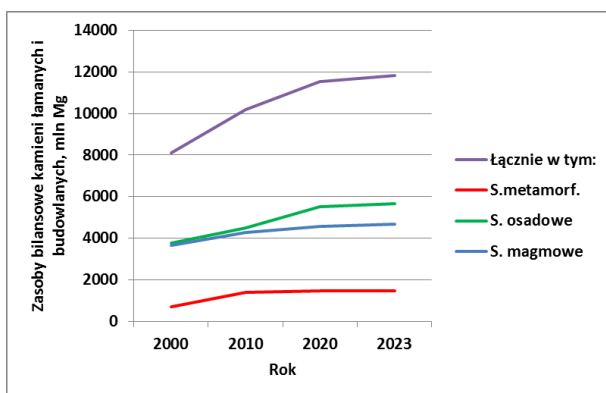
Zasoby bilansowe	Lata							
	2000		2010		2020		2023	
	mln Mg	%	mln Mg	%	mln Mg	%	mln Mg	%
Łącznie, w tym skały:	8119,1	100,0	10 173,8	100,0	11 521,4	100,0	11 833,2	100,0
magmowe	3664,0	45,1	4274,1	42,0	4564,1	39,6	4688,5	39,6
osadowe	3771,3	46,5	4494,5	44,2	5510,4	47,8	5666,4	47,9
metamorficzne	683,7	8,4	1405,2	13,8	1446,9	12,6	1478,3	12,5

Tabela 4. Zasoby przemysłowe kamieni łamanych i budowlanych w latach 2001–2023 [2]

Table 4. Industrial resources of crushed and building stones in the years 2001–2023 [2]

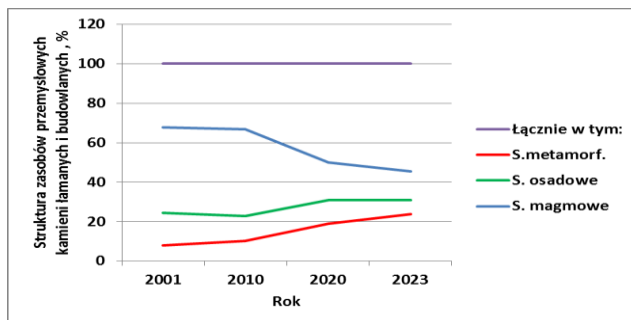
Zasoby przemysłowe	Lata							
	2001		2010		2020		2023	
	mln Mg	%	mln Mg	%	mln Mg	%	mln Mg	%
Łącznie, w tym skały:	2997,1	100	3181,6	100	3679,1	100	4046,4	100
magmowe	2028,6	67,7	2127,4	66,9	1843,6	50,1	1838,3	45,4
osadowe	731,3	24,4	726,7	22,9	1141,3	31,0	1245,0	30,8
metamorficzne	237,2	7,9	323,4	10,2	694,1	18,9	964,1	23,8

Udział zasobów bilansowych złóż magmowych w analizowanym okresie zmniejszył się z 45,1 do 39,6% a wzrósł udział złóż osadowych z 46,5 do 47,9% i metamorficznych z 8,4 do 12,5% łącznej wielkości udokumentowanych zasobów bilansowych kamieni łamanych i blocznych. Wielkość zasobów przemysłowych w latach 2001–2023 została powiększona o ok. 35% (tab. 4), w tym zasoby kopalin magmowych



Rys. 5. Struktura zasobów bilansowych kamieni łamanych i budowlanych [2]

Fig. 5. Structure of balance resources of crushed and building stones [2]

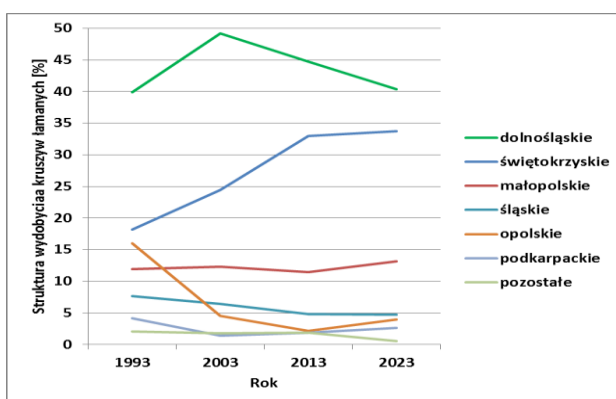


Rys. 6. Struktura zasobów przemysłowych kamieni łamanych i budowlanych [2]

Fig. 6. Structure of industrial resources of crushed and building stones [2]

uległy pomniejszeniu o ok. 9,4%, natomiast wzrosły zasoby przemysłowe złóż osadowych (o ok. 70%) i metamorficznych (ok. 400%). Ten nierównomierny wzrost spowodował, że udział zasobów kopalin magmowych w łącznej wielkości zasobów przemysłowych zmniejszył się 67,7 do 45,4%, a wzrósł udział zasobów złóż osadowych z 24,4 do 30,8% i metamorficznych z 7,9 do 23,8%.

W strukturze regionalnej (rys. 7) największy udział w wydobywaniu skał i produkcji kruszyw łamanych ma województwo dolnośląskie (40,4%). Porównywalny udział miało to województwo 30 lat temu w 1993 r., pomimo, że na początku lat 2000. udział ten zbliżał się do 50%. Znaczący wzrost udziału nastąpił natomiast w wydobywaniu w woj. świętokrzyskim (z 18 do 33,7%) z dalszą tendencją rosnącą. Udział wydobywania w woj. małopolskim przez cały okres utrzymuje się na zbliżonym poziomie ok. 12 do 13%, ostatnio z tendencją do niewielkiego wzrostu w (2023 r. – 13,2%). Duże spadki odnotowały natomiast pozostałe województwa, w tym szczególnie woj. opolskie (z ok. 16



Rys. 7. Zmiana struktury regionalnej wydobywania kruszyw łamanych w latach 1993–2023 [2]

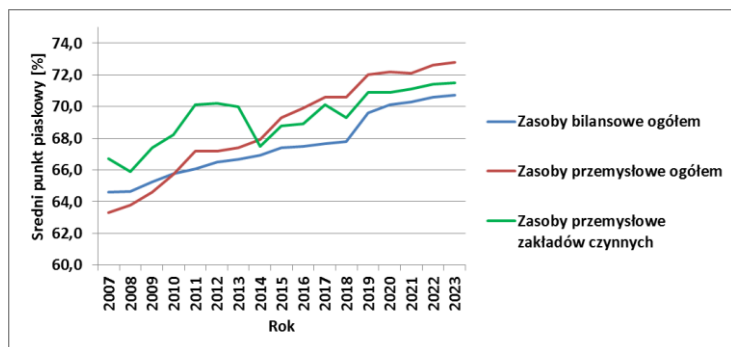
Fig. 7. Change in the regional structure of crushed aggregates extracion in the years 1993–2023 [2]

do 4%), śląskie (z 7,7 do 4,7%), a także podkarpackie (z 4,2 do 2,6%). Łącznie w tych 6 województwach Polski południowej wydobyć wynosi obecnie prawie 98,6% wydobycia krajowego kruszyw łamanych.

Piaski i żwiry wydobywane są we wszystkich województwach oraz w obszarze Bałtyku [2]. W wielkości wydobywania zachodzą duże zmiany. W okresie 20 lat (2003–2023) wydobyć tych kruszyw wzrosło ponad dwukrotnie z 78,58 do 167,08 mln Mg.

W latach 2022–2023 największy udział i najwięcej piasków i żwirów wydobyto w woj. podlaskim, pomorskim i warmińsko-mazurskim, czyli w północno-wschodnim regionie kraju, zmniejszył się zaś udział w woj. wielkopolskiego i mazowieckiego. W pozostałych województwach udział ten uległ nieznacznym zmianom przy znacznym wzroście wielkości pozyskiwania piasków i żwirów [5].

W zastosowaniu piasków i żwirów w budownictwie ważne jest ich uziarnienie. Do produkcji betonu najbardziej poszukiwane są frakcje powyżej 2 mm, gdy tymczasem udział tych frakcji w zasobach i wydobywaniu systematycznie maleje [3–5]. Przyjmując przeciętne zawartości frakcji drobnych (punkty piaskowe PP) w trzech grupach złóż – piaski, piaski ze żwirem, żwiry [2], obliczono w latach 2007–2022 średnie, hipotetyczne PP zasobów bilansowych, przemysłowych i wydobytych, co przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Średnie hipotetyczne punkty piaskowe w zasobach piasków i żwirów [2, 5]

Fig. 8. Average hypothetical sand points in sand and gravel resources [2, 5]

Z obliczeń wynika systematyczny wzrost punktów PP, oznaczający wzrost udziału drobnych frakcji kruszyw piaskowo-żwirowych. W okresie 2007–2023 dla zasobów przemysłowych kopalń czynnych udział ten wzrósł z 66,7 do 71,5%. Oznacza to, że wydobywanych piaskach i żwirach poszukiwana frakcja kruszywa >2 mm stanowi tylko niecałe 30%, zaś ponad 70% jest to kruszywo drobne o frakcji <2 mm. W zasobach przemysłowych ogółem wzrost punktów piaskowych jest jeszcze większy i wynosi prawie 10% (z 63,3 do 72,8%, średnio 0,6%/rok), wskazując, że również w przyszłości utrzyma się tendencja do wzrostu frakcji drobnych w wydobywanych piaskach i żwirach.

3. PROGNOZA PRODUKCJI KRUSZYW

Zgodnie z Planami Rządu w najbliższych latach czeka nas boom inwestycyjny, w którym między innymi łączna pula środków finansowych jakie mają trafić do naszego kraju z różnych programów i budżetów unijnych przekroczyć ma 100 mld €.

Szczególnie duże środki planowane są na budownictwo infrastrukturalne, drogowe, kolejowe i hydrotechniczne. Przykładem może być przyjęty program budowy CPK z nakładami inwestycyjnymi ponad 131 mld złotych do 2032 r. Duże środki finansowe planowane są na budownictwo przemysłowe i energetyczne, w tym na budowę pierwszej elektrowni atomowej, ponad 60 mld zł w latach 2025–2032.

Inwestycje infrastrukturalne i energetyczne, a także niezbędny rozwój budownictwa mieszkaniowego i nie mieszkaniowego (usługowe, biurowe, kulturalne itp.) powinien spowodować znaczący wzrost produkcji i zapotrzebowania kruszyw, podstawowego materiału budowlanego i drogowego. Charakterystyczna od roku 2020 (rys. 1) stabilizacja wydobywania, a w przypadku piasków i żwirów nawet niewielki spadek powinien w najbliższych latach wykazać się tendencją wzrostową. Tendencję taką potwierdzają prognozy opracowane na podstawie analizowanych zależności wydobywania kruszyw od trzech wskaźników makroekonomicznych: dynamiki wzrostu krajowego PKB, wielkości zużycia cementu i wskaźnika ogólnego klimatu koniunktury w budownictwie.

Zależności te przedstawiano na konferencjach i publikacjach [3–5], obecnie wyszczególniono tylko prognozy opracowane na podstawie zaktualizowanych danych [6–9] i opracowanych na tej podstawie algorytmów (tab. 5). Z aktualnych prognoz wynika, że już w 2024 r. (nie ma jeszcze danych oficjalnych) łączne wydobywanie kruszyw było prawdopodobnie nieco większe od wydobywania w 2023 r. i wyniosło ok. 257 mln Mg. Na możliwość wzrostu poza danymi z niektórych kopalń, wskazuje między innymi wzrost o ok. 6,5% produkcji [8] i sprzedaży w ubiegłym roku cementu.

Wyjątkiem w tych obliczeniach jest jednak prognoza wydobywania na podstawie wskaźnika koniunktury w budownictwie, który pomimo poprawy z 12,6 w 2023 r. do 4,8 w 2024 r. wskazuje na dalsze nieduże zmniejszenie wydobywania w ubiegłym roku do ok. 242,3 mln Mg. Za kilka miesięcy okaże się która prognoza była trafniejsza. W kolejnych latach 2025–2027 prognozy są jednak dość zgodne i wszystkie potwierdzają wzrost zapotrzebowania i wydobywania kruszyw. W 2025 r. wydobywanie powinno mieścić się w przedziale od 252 mln Mg (wg koniunktury w budownictwie) do 272 mln Mg (wg planowanej produkcji i zużycia cementu). Dla 2027 r. obliczenia są wyjątkowo zgodne, wykazując wielkość w przedziale 290–300 mln Mg, a być może nawet powyżej.

Trzeba jednak mieć na uwadze, że te w miarę optymistyczne prognozy może zwerfikować niepewna obecnie sytuacja geopolityczna i prawdopodobna konieczność weryfikacji wielkości nakładów na niektóre inwestycje infrastrukturalne i inne na korzyść inwestycji zapewniających bezpieczeństwo kraju.

Tabela 5. Prognozy wydobywania kruszyw na lata 2024–2027
Table 5. Aggregates extraction forecasts for 2024–2027

Prognoza według	Wydobycie 2023 r. mln Mg/rok			Prognoza wydobywania, mln Mg/r. (+/- do roku poprzedniego, %)			
	uzyskane	prognozowane	błąd (+/- %)	2024	2025	2026	2027
PKB, %	246,7	256,2	+3,9	257,0 (+4,2)	265,3 (+3,2)	276,8 (+4,3)	290,8 (+5,1)
Zużycie cementu, mln Mg/rok	246,7	236,1	-4,3	257,4 (+4,3)	272,4 (+7,2)	284,6 (+8,3)	299,6 (+5,3)
Koniunktura budownictwa	246,7	264,2	+7,3	242,3 (-1,8)	252,0 (+4,0)	272,4 (+8,1)	297,4 (+9,1)

4. WNIOSKI

1. W okresie 25 lat wydobywanie kruszyw wzrosło ponad dwukrotnie. Znacznie większy wzrost odnotowano w wydobywaniu skał do produkcji kruszyw łamanych – prawie trzykrotny, zaś wydobywanie piasków i żwirów wzrosło o niecałe dwa razy. Szczególnie dynamiczny wzrost zapotrzebowania i wydobywania kruszyw nastąpił na początku lat dwutysięcznych i związany był głównie z przystąpieniem Polski do Unii Europejskiej i przeznaczeniem dużych nakładów finansowych na rozwój infrastruktury drogowej.
2. W ostatnich latach, od 2019 r., wydobywanie kruszyw ustabilizowało się na poziomie 260–250 mln Mg/rok, z tendencją niewielkiego spadku pozyskiwania piasków i żwirów (z 180 do 167 mln Mg) i wzrostu kamieni łamanych (z 76 do 80 mln Mg).
3. Planowane w najbliższych latach do realizacji duże inwestycje infrastrukturalne, energetyczne i inne powinny przyczynić się do znaczącego zapotrzebowania na kruszywa. Potwierdzają to przedstawione wyniki prognoz ekonometrycznych, wskazujących na wzrost wydobywania kruszyw w 2027 r. do ok. 300 mln Mg, a być może nawet powyżej.

LITERATURA

- [1] ANNUAL REVIEW, UEPG, Brussels, Belgium, 2009–2024.
- [2] *Bilanse zasobów kopalin w Polsce*, Wyd. PIG-PIB Warszawa 1993–2024.
- [3] BAIC I.R., KOZIOŁ W., MIROS A., *Dependence of construction aggregates extraction and production on selected indicators of economic development in Poland*, Archives of Civil Engineering, 2021, 67, 437–453, DOI: 10.24425/ace.2021.138064.

- [4] BAIC I., KOZIOŁ W., MIROS A., *30 lat wydobycia kruszyw budowlanych w Polsce – analiza zmian i prognozy*. Materiały Budowlane 7/2024, s. 21–25. Wyd. SIGMA-NOT Sp. z o.o., www.materiałybudowlane.info.pl, DOI:10.15199/33.2024.07.05.
- [5] KOZIOŁ W., BAIC I., MIROS A., *Wydobycie kruszyw w latach 1993–2022. Tendencje zmian i prognozy*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa Mineralne* t. 7, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2024, s. 5–16.
- [6] CEMENT market in Europe, <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/europe-cement-market>, 16.02.2025.
- [7] GUS, Wskaźniki makroekonomiczne, <https://stat.gov.pl/wskazniki-makroekonomiczne/>
- [8] GUS, Produkcja cementu wzrosła o 6,5% r/r w 2024 r., <https://pl.investing.com/news/stock-market-news/gus-produkcja-cementu-wzrosła-o-65-rr-w-2024-r-817270>, 21.02.2025
- [9] GUS, *Wskaźniki koniunktury w budownictwie*, General Business Climate Indicator, 2024, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/koniunktura/>.

ANALYSIS OF CHANGES IN MINERAL AGGREGATE EXTRACTION IN THE YEARS 2000–2024 WITH A FORECAST FOR THE YEARS 2025–2027

The development of construction aggregates extraction (sand and gravel, crushed aggregates) in Poland in the years 2000–2024 is presented and compared with the trend of changes in aggregates production in the European Union. Changes in the lithological and regional structure of extracted aggregates and their balance and industrial resources are discussed. The developed forecasts of construction aggregates extraction in Poland for the years 2025–2027 show an increase to approx. 300 million Mg in 2027.

Aleksandra BORECKA¹

Beata FIGARSKA-WARCHOŁ²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

² Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

WPLYW OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH I STATYCZNYCH NA WŁAŚCIWOŚCI GEOMETRYCZNE KRUSZYW

Celem badań było określenie wpływu uziarnienia i właściwości geometrycznych kruszyw na ich podatność na rozkruszanie w procesie zagęszczania. Wyniki wskazują, że największemu rozkruszeniu ulega frakcja dominująca w uziarnieniu wyjściowym. Prezentowane badania pokazują wpływ uziarnienia i rodzaj zastosowanych obciążeń (statycznych czy dynamicznych) na proces kruszenia kruszyw oraz zależność między wskaźnikiem płaskości a podatnością na mechaniczną degradację.

1. WPROWADZENIE

Kruszywa są jednym z kluczowych materiałów wykorzystywanych w budownictwie drogowym oraz inżynierii lądowej. Ich właściwości mechaniczne, jak wytrzymałość na ściskanie, odporność na degradację czy kształt i uziarnienie, mają istotny wpływ na jakość i trwałość konstrukcji. Właściwy dobór kruszywa oraz jego zachowanie pod wpływem obciążeń dynamicznych i statycznych są szczególnie istotne w kontekście projektowania nasypów, podbudów drogowych oraz innych elementów infrastrukturalnych.

Celem badań było określenie zależności między typem kruszywa a podatnością na zmiany uziarnienia i kształtu ziaren w wyniku działania obciążeń dynamicznych i statycznych. Badane kruszywa pochodziły z trzech rejonów eksploatacji i reprezentowały odmienne typy petrograficzne: piaskowce magurskie, wapienie paleozoiczne oraz wapienie i dolomity mezozoiczne. Próbkę poddano badaniom, stosując zarówno metody dynamicznego zagęszczania, jak i obciążenia statycznego.

Wyniki analizy dostarczyły informacji na temat zachowania różnych kruszyw pod wpływem obciążeń oraz ich potencjalnej przydatności w zastosowaniach inżynierskich. Ponadto, badania dają dodatkowy wkład do wiedzy na temat potencjalnych właściwości kruszywa z recyklingu, stanowiącego ważny element promowanej obecnie przez Parlament Europejski polityki gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ).

2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Do badań wybrano kruszywa, pochodzące z trzech rejonów eksploatacji. Reprezentowały one różne typy petrograficzne. Do pierwszego należały piaskowce magurskie, pobrane z dwóch różnych złóż (P1, P2). Piaskowce te o szarzielonawej barwie charakteryzowały się zbitą i bezładną strukturą i drobnoziarnistą teksturą z pojedynczymi ziarnami do 3 mm [5]. Budujące je ostrokrawędziste i półobtoczone ziarna reprezentują głównie kwarc. Skalenie obecne w mniejszej ilości są nadwietrzale, objęte częściowo procesami serycytyzacji i kaolinityzacji. Muskowit występuje w postaci drobnych, dobrze zachowanych blaszek, któremu towarzyszą nieliczne blaszki biotyту. Ponadto, w składzie ziarnowym obecne są litoklasty osadowe (mułowce i rogowce) oraz węglanowe (wapienie sparytowe). Obecność glaukonitu wpływa na zielonkawy odcień skały. Spoiwo skały jest krzemionkowo-ilasto-węglanowe, silnie reagujące z HCl. Piaskowce o gęstości pozornej $\sim 2,61\text{--}2,65\text{ g/cm}^3$ charakteryzowały się wytrzymałością na ściskanie 55–130 MPa [4].

Druą odmiana kruszyw (próby W1 i W2) została wyprodukowana z jasnokremowych, sparytowych wapieni paleozoicznych o drobnokrystalicznej teksturze i bezładnej, zwartej strukturze z pojedynczymi żyłkami kalcytu. W składzie mineralnym dominuje kalcyt z niewielkim udziałem rozproszonej krzemionki, będącej efektem sylikfikacji skały [5]. Ta ostatnia miejscami w większym nagromadzeniu nadaje skale ciemniejszą barwę. Sporadycznie stwierdza się obecność drobnych ilości substancji ilastych. Budowa wewnętrzna tych skał sprzyja wyższej, niż w przypadku piaskowców, gęstości pozornej $2,68\text{ g/cm}^3$ przy podobnej wytrzymałości na ściskanie 65–125 MPa [4].

Trzeci rodzaj kruszywa reprezentowały żółtawokremowe ziarna mezozoicznych wapieni i dolomitów (WD1). Ziarna wapienne, stosunkowo miękkie, zbudowane są głównie z drobnosparytowej kalcytowej masy, pośród której rozmieszczone są liczne bioklasty o wymiarach do 2 mm [5]. Ich obecność w skale nadaje jej gruzełkowy charakter. Twarde ziarna dolomityczne o sparytowej teksturze i zbitej, bezładnej strukturze, odznaczają się ostrymi krawędziami. Buduje je głównie dolomit z niewielkim udziałem kryształów kalcytu i nielicznymi bioklastami. Opiswane tu skały węglanowe charakteryzuje: zróżnicowana gęstość pozorna $2,34\text{--}2,69\text{ g/cm}^3$ i wytrzymałość na ściskanie w stanie powietrzno-suchym 48–120 MPa [4].

3. METODYKA BADAŃ

3.1. OBCIĄŻANIE DYNAMICZNE

Obciążenia dynamiczne wywierano na kruszywa za pomocą aparatu Proctora, który w codziennej praktyce geotechnicznej wykorzystywany jest do oceny zależności po-

między zawartością wody i gęstością szkieletu zagęszczanych mieszanek [7, 12]. Zagęszczaniu poddano wszystkie 3 odmiany kruszyw o różnym składzie granulometrycznym:

- piaskowcowe (P1 i P2), wapienne (W1 i W2) oraz wapienno-dolomityczne (WD1) o uziarnieniu ciągłym w zakresie 0–63 mm,
- piaskowcowe (P1), wapienne (W1) i wapienno-dolomityczne (WD1) o uziarnieniu zredukowanym 0–10 mm.

Badanie wykonano bez użycia wody na kruszywie wysuszonym w temp. $110 \pm 5^\circ\text{C}$ [6, 7]. Proces zagęszczania powtarzano 5-krotnie na tej samej partii kruszywa, umieszczonej w cylindrze o objętości $2,2 \text{ dm}^3$, stosując ubijak o masie 2,5 kg i średnicy 50,8 mm spadający z wysokości 320 mm. Materiał zagęszczano 3. warstwami, przykładając na pierwsze 2 warstwy 56 uderzeń bezpośrednich, a na trzecią 40 uderzeń bezpośrednich i 20 uderzeń na stalową płytę grubości 10 mm położoną na równej powierzchni kruszywa. W ten sposób uzyskiwano energię właściwą $\sim 0,6 \text{ MJ/m}^3$ zbliżoną do metody II, opisanej w normach [7, 12].

W celu wyznaczenia gęstości objętościowej zagęszczonego kruszywa każdorazowo ważono próbę wraz z cylindrem oraz mierzono zajmowaną przez nią objętość. Po wybranych cyklach kruszywo poddawano badaniom uziarnienia i kształtu ziaren.

3.2. OBCIĄŻANIE STATYCZNE

Kruszywo piaskowcowe (P2) oraz wapienne (W2) o uziarnieniu ciągłym w zakresie 0–63 mm poddano działaniu obciążeń statycznych. Wysuszony, tak jak uprzednio, materiał skalny umieszczano w cylindrze aparatu Abbicha [8]. Na próbę wywierano nacisk przesuwając osiowo tłok maszyny wytrzymałościowej, stosując przyrost siły w granicach 1,0–1,5 kN/s, aż do uzyskania wartości 50 kN, 100 lub 200 kN, co przy średnicy tłoka cylindra 146 mm i założeniu pełnego przylegania materiału pod tłokiem dawało odpowiednio naprężenia $\sim 3 \text{ MPa}$, 6 i 12 MPa. Po zakończeniu procesu miażdżenia badano uziarnienie i kształt ziaren kruszywa.

3.3. UZIARNIENIE

Skład ziarnowy badanych prób kruszywa oznaczano po uprzednim wysuszeniu w temp. $110 \pm 5^\circ\text{C}$ metodą „na sucho”, stosując zestaw sit o kwadratowych otworach i wymiarach wg normy [9]. Procedurę tę wykonywano dla prób surowych i po przeprowadzonych obciążeniach.

3.4. KSZTAŁT ZIAREN

Naprężenia powstające w trakcie uderzeń ubijaka Proctora lub nacisku maszyny wytrzymałościowej w aparacie Abbicha wywołują pękanie ziaren kruszywa, prowadzące do zmniejszenia ich wielkości, ale także do zmiany kształtu. Dotyczy to zwłaszcza ziaren nieforemnych (płaskich i wydłużonych). Dlatego dla prób kruszyw surowych oraz po zastosowaniu odpowiednich obciążeń (dynamicznych lub statycznych) przeprowadzono badanie wskaźnika płaskości FI [10], określając udział ziaren płaskich, które przechodzą przez odpowiednie sita prętowe.

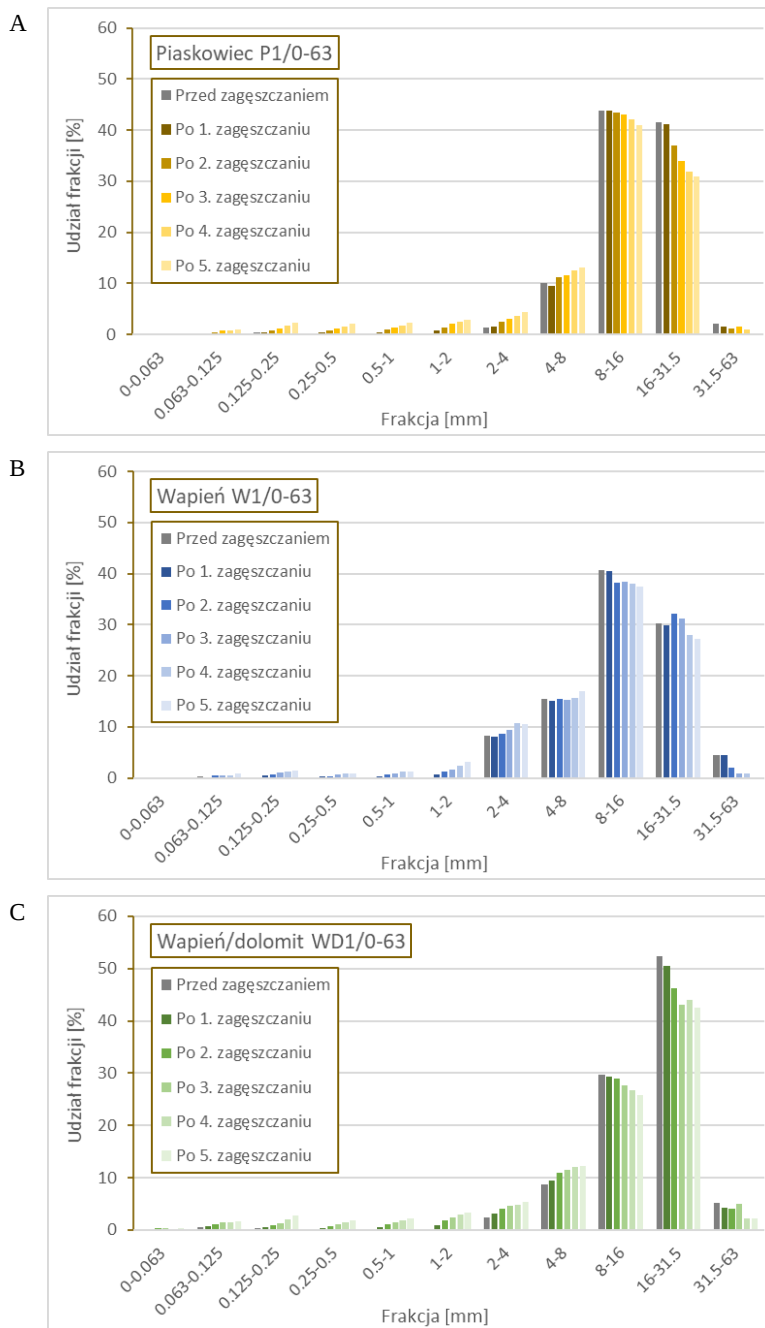
Ponadto, dla kruszyw surowych oceniono również wskaźnik kształtu SI , który stanowi udział ziaren nieforemnych (płaskich i wydłużonych – o długości 3 razy większej od grubości) w stosunku do całej próby [11].

4. WYNIKI I ICH DYSKUSJA

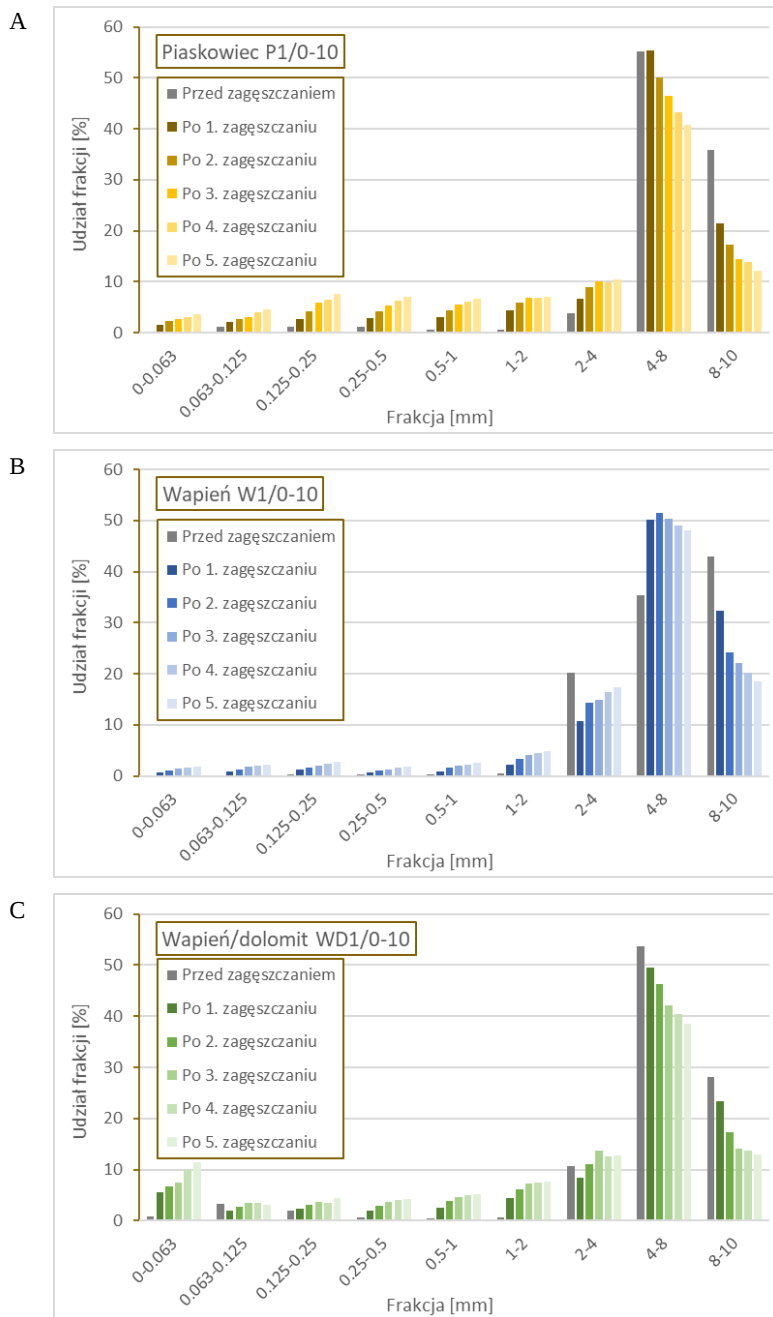
4.1. ZNACZENIE CHARAKTERYSTYKI PETROGRAFICZNEJ I UZIARNIENIA POCZĄTKOWEGO MIESZANKI NA EFEKTY OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

Próbki kruszyw każdej z trzech odmian litologicznych zostały poddane zagęszczaniu aparatem Proctora przez 5-krotne powtórzenie pełnych cykli na tym samym materiale. We wszystkich mieszankach (P1, W1, WD1) największy udział wagowy (70–85%) zajmowały ziarna o wielkości 8–31,5 mm, przy czym dla próby wapieni i dolomitów ponad 50% stanowiły ziarna 16–31,5 mm (rys. 1C), podczas gdy w pozostałych dwóch odmianach udziały frakcji 8–16 i 16–31,5 mm były do siebie bardziej zbliżone i wynosiły ~30–44% (rys. 1A, 1B). We wszystkich 3 próbach łączny udział drobnych frakcji (do 2 mm) był niewielki i wynosił początkowo ~1%.

Proces zagęszczania ubijakiem powodował w kolejnych cyklach stopniowe rozkruszanie ziaren, przede wszystkich należących do dominujących frakcji. Efekt ten był szczególnie widoczny po pierwszych dwóch cyklach, powodując kilkuprocentowe obniżenie udziału ziaren 8–16 mm, 16–31,5 oraz 31,5–63 (rys. 1A–C). We wszystkich frakcjach >8 mm następował stopniowy wzrost udziału ziaren. Udział najdrobniejszych frakcji (>2 mm) wzrósł na koniec badania (po 5 cyklu zagęszczania) do kilku procent (najwięcej – do 8,7% dla próbki wapieni i dolomitów o znacznie słabszym spoiwie niż dla kalcytowych wapieni paleozoicznych i piaskowców, związanych krzemionką). Z każdym kolejnym cyklem drobne ziarna wypełniały obficie wolne przestrzenie, tłumiąc przenoszenie naprężeń, co wyrażało się w mniejszej intensywności pękania ziaren większych.



Rys. 1. Zmiany uziarnienia wywołane obciążeniami dynamicznymi w mieszankach 0–63 mm
Fig. 1. Grain size changes due to dynamic loads in 0–63 mm mixtures



Rys. 2. Zmiany uziarnienia wywołane obciążeniami dynamicznymi w mieszankach 0–10 mm

Fig. 2. Grain size changes due to dynamic loads in 0–10 mm mixtures

W mieszankach przygotowanych z tych samych materiałów, obejmujących frakcje 0–10 mm, rozkruszanie ziaren następowało przede wszystkim we frakcjach 4–8 i 8–10 mm (rys. 2A–C). Pozostałe zwiększały swój udział, przy czym materiał piaszczysto-pylasto-ilasty (do 2 mm) od łącznej ilości ~1 do ponad 11% w wapieniach paleozoicznych i od 4–7 do 28–29% w piaskowcach i skałach węglanowych mezozoiku. Świadczy to o znacznie niższej odporności tych ostatnich w porównaniu z krystalicznymi wapieniami silniej zdiagenezowanymi.

4.2. ZMIANY UZIARNIENIA WYWOŁANE OBCIĄŻENIEM DYNAMICZNYM I STATYCZNYM

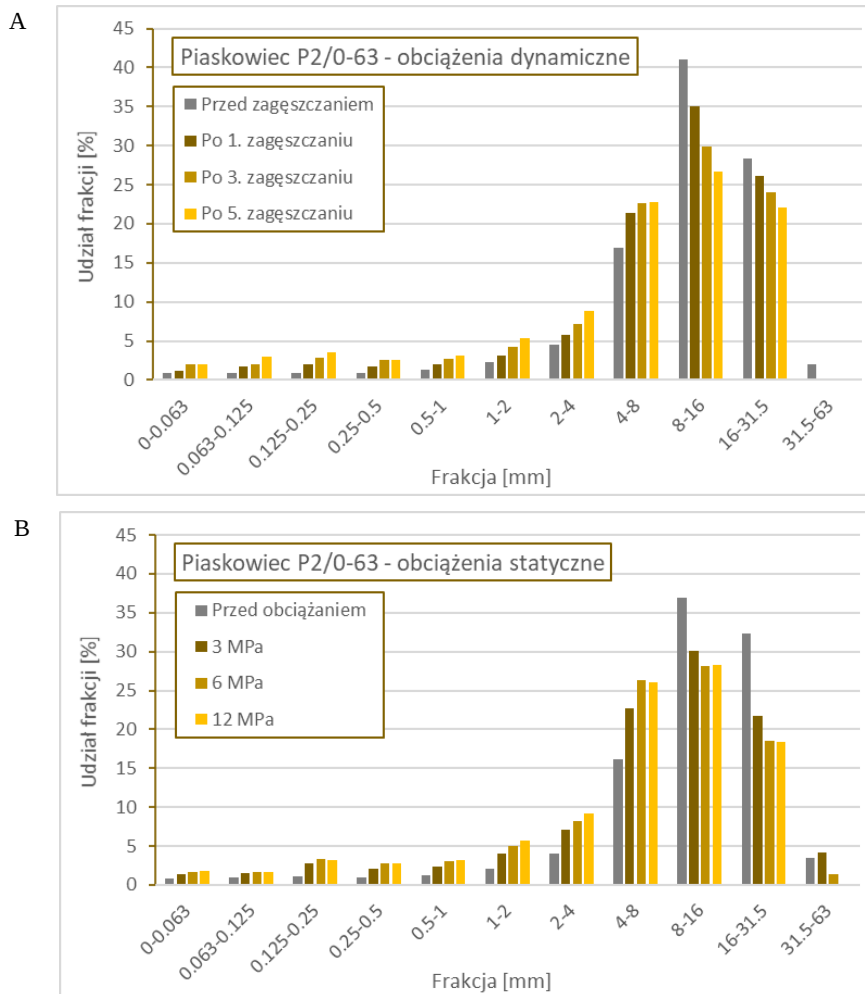
Do analizy porównawczej efektów wywołanych przez obciążenia dynamiczne i statyczne wybrano próbę piaskowców magurskich (rys. 3A, B) i wapieni paleozoicznych (rys. 4A, B) w pełnym uziarnieniu z dominującą frakcją 8–16 mm i znaczącym udziałem zbliżonych frakcji, tj. 4–8 i 16–31,5 mm.

Zastosowane obciążenia – jak poprzednio, doprowadziły do istotnego zmniejszenia udziałów ziaren największych (>8 mm), w szczególności we frakcjach dominujących. Powstające odłamki zwiększały przede wszystkim udział frakcji sąsiednich. Stąd znacznie większy wzrost ilości ziaren frakcji 4–8 i 2–4 mm niż ziaren >1 mm.

W przypadku znacznie bardziej nieforemnego kruszywa piaskowcowego pękanie ziaren następowało najintensywniej po pierwszym cyklu zagęszczania (rys. 3A) czy miażdżenia (rys. 3B), podczas gdy dla kruszywa wapiennego zmiany udziałów poszczególnych frakcji miały charakter stopniowy (rys. 4A, B). Ponadto piaskowce największych frakcji, w szczególności dominującej 8–16 mm, w większym udziale niż wapienie uległy rozpadowi w wyniku uderzeń ubijaka Proctora po zakończeniu wszystkich 5 cykli.

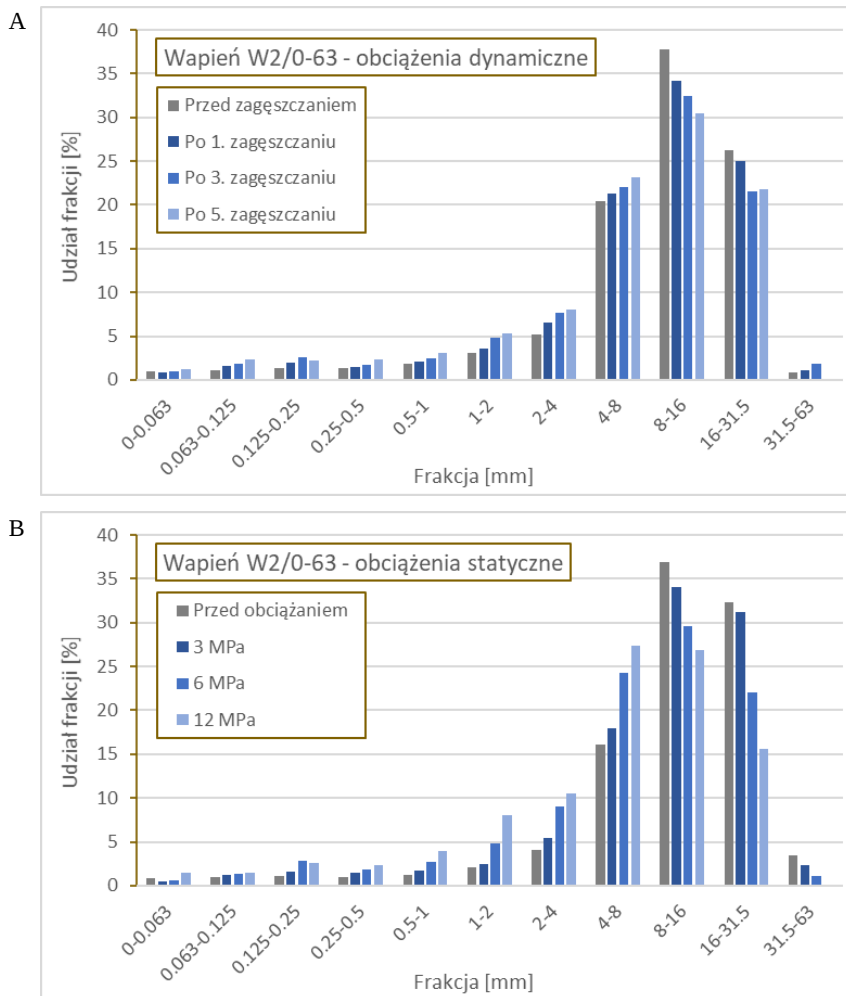
Porównując wyniki uzyskane poprzez działanie obciążeń dynamicznych i statycznych, należy zauważyć, że dynamiczne oddziaływania skutkują w kolejnych cyklach bardziej stopniowym procesem rozkruszania większych ziaren, niż dla obciążeń statycznych. W tym drugim przypadku zastosowanie już niewielkich naprężeń, które jednak rozchodzą się równomiernie w całej objętości materiału, doprowadza do znacznego spękania ziaren dominujących frakcji. Dalsze zwiększanie obciążenia (nawet 2- czy 4-krotne) nie daje tak bardzo wielokrotnionego efektu degradacji kruszywa.

Z kolei, analiza udziałów kruszywa w poszczególnych frakcjach skłania do wniosku, że końcowy efekt rozdrobnienia uzyskany po 5. cyklu zagęszczania aparatem Proctora (metodą II) jest podobny do tego, jaki stwierdzono po zastosowaniu statycznego obciążenia na tłok aparatu Abbicha o wartości 100 kN, dające teoretyczne naprężenia ~6 MPa na materiał pod tłokiem.



Rys. 3. Zmiany uziarnienia piaskowców magurskich
wywołane obciążaniem dynamicznym (A) i statycznym (B) (mieszanka 0–63 mm)

Fig. 3. Grain size changes of Magura sandstones
caused by dynamic (A) and static (B) load (mixture 0–63 mm)



Rys. 4. Zmiany uziarnienia wapieni krystalicznych wywołane obciążaniem dynamicznym (A) i statycznym (B) (mieszanka 0–63 mm)

Fig. 4. Grain size changes of crystalline limestones caused by dynamic (A) and static (B) load (mixture 0–63 mm)

4.3. ZMIANY KSZTAŁTU KRUSZYWA WYWOŁANE OBCIĄŻENIEM DYNAMICZNYM I STATYCZNYM

Oprócz uziarnienia, które ma duże znaczenie dla wypełniania wolnych przestrzeni podłoża budowlanego, istotną cechą kruszywa stosowanego jako mieszanki, m.in. do nasypów i na podbudowy, jest obecność ziaren nieforemnych – płaskich i wy-

dłużonych, które ze względu na swój kształt łatwo ulegają pękaniu pod wpływem nacisku.

Ponadto ziarna takie utrudniają szczelne rozłożenie mieszanki betonowej. Z kolei pod płaskimi ziarnami może gromadzić się woda, która odparowuje w późniejszym czasie, pozostawiając wolne przestrzenie w betonie [3].

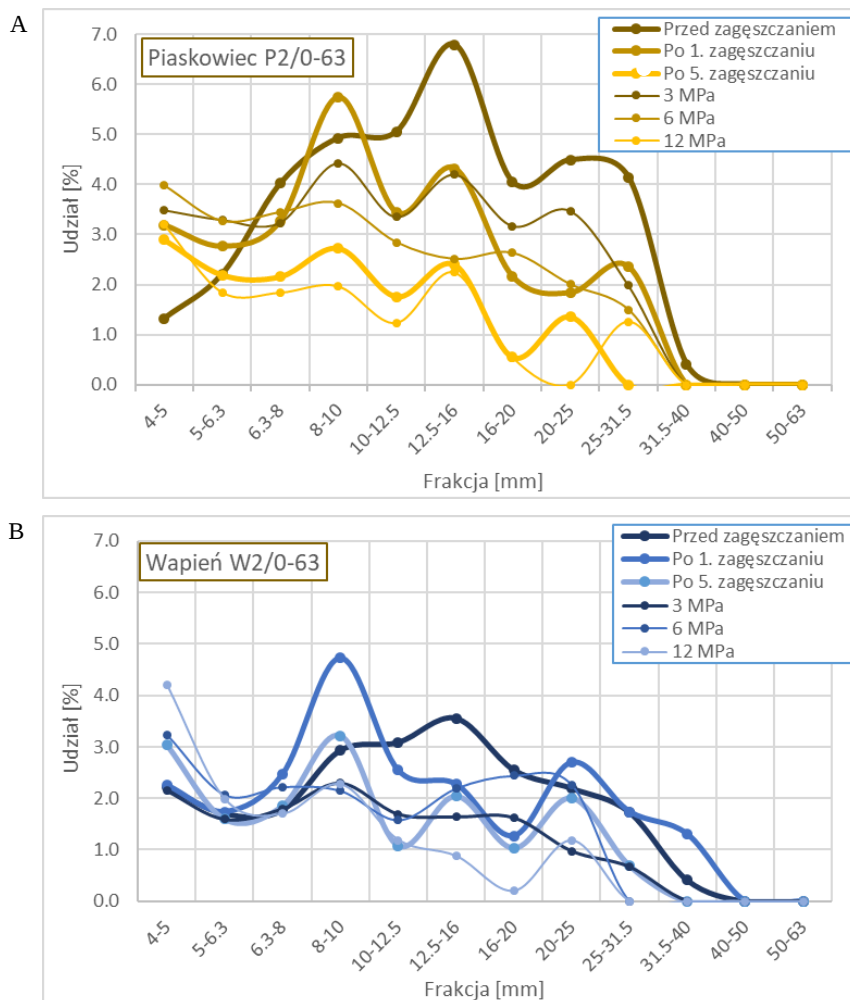
Wyniki oznaczeń wskaźnika płaskości i wskaźnika kształtu zamieszczono w tabeli 1. Parametry te są ze sobą dość silnie skorelowane, ponieważ wskaźnik kształtu ma na celu oddzielenie ziaren foremnych (zasadniczo izometrycznych) od wydłużonych i płaskich. Ilość tych ostatnich oznaczana jest przez wskaźnik płaskości. Dlatego w badaniach kruszyw poddanych uprzednio obciążeniom oznaczono tylko tę wielkość.

Uzyskane dane wskazują, że próby użyte w pierwszym etapie badań (P1, W1, WD1) charakteryzowały się znacznie mniejszym udziałem ziaren nieforemnych, natomiast spośród dwóch kolejnych – piaskowce (P2) miały bardzo wysokie wskaźniki płaskości i kształtu (tab. 1). Wynika to z obecności równoległych do uławicenia płaszczyzn podzielności, niewidocznych makroskopowo [1, 2]. Procesy dynamicznego i statycznego obciążania prób doprowadziły do znacznego obniżenia tych wartości, co niestety sprzyjało jednocześnie rozdrabnianiu materiału. Również w przypadku wapieni zmienia się kształt ziaren poddawanych naprężeniom, ale nie zawsze prowadzi to do obniżenia całkowitego wskaźnika płaskości.

Tabela 1. Wskaźnik płaskości i wskaźnik kształtu badanych kruszyw
Table 1. Flakiness index and shape index of the studied aggregates

Rodzaj kruszywa	Symbol próbki	Wskaźniki						
		kształtu	płaskości	płaskości próbek poddanych obciążeniom				
		próbek pierwotnych		dynamicznym		statycznym		
		SI	FI	1 cykl	5 cykli	3 MPa	6 MPa	12 MPa
		%						
Piaskowiec	P1	19	11	–	–	–	–	–
Wapień	W1	26	15	–	–	–	–	–
Wapień i dolomit	WD1	19	11	–	–	–	–	–
Piaskowiec	P2	53	37	29	16	31	24	14
Wapień	W2	25	24	23	17	14	18	14

Dokładniejsza analiza wskaźników płaskości dla poszczególnych frakcji (rys. 5) pozwala stwierdzić, że udział ziaren płaskich maleje dla dużych frakcji (>8 mm) wraz z kolejnymi cyklami obciążania materiału skalnego. Z kolei w najdrobniejszej z badanych frakcji (4–5 mm) udział ziaren płaskich wzrasta (w przypadku badanych kruszyw – 2- i 3-krotnie). Podobnie jak poprzednio, o ile zależności te są wyraźne dla piaskowców (rys. 5A), o tyle w przypadku wapieni obraz zmian jest bardziej skomplikowany (rys. 5B).

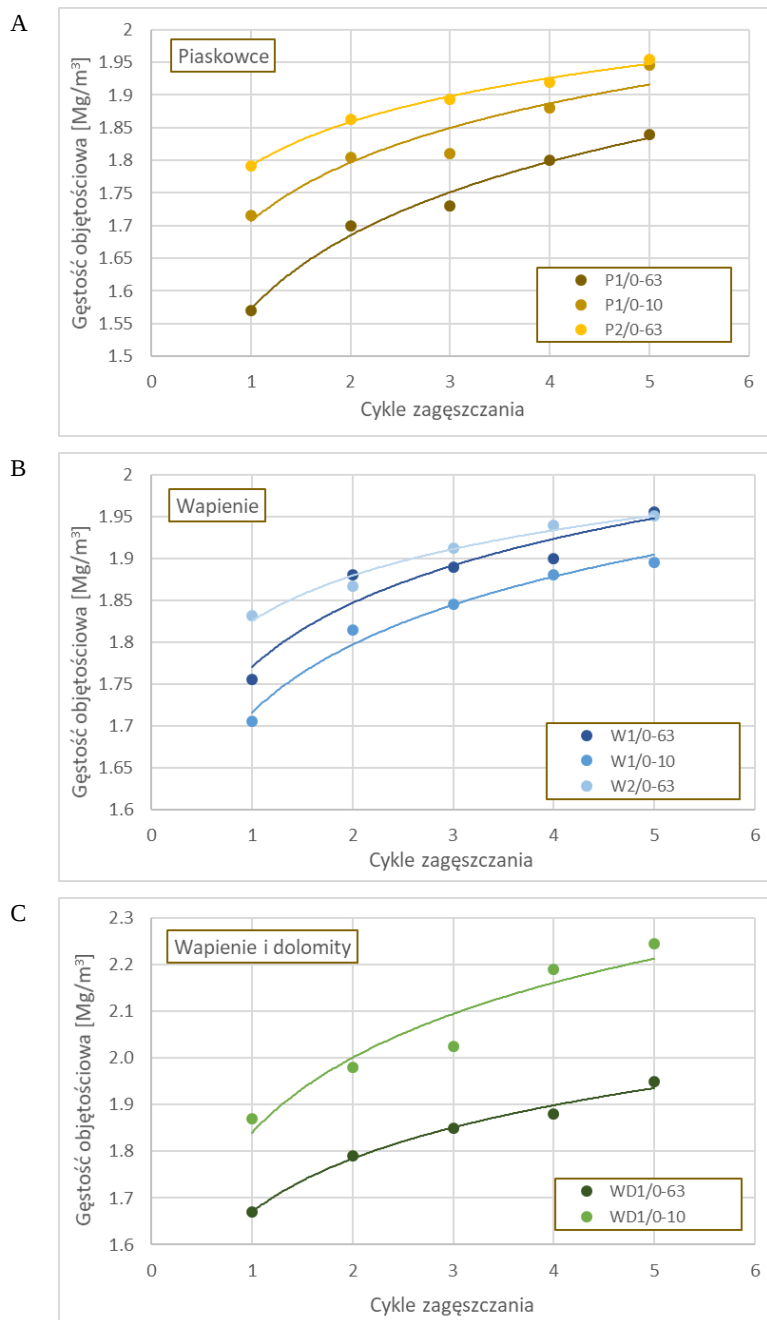


Rys. 5. Zmiany udziału ziaren płaskich wywołane obciążaniem dynamicznym (grube linie) i statycznym (cienkie linie) w mieszankach 0–63 mm

Fig. 5. Changes in the share of flat grains caused by dynamic (thick lines) and static (thin lines) loading in the 0–63 mm mixtures

4.4. ZMIANY GĘSTOŚCI WYWOŁANE WIELOKROTNYM ZAGĘSZCZANIEM

Procedura ubijania kruszywa w aparacie Proctora została zaproponowana jako laboratoryjne odzwierciedlenie zagęszczania gruntu w trakcie prac budowlanych i drogowych. Metodyka przyjęta w niniejszej pracy powoduje, że stopień zagęszczenia zależy w tym przypadku jedynie od uziarnienia materiału kruszywowego i kształtu jego



Rys. 6. Zmiany gęstości pozornej mieszanki 0–63 wywołane kolejnymi cyklami zagęszczania
 Fig. 6. Changes in apparent density of the 0–63 mixture caused by subsequent compaction cycles

ziaren, a tym samym ich ułożenia w mierzalnej przestrzeni. Uzyskane wyniki gęstości objętościowej wskazują na to, że w żadnym przypadku nie osiągnięto maksymalnego zagęszczenia i zapewne dalsze rozdrabnianie materiału może ten parametr zwiększyć (rys. 6). Zasadniczo większe rozdrobnienie materiału sprzyja oczywiście wypełnieniu przestrzeni i wyższej gęstości.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że struktura petrograficzna kruszyw odgrywa kluczową rolę w ich reakcji na obciążenia dynamiczne i statyczne.

Piaskowce magurskie cechowały się wyższym wskaźnikiem płaskości i kształtu ziaren, co powodowało większą podatność na dezintegrację pod wpływem obciążeń.

Wapienie paleozoiczne wykazywały stopniowe zmiany uziarnienia w trakcie badań, a wapienie i dolomity mezozoiczne charakteryzowały się złożoną reakcją na nacisk statyczny, powodujący istotne spękania.

Porównanie wyników wskazało, że dynamiczne obciążenia powodują stopniowe zmiany uziarnienia, podczas gdy obciążenia statyczne prowadziły do gwałtownego rozpadu większych ziaren. Ostateczne wyniki sugerują, że dla zastosowań inżynierskich wybór odpowiedniego kruszywa powinien uwzględniać nie tylko jego początkowe parametry granulometryczne, ale również właściwości mechaniczne oraz odporność na rozkruszanie pod wpływem obciążeń.

Badania przeprowadzono w ramach działalności statutowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk oraz ze środków subwencji badawczej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie nr 16.16.140.315.

LITERATURA

- [1] BROMOWICZ J., FIGARSKA-WARCHOŁ B., *Znaczenie orientacji spękań skał macierzystych dla kształtu ziaren kruszywa*, *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2010, 34, 4, 85–100.
- [2] FIGARSKA-WARCHOŁ B., BROMOWICZ J., *The influence of joints and micro-fractures on the limestone aggregate shape and quality*, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 2010, 26, 4, 89–108.
- [3] KARAHAN S., GÜNEYLI H., GÜNEYLI A., *Wpływ wskaźnika płaskości ziaren kruszywa grubego na właściwości betonu*, *Cement Wapno Beton* 2021, 26 (2), 146–155.
- [4] KOZŁOWSKI S., *Surowce skalne Polski*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986.
- [5] OSTOJSKI F., *Kruszywa – wpływ zagęszczenia na jego uziarnienie*, praca dypl., promotor A. Borecka, Archiwum BG AGH, 2020.
- [6] PISARCZYK S., *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2004.
- [7] PN-B-004481:1988. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
- [8] PN-B-06714-40:1978. *Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie wytrzymałości na miażdżenie*.

- [9] PN-EN 933-1:2012. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.*
- [10] PN-EN 933-3:2012. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości.*
- [11] PN-EN 933-4:2008. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie kształtu ziarn – Wskaźnik kształtu.*
- [12] PN-EN 13286-2:2010. *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 2: Metody określania gęstości i zawartości wody. Zagęszczanie metodą Proctora.*

INFLUENCE OF DYNAMIC AND STATIC LOADING ON GEOMETRICAL PROPERTIES OF AGGREGATES

The aim of the study was to determine the influence of the grain size and geometric properties of aggregates on their susceptibility to crushing during the compaction process. The results indicate that the fraction dominating the initial grain size is subject to the greatest crushing. The presented studies show the influence of grain size and the type of applied loads (static or dynamic) on the aggregate crushing process and the relationship between the flatness index and susceptibility to mechanical degradation.

Magdalena DUCHNOWSKA
Alicja BAKALARZ
Tomasz STĘPIEŃ
Piotr KARWOWSKI

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

OCENA EFEKTYWNOŚCI SEPARACJI SKŁADNIKÓW UŻYTECZNYCH Z DROBNOUZIARNIONYCH ODPADÓW GRANITOWYCH Z OBRÓBKAMI KAMIENIA

Podczas produkcji elementów kamiennych ze skał granitowych w zakładach obróbczych powstają drobnoziarniste odpady skalne. Odpady te stanowią od 5 do nawet 30% masy bloku kamiennego. Odpady takie na ogół nie są wykorzystywane i najczęściej składowane są jako materiał nieużyteczny. Zawierają w swoim składzie mineralnym głównie skalenie, kwarc i minerały z grupy łyszczyków. Po odseparowaniu z tych odpadów minerałów barwnych, mogłyby stać się potencjalnym źródłem surowców skaleniowo-kwarcowych. W pracy podjęto próbę wydzielenia koncentratów skaleniowo-kwarcowych o obniżonej zawartości związków żelaza z drobnoziarnistych odpadów z produkcji elementów kamiennych z granitowych bloków z Masywu strzegomskiego. Dokonano analizy składu ziarnowego i chemicznego badanej próbki odpadów oraz przeprowadzono wstępne badania separacji składników użytecznych w układach separacji magnetycznej, grawitacyjnej i flotacyjnej. Na podstawie badań stwierdzono, że możliwe jest wydzielenie z tych materiałów koncentratów skaleniowo-kwarcowych o niskiej zawartości tlenków żelaza, co mogłoby stanowić podstawę do zaprojektowania koncepcji ich gospodarczego wykorzystania.

1. WPROWADZENIE

Obróbka granitoidów w produkcji elementów kamiennych czy kruszyw łamanych powoduje powstawanie dużych ilości drobnoziarnistych odpadów skalnych, w postaci stałej lub szlamów [1]. Szacuje się, że podczas cięcia traci się ok. 5–30% całkowitego bloku granitowego [2–3]. Odpady te składają się z wody, wapna, śrutu stalowego i cząstek skalnych. Po wysuszeniu pozostałości te stają się pyłem i są klasyfikowane jako odpady niebezpieczne ze względu na ilość rozpuszczalnego żelaza. Obecność żelaza w tych odpadach jest konsekwencją operacji cięcia, w której śrut stalowy, źródło żelaza,

jest często dodawany na tym etapie [4–5]. Ze względu na trudności w racjonalnym zagospodarowaniu odpadów skalnych, zakłady obróbcze najczęściej gromadzą je na składowiskach terenowych. Tylko w ograniczonym stopniu znajdują one zastosowanie w przemyśle budowlanym lub ceramicznym. Ich efektywne wykorzystanie, zgodnie z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym, ma znaczący wpływ na środowisko naturalne, a także na efektywność oraz rentowność zakładów. Tego typu odpady są traktowane głównie jako odpadowy materiał skalny, bez próby rozdziału ich składników [1].

Drobnnoziarniste odpady skalne charakteryzują się uziarnieniem $<1\text{--}2\text{ mm}$, a często $<0,1\text{ mm}$. Przeważnie też wykazują wysoki stopień uwolnienia składników mineralnych, dzięki czemu ich praktyczne wykorzystanie w przypadku separacji składników nie wymaga dodatkowej kosztownej operacji mielenia. Tak jest np. w przypadku odpadów granitowych, bazaltowych i innych skał wulkanicznych powstających w branży kruszyw, a także podczas pozyskiwania elementów kamiennych w zakładach obróbczych [1].

W ostatnich latach różne gałęzie przemysłu coraz chętniej sięgają po ten rodzaj materiału. Przykładowo odpady granitowe mogą stanowić potencjalną bazę surowców skaleniowo-kwarcowych [1, 6–7]. Szerokie badania nad możliwością wykorzystania odpadów granitowych w przemyśle skaleniowym prowadzili Ociepa [8] i Łuszczkiewicz [9]. Podobnie jak odpady bazaltowe, odpady granitowe mogą również stanowić dodatek do betonów [1, 3, 7, 10–12], a pyły bazaltowe w produkcji szkliv ceramicznych [13].

Bardzo ważnym kierunkiem zagospodarowania odpadów skalnych jest także ich wykorzystanie jako naturalnego nawozu mineralnego. Najwięcej danych dotyczy drobnnoziarnistych odpadów z produkcji kruszyw kwaśnych i zasadowych skał magmowych. Głównymi przykładami są odpady bazaltowe i granitowe, a także sjenitowe i gabrowe [14–18]. Mechanizm uwalniania Ca, Fe, K, Mg, Na, P i Si z drobnnoziarnistych odpadów skalnych z różnych, zarówno kwaśnych, jak i zasadowych wydobywanych złóż skał magmowych i wulkanicznych został opisany przez wielu autorów [19–21].

Mikroelementy z mączek skalnych są uwalniane w sposób powolny i długotrwały, co zmniejsza niebezpieczeństwo przedozowania substancji wprowadzonej do gleby. W przypadku nawozów mineralnych, im drobniejszy materiał skalny, tym większy stosunek jego powierzchni do objętości i tym łatwiejsze jest uwalnianie składników odżywczych do gleby. Drobne uziarnienie odpadów skalnych zapewnia często wysoki stopień uwolnienia poszczególnych składników mineralnych skały niwelując koszty związane z koniecznością prowadzenia energochłonnego rozdrabniania surowców pierwotnych do produkcji nawozów [1]. Agronomiczne zalety stosowania odpadów skalnych jako naturalnego nawozu mineralnego dla gleby mogą zmniejszyć negatywny wpływ konwencjonalnego rolnictwa na środowisko [14, 15, 22].

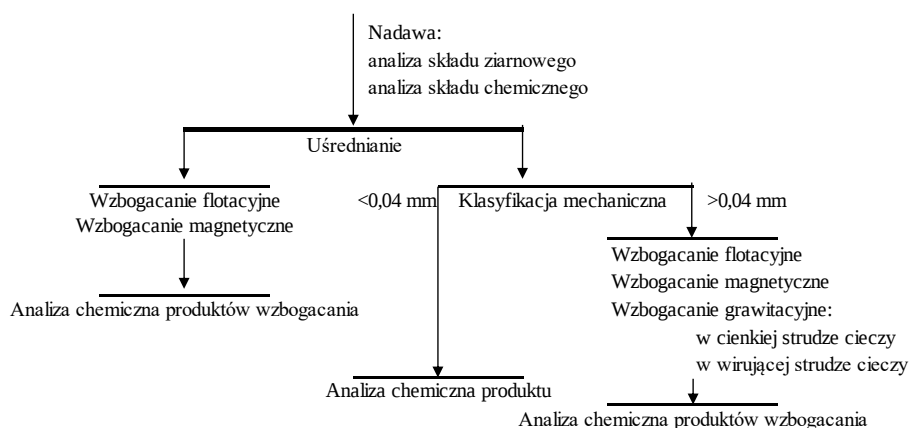
Powstające w zakładach przeróbki kruszyw i zakładach obróbczych odpady granitowe – jak skała pierwotna, składają się głównie ze skaleni, kwarcu i minerałów łuszczykowych. Obecnie większość surowców skaleniowych otrzymywanych jest w wyniku wzbogacania flotacyjnego leukogranitów [9]. Efektywne wykorzystanie powstających w układach przeróbczych i obróbczych odpadów granitowych mogłoby zwiększyć bazę

surowcową dla producentów koncentratów skaleniowych. Celem pracy była ocena efektywności separacji koncentratów skaleniowo-kwarcowych z odpadów granitowych, jako potencjalnego źródła surowców skaleniowych, przy użyciu różnych metod wzbogacania.

2. MATERIAŁY DO BADAŃ I METODYKA

Materiałem do badań były drobnouziarniste odpady powstających podczas produkcji elementów kamiennych w wyniku obróbki wstępnej bloków granitowych piłami linoowymi i tarczowymi. Materiałem pierwotnym był granit z Masywu strzegomskiego. Odpady pobrano w postaci zawiesiny z wylewu osadnika stożkowego z układu obiegu wodno-mułowego. W celu przyspieszenia sedymentacji do osadnika dozowano kationowy flokulant. Próbkę pobrano w postaci wodnej zawiesiny o gęstości ok. 2150 g/dm^3 , a masa części stałych próbki wynosiła ok. 60 kg.

W pierwszym etapie badań skład ziarnowy oznaczano podczas ręcznej analizy sitowej na mokro (klasyfikacja mechaniczna) oraz metodą dyfrakcji laserowej (Mastersizer 3000, Malvern Panalytical), a chemiczny przy użyciu spektrometru fluorescencji rentgenowskiej EDXRF PANalytical Epsilon 3X produkcji Malvern Panalytical B.V. (Almelo, Holandia). W następnym etapie wydzielono próbki do procesów wzbogacania. Wyseparowano uśrednione próbki o pełnym składzie ziarnowym. Następnie w wyniku klasyfikacji mechanicznej z nadawy usunięto szlamy, a dalszą część badań prowadzono dla klasy ziarnowej $>0,04 \text{ mm}$. W całym przekroju ziarnowym nadawę wzbogaczano flotacyjnie i magnetycznie. Klasę ziarnową $>0,04 \text{ mm}$ wzbogaczano flotacyjnie i magnetycznie oraz w układzie wzbogacania grawitacyjnego w płytkim i w wirującym strumieniu cieczy. Uproszczony schemat metodyki badań przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat metodyki badań
Fig. 1. Scheme of research methodology

Proces separacji magnetycznej wykonano w separatorze magnetycznym izodynamicznym typu Frantz z natężeniem prądu zasilającego uzwojenie separatora 0,4 A. Separację prowadzono w układzie operacji pojedynczej. Nadawę stanowił odpad z obróbki granitów w pełnym uziarnieniu oraz klasa ziarnowa tego odpadu $>0,04$ mm. Masa nadawy do pojedynczej operacji wynosiła około 200 g.

Do badań flotacyjnych zastosowano mechaniczną maszynkę flotacyjną Denver D12 z samozasysającym powietrze wirnikiem, o objętości komory flotacyjnej $1,5 \text{ dm}^3$. Podobnie, jak w przypadku separacji magnetycznej flotowano odpad w pełnym uziarnieniu oraz w klasie ziarnowej $>0,04$ mm. Masa nadawy do flotacji każdorazowo wynosiła 400 g. Do flotacji stosowano odczynniki flotacyjne: roztwór kwasu siarkowego(VI) (regulator pH), chlorowodorek dodecyloaminy (zbieracz z grupy kolektorów jonowych kationowych), mieszanina eterów poliglikolowych (spieniacz). Regulator dodawany był w celu utrzymania pH w zakresie od 2,0 do 2,5. Dawka speniacza wynosiła 20 g/Mg, natomiast zbieracza dla flotacji w pełnym uziarnieniu 75 g/Mg, natomiast klasę $+0,04$ mm flotowano w dwóch układach, gdzie dawki zbieracza wynosiły odpowiednio 75 i 100 g/Mg.

Wzbogacanie grawitacyjne przeprowadzono wyłącznie dla materiału odszlamionego. Separację grawitacyjną w pierwszym etapie zrealizowano w układzie separacji w cienkiej strudze cieczy na stole koncentracijnym typu Wilfley o powierzchni roboczej $0,7 \text{ m}^2$ i blacie rowkowanym. Podczas procesu stwierdzono, że nadawa nie podlega selektywnemu rozdziałowi, stąd zdecydowano się zamienić ten układ na separację grawitacyjną w wirującym strumieniu cieczy separatorem Knelsona. Ciśnienie wody fluidyzacyjnej doprowadzanej do separatora ustawiono na poziomie 22 kPa.

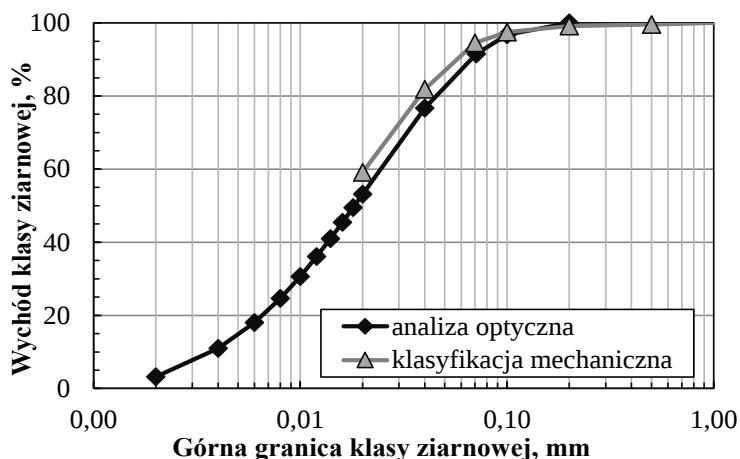
W wyniku każdego procesu otrzymywano po dwa produkty: frakcję magnetyczną/niemagnetyczną (separacja magnetyczna), produkt pianowy/komorowy (flotacja), frakcję lekką/ciężką (separacja grawitacyjna).

Skład chemiczny otrzymanych produktów określono przy użyciu spektrometru fluorescencji rentgenowskiej EDXRF. Analizę efektywności wzbogacania oparto na selektywności rozkładu FeO , SiO_2 i K_2O w produktach wzbogacania. Jakościowo-ilościowe bilanse wzbogacania obliczono w stosunku do nadawy w pełnym zakresie uziarnienia. Dodatkowo dla klasy ziarnowej $+0,04$ mm wyznaczono parametry w układzie operacyjnym (w stosunku do jakości nadawy wchodzącej do procesu) w celu przedstawienia różnic w selektywności wzbogacania rozpatrywanych składników w produktach podczas wzbogacania tej klasy ziarnowej różnymi metodami.

3. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 1 przedstawiono skład ziarnowy badanych odpadów z obróbki granitów strzegomskich. Na wykresie przedstawiono wyniki dla klasyfikacji mechanicznej ręcznej i analizy optycznej, tak aby ująć pełną charakterystykę składu ziarnowego dla

uziarnienia $>0,02$ mm. Próbkę charakteryzowała się bardzo drobnym uziarnieniem. Zawartość najdrobniejszej frakcji $<0,04$ mm była na poziomie ok. 80%.



Rys. 2. Skład ziarnowy nadawy do badań

Fig. 2. Particle size distribution of waste sample

W tabeli 1 zestawiono wyniki analiz chemicznych badanej próbki odpadów. Przedstawiony skład chemiczny jest typowy dla składu chemicznego granitów (Si, K, Ca, Al). Próbkę odpadów charakteryzowała się wysoką zawartością żelaza, co w układzie rozpatrywania ich jako potencjalnego surowca skaleniuowo-kwarcowego jest niekorzystne, zwłaszcza rozpatrując możliwości wykorzystania tych odpadów w przemyśle ceramicznym. Wiąże się to ze składem mineralnym granitów strzegomskich (za wyjątkiem leukogranitu), a także z metodami cięcia bloków. W przypadku żelaza i tytanu oznaczenia podano w formie pierwiastkowej i tlenkowej.

Tabela 1. Skład chemiczny badanej próbki odpadów

Table 1. Chemical composition of waste sample

Składnik	Nadawa z oznaczenia	Nadawa z bilansu	Klasa ziarnowa	
			>0,04 mm	<0,04 mm
	Wychód, %			
	100,000	100,000	22,024	77,976
	Zawartość składnika w nadawie/klasie ziarnowej, %			
1	2	3	4	5
SiO ₂	70,531	70,055	64,816	71,535
Al ₂ O ₃	13,324	12,761	11,079	13,235
CaO	1,556	1,518	1,149	1,623

1	2	3	4	5
MnO	0,062	0,103	0,121	0,097
K ₂ O	4,483	4,733	4,929	4,678
P ₂ O ₅	0,137	0,290	0,252	0,301
TiO ₂	0,429	0,451	0,546	0,424
Ti	0,257	0,270	0,327	0,254
Fe ₂ O ₃	4,482	4,837	5,965	4,519
Fe	3,135	3,383	4,172	3,160
As	0,088	0,004	0,003	0,005
Ba	0,002	0,818	0,921	0,789
Cr	0,013	0,016	0,019	0,016
Cu	0,010	0,011	0,010	0,011
Ni	0,000	0,002	0,001	0,002
Zn	0,012	0,024	0,023	0,025
Rb	0,037	0,039	0,040	0,039
Sr	0,025	0,026	0,024	0,026
Y	0,012	0,013	0,010	0,014
Zr	0,048	0,055	0,034	0,061

Na podstawie analizy uzysków i zawartości można stwierdzić, że eksperymenty w pełnym składzie ziarnowym odpadów charakteryzowały się niską efektywnością wzbogacania (tab. 2). Oznacza to, że nie jest możliwe selektywne wyseparowanie produktów zróżnicowanych pod względem rozpatrywanych składników bez wcześniejszego wydzielenia klasy ziarnowej <0,04 mm. Mimo to, zarówno w przypadku separacji magnetycznej jak i flotacji, widoczne jest zróżnicowanie w zawartościach nośników żelaza (głównie łuszczyków) w produktach wzbogacania, przy czym nie jest ono tak znaczące, by zapewniało odpowiednią jakość dla produktów skaleniowo-kwarcowych.

Wyseparowanie z nadawy klasy < 0,04 mm wyraźnie polepszyło efektywność rozdziału produktów zarówno dla wzbogacania magnetycznego jak i flotacji. Produkty skaleniowe-kwarcowe charakteryzowały się wyraźnie obniżoną w stosunku do nadawy pierwotnej zawartością żelaza. Nawet przy niższej dawce aminy flotacja przebiegała z wysoką selektywnością, co w kontekście wcześniejszych badań [9] sugeruje, że w przypadku koncentratów skaleniowo-kwarcowych nie są konieczne wysokie dawki amin (na poziomie 150 g/Mg), a podstawą uzyskania wysokiej efektywności procesu jest utrzymanie pH w granicach 2,0–2,5. Dodatkowo zauważono, że stosowne w zakładzie obróbczym do procesu sedimentacji grawitacyjnej kationowe flokulanty nie wpływają na pogorszenie jakości flotacji.

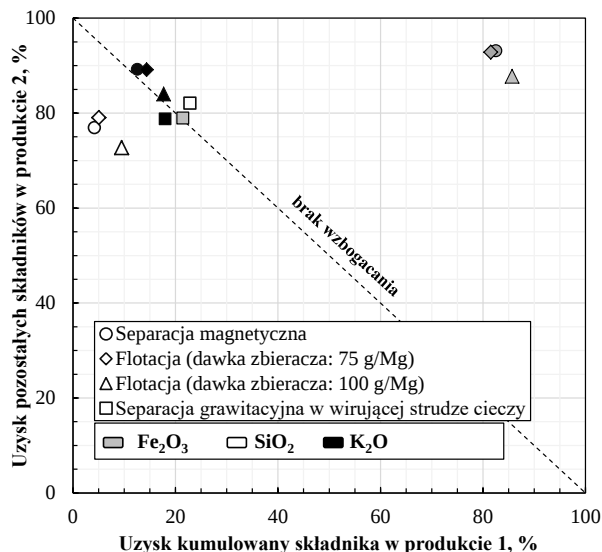
Analiza wyników separacji grawitacyjnej w wirującym strumieniu cieczy oraz doświadczenia zdobyte podczas separacji grawitacyjnej w płytkim strumieniu cieczy wskazują, że metody grawitacyjne nie są skuteczne dla tego rodzaju materiałów.

Tabela 2. Jakościowo-ilościowe bilanse wzbogacania dla wszystkich wykonanych eksperymentów
 Table 2. Qualitative-quantitative enrichment balances for all performed experiments

Nazwa produktu	Wychód, %	SiO ₂ , %		K ₂ O, %		Fe ₂ O ₃ , %	
		zawartość	uzysk	zawartość	uzysk	zawartość	uzysk
Nadawa: próbka pierwotna w pełnym zakresie uziarnienia							
Separacja magnetyczna							
Fracja magnetyczna	3,51	61,22	3,17	4,18	3,12	8,07	5,79
Fracja niemagnetyczna	96,49	68,08	96,83	4,72	96,88	4,77	94,21
Nadawa	100,00	67,84	100,00	4,70	100,00	4,89	100,00
Flotacja (dawka zbieracza 75 g/Mg)							
Produkt pianowy	27,30	64,45	25,36	4,80	27,86	9,17	50,50
Produkt komorowy	72,70	71,25	74,64	4,67	72,14	3,38	49,50
Nadawa	100,00	69,39	100,00	4,70	100,00	4,96	100,00
Nadawa: klasa ziarnowa >0,04 mm							
Separacja magnetyczna							
Fracja magnetyczna	2,39	24,91	0,85	5,72	2,89	39,95	20,43
Fracja niemagnetyczna	19,63	69,45	19,47	4,87	20,16	1,03	4,32
Klasa ziarnowa <0,04 mm	77,98	71,53	79,68	4,68	76,95	4,52	75,25
Nadawa	100,00	70,01	100,00	4,74	100,00	4,68	100,00
Flotacja (dawka zbieracza 75 g/Mg)							
Produkt pianowy	2,43	28,52	1,00	6,49	3,32	38,30	19,95
Produkt komorowy	19,59	66,62	18,78	4,78	19,77	1,08	4,52
Klasa ziarnowa <0,04 mm	77,98	71,53	80,23	4,68	76,91	4,52	75,53
Nadawa	100,00	69,53	100,00	4,74	100,00	4,67	100,00
Flotacja (dawka zbieracza 100 g/Mg)							
Produkt pianowy	3,54	37,28	1,89	5,47	4,08	27,66	20,96
Produkt komorowy	18,49	68,04	18,05	4,87	18,99	0,88	3,50
Klasa ziarnowa <0,04 mm	77,98	71,53	80,05	4,68	76,93	4,52	75,54
Nadawa	100,00	69,68	100,00	4,74	100,00	4,66	100,00
Separacja grawitacyjna w wirującej strudze cieczy							
Fracja ciężka	4,64	69,66	4,62	4,28	4,18	5,85	5,67
Fracja lekka	17,38	62,84	15,62	5,21	19,05	5,72	20,77
Klasa ziarnowa <0,04 mm	77,98	71,53	79,76	4,68	76,77	4,52	73,56
Nadawa	100,00	69,94	100,00	4,75	100,00	4,79	100,00

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki wzbogacania klasy ziarnowej >0,04 mm w układzie bilansu operacyjnego w stosunku do sumarycznego składu chemicznego tej klasy. Na podstawie analizy rozkładu punktów na wykresie uzysk-uzysk można stwierdzić, że w przypadku separacji magnetycznej i flotacyjnej rozdział na produkt skaleniowo-kwarcowy i produkt biotytowy przebiegał z wysoką selektywnością wzbogacania. W przypadku

flotacji produkt pianowy stanowił koncentrat wzbogacony w żelazo, natomiast produkt komorowy w skalenie i kwarc. Zarówno flotacja jak i separacja magnetyczna charakteryzują się zbliżoną selektywnością, co wskazuje, że oba te procesy są skuteczne w rozdzieleniu składników badanych odpadów z obróbki granitów strzegomskich.



Rys. 3. Selektywność wzbogacania dla klasy ziarnowej >0,04 mm, liczona w układzie operacyjnym, wykres uzysk-uzysek

Fig. 3. Selectivity of upgrading for fraction >0,04 mm, calculated in the operational system, recovery-recovery graph

Podsumowując, na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że z n-dawy w wyniku klasyfikacji mechanicznej odpadów i wzbogacania flotacyjnego lub separacji magnetycznej możliwe jest wydzielenie ok. 20% strumienia masy produktu skaleniuowo-kwarcowego o obniżonej zawartości tlenków żelaza.

4. PODSUMOWANIE

Zmniejszenie ilości powstających odpadów w układach obróbczych jest niezwykle istotnym zagadnieniem w dyskusji związanej z gospodarką obiegu zamkniętego. Powstające w zakładach obróbczych odpady nie są obecnie wykorzystywane przez żadną z branż i stanowią odpad ostateczny, gromadzony najczęściej w składowiskach terenowych. Dodatkowo zakłady obróbcze obciążone są kosztami ich utylizacji, więc jakiegokolwiek zmniejszenie ilości tych odpadów miałyby wyraźny pozytywny efekt w aspekcie środowiskowym i ekonomicznym.

Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że możliwe jest wydzielenie z analizowanych odpadów części będącej potencjalnym źródłem surowca skaleniowo-kwarcowego, o wyraźnie obniżonej zawartości tlenków żelaza w stosunku do nadawy pierwotnej, co pozwoliłoby na zmniejszenie ilości powstających odpadów z obróbki o ok. 20%. Najlepszy efekt separacji otrzymuje się w układach wzbogacania flotacyjnego i separacji magnetycznej.

Jednocześnie należy wskazać, że przeprowadzone eksperymenty mają charakter wstępny, a w dalszych badaniach nad tym materiałem należałoby skupić się na dopracowaniu metodyki eksperymentów, co mogłoby polepszyć efektywność procesu separacji. Otrzymane wyniki dotyczą odpadów z cięcia granitów strzegomskich, dlatego też badania te należałoby również powtórzyć dla odpadów z innych rejonów.

LITERATURA

- [1] DUCHNOWSKA M., BAKALARZ A., ŁUSZCZKIEWICZ A., 2023, *Properties of Fine-Grained Rock Waste from the Pilawa Gorna Amphibolite and Migmatite Aggregates Production Plant*, Minerals, 13 (3), <https://doi.org/10.3390/min13030345>
- [2] SABOYA J.F., XAVIER G.C., ALEXANDRE J., *The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic*, Construction and Building Materials, 2007, 21, 1950–1960, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.029>
- [3] VIJAYALAKSHMI M., SEKAR A.S.S., PRABHU G.G., *Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste*, Construction and Building Materials, 2013, 46, 1–7, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018>
- [4] SILVA M.A., PAES J.H.R., HOLANDA J.N.F., *Reuse of ornamental rock-cutting waste in aluminous porcelain*, Journal of Environmental Management, 2011, 92, 936–940, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.060>
- [5] JUNCA E., DE OLIVEIRA J.R., ESPINOSA D.C.R., TENÓRIO J.A.S., *Iron recovery from the waste generated during the cutting of granite*, International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12, 465–472, <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0418-6>
- [6] LEWICKA E., *Surowce ceramiczne z odpadów-wybrane przykłady*, Górnictwo Odkrywkowe, 2012, 53 (1–2), 42–46.
- [7] PANNA W., WYSZOMIRSKI P., GAJEK M., *Charakterystyka drobnych frakcji ziarnowych z przeróbki granitów strzegomskich pod kątem ich zastosowania do produkcji płytek ceramicznych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2015, 31 (3), 59–76, DOI 10.1515/gospo-2015-31
- [8] OCIEPA Z., *Ocena porównawcza odpadów granitowych jako surowców do produkcji koncentratów skaleniowych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 1994, 10 (3).
- [9] ŁUSZCZKIEWICZ A., *Wstępne próby pozyskiwania produktów skaleniowych z odpadów granitowych z rejonu Gniewkowa na Dolnym Śląsku*, Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej, 2007, Seria: Inżynieria Środowiska (23), 445–454.
- [10] DOBISZEWSKA M., *Rola pyłów skalnych w kształtowaniu właściwości mieszanki betonowej i betonu*, Materiały Budowlane, 2017, 5, 94–95, <https://doi.org/10.15199/33.2017.05.40>
- [11] GRABIEC A.M., ZAWAL D., KOSTRZEWSKI W., *Effect of Waste Mineral Additives on Flow Stability Over Time in Self-Compacting Concrete Mixes With Low Clinker Content*, Journal of Ecological Engineering, 2015, 16 (4), 206–214, <https://doi.org/10.12911/22998993/59375>
- [12] DOBISZEWSKA M., FRANUS W., TURBIAK S., *Analiza możliwości zastosowania odpadowego pyłu bazaltowego w zaprawie cementowej*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, 2016, 63, nr 1/I, 107–114, <https://doi.org/10.7862/rb.2016.12>

- [13] GACKI F., FELIKS J., WYSZOMIRSKI P., *Badania możliwości wykorzystania odpadowego pyłu bazaltowego*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2013, 52 (44), 3, 174–175.
- [14] GILLMAN G.P., BURKETT D.C., COVENTRY R.J., *Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock*, Applied Geochemistry, 2002, 17 (8), 987–1001, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00078-1)
- [15] DALMORA A.C., RAMOS C.G., OLIVEIRA M.L.S., TEIXEIRA E.C., KAUTZMANN R.M., TAFFAREL S.R., DE BRUM I.A.S., SILVA L.F.O., *Chemical characterization, nano-particle mineralogy and particle size distribution of basalt dust wastes*, Science of the Total Environment, 2016, 539, 560–565, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.141>
- [16] DOS SANTOS TEIXEIRA A.M., DOS SANTOS GARRIDO F.M., MEDEIROS M.E., SAMPAIO J.A., *Effect of thermal treatments on the potassium and sodium availability in phonolite rock powder*, International Journal of Mineral Processing, 2015, 145, 57–65, <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.07.002>
- [17] RAMOS C.G., OLIVEIRA M.L.S., PENA M.F., CANTILLO A.M., AYARZA L.P.L., KORCHAGIN J., BORTOLUZZI E.C., *Nanoparticles generated during volcanic rock exploitation: An overview*, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9, 106441, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106441>
- [18] DA SILVA F.J.P., DE CARVALHO A.M.X., DE CASTRO BORGES P.H., *The gabbro dacite blend as soil remineralizer*, Brazilian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 17, e1419, <https://doi.org/10.5039/agraria.v17i1a1419>
- [19] RAMOS C.G., QUEROL X., DALMORA A.C., DE JESUS PIRES K.C., SCHNEIDER I.A.H., OLIVEIRA L.F.S., KAUTZMANN R.M., *Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer*, Journal of Cleaner Production, 2017, 142, 2700–2706, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.006>
- [20] NUNES J.M.G., KAUTZMANN R.M., OLIVEIRA C., *Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil)*, Journal of Cleaner Production, 2014, 84, 649–656, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.032>
- [21] PLATA L.G., RAMOS C.G., OLIVEIRA M.L.S., OLIVEIRA L.F.S., *Release kinetics of multi-nutrients from volcanic rock mining by-products: Evidences for their use as a soil remineralizer*, Journal of Cleaner Production, 2021, 279, 123668, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123668>
- [22] SIKORA L.J., *Effects of basaltic mineral fines on composting*, Waste Management, 2004, 24, 139–142, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.08.005>

EVALUATION OF SEPARATION EFFICIENCY OF USEFUL COMPONENTS FROM FINE-GRAINED GRANITE WASTE FROM STONE PROCESSING

During production of stone elements from granite rocks, fine-grained rock waste is generated in processing plants. This waste accounts for 5 to as much as 30% of the weight of the stone block. In general, such waste is not used and is stored as useless material. Wastes from granite processing mainly contain feldspars, quartz and biotite. After separating colored minerals from this waste, it could become a potential source of feldspar-quartz raw materials.

This paper presents the results of attempt to obtain feldspar-quartz concentrates with reduced iron compounds content from fine-grained waste from the production of stone elements from granite rock blocks (Strzegom massif region). Analyses of the grain and chemical composition of the studied waste sample were carried out, as well as preliminary studies of the separation of useful components from these wastes by magnetic, gravity and flotation separation. On the basis of the study, it was concluded that it is possible to separate feldspar-quartz concentrates with low iron oxides content from these materials, which can form the basis of a project for their economic utilization.

Magdalena DUCHNOWSKA
Paweł STRZAŁKOWSKI
Alicja BAKALARZ
Urszula KAŻMIERCZAK
Piotr KARWOWSKI
Michał WOLNY
Tomasz STĘPIEŃ

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

ANALIZA WPLYWU ROZDRABNIANIA NA PARAMETRY GEOMETRYCZNE KRUSZYWA BAZALTOWEGO

Właściwości geometryczne kruszyw określają ich przydatność do odpowiedniego zastosowania, dlatego produkcja kruszyw powinna zapewniać spełnienie wysokich wymagań jakościowych gotowego produktu. Celem pracy była ocena wpływu rozdrabniania kruszywa bazaltowego w różnych typach kruszarek na jego właściwości geometryczne. Procesy rozdrabniania prowadzono w kruszarce szczękowej i stożkowej, a nadawą do rozdrabniania były próbki sklasyfikowane pod względem wskaźnika płaskości. Oceny procesu kruszenia dokonano na podstawie charakterystyk składu ziarnowego, wskaźników kształtu i płaskości próbek przed i po kruszeniu. Stwierdzono, że przy zachowaniu tej samej szerokości szczeliny z kruszarki stożkowej otrzymywane jest drobniejsze ziarno niż z kruszarki szczękowej. Dla obu typów kruszarek wykazano, że ziarna płaskie kumulują się w najdrobniejszych frakcjach, przy czym rozdrabnianie w kruszarce stożkowej skutkuje wyższą zawartością ziarn nieforemnych i płaskich. W wyniku analizy petrograficznej wykonanej przed i po kruszeniu stwierdzono, że skład litologiczny nadawy ma istotny wpływ na skład ziarnowy. Kruszywa bazaltowe o wyższej zawartości tufów i zwietrzeliny wykazywały wyższy stopień rozdrobnienia oraz były bardziej podatne na kumulację ziarn płaskich i występowanie spękań w strukturze tych ziarn.

1. WPROWADZENIE

Właściwości fizyczne, mechaniczne i geometryczne kruszyw skalnych określają jakość konstrukcji inżynierskich związanych z kruszywami. Jedną z najważniejszych właściwości kruszyw jest kształt ziarn. Ta kluczowa właściwość kruszywa była badana w wielu aspektach. Wykonana analiza literatury przedmiotu [1–10] wykazała, że właściwości geometryczne kruszyw skalnych są zależne od procesów skałotwórczych. Gawenda

[3, 4, 11] zauważa, że w wyniku wielostadialnego rozdrabniania uzyskuje się mniejszą zawartość ziarn niekształtnych, których minimalny udział świadczy o lepszej jakości kruszyw. Podobnie Rajan i Singh [7] zauważają, że kruszywo otrzymane z kruszenia dwuetapowego charakteryzowało się wyższą nieregularnością ziarn w porównaniu z kruszeniem czteroetapowym. Strzałkowski i in. [10] wykazali, że ziarna płaskie i nieforemne koncentrują się w najdrobniejszych frakcjach ziarnowych. Eloranta [12] podaje, że rozkład wielkości cząstek (PSD) nadawy oraz ustawienie zamkniętej strony (CSS) kruszarek stożkowych istotnie wpływa na płaskość produktu. Bengtsson i Evertsson [13] również potwierdzają, że cechy eksploatacyjne kruszarki stożkowej, m.in. prędkość mimośrodowa i CSS, wpływają na płaskość produktu. W przypadku innego typu kruszarek, jak udarowe z pionowym wałem (VSI), mechanizm kruszenia wpływa na kształt drobnych kruszyw w zakresie wielkości od 3 do 250 μm [14]. Natomiast w przypadku kruszenia w kruszarkach szczękowych ilość nadawy wiąże się ze zużyciem energii kruszenia i płaskością produktu [8]. Rajan i Singh [5–6] podali, że kanciastość kruszywa skalnego jest związana z kolejnością kruszarek, w których skały są rozdrabniane.

Ostatnio płaskość kruszywa skalnego w różnych układach kruszenia badali Umashankar i in. [15]. Ich wyniki wskazały, że kruszywa skalne wytworzone z kruszarek szczękowo-stożkowych wskazywały na lepsze właściwości kształtu kruszywa niż połączenie kruszarek tylko szczękowych. Diógenes i in. [16] zauważyli, że kruszarka szczękowa wytworzyła gruboziarniste kruszywo o lepszym połączeniu sferyczności i kanciastości podczas pierwszego etapu kruszenia. Natomiast kruszywo drobne z kruszarek stożkowych w końcowych etapach kruszenia było bardziej wydłużone i miało bardziej ostre krawędzie niż kruszywo drobne z wstępnej kruszarki szczękowej, a fragmentacja ziarn kruszywa zależy od jego wewnętrznej struktury. Problemy związane z niepożądanym kształtem ziarn kruszywa można rozwiązać, wybierając odpowiednią kruszarkę z jednoczesnym uwzględnieniem rodzaju skały [8, 9, 17, 18].

Kruszenie jest kluczową fazą wpływającą na właściwości geometryczne ziarn. Wyniki badań przedstawione w literaturze opierają się na pobranym z kopalń materiale badawczym o określonej zawartości nieregularnych ziarn. Aby zrozumieć wpływ technologii kruszenia na parametry geometryczne kruszyw, należy przyjrzeć się efektom procesu rozdrabniania przy zmiennej zawartości płaskich ziarn w nadawie. Przedstawione w artykule rozważania są wstępnym studium opisu wpływu technologii i metody kruszenia kruszyw bazaltowych na ich cechy geometryczne.

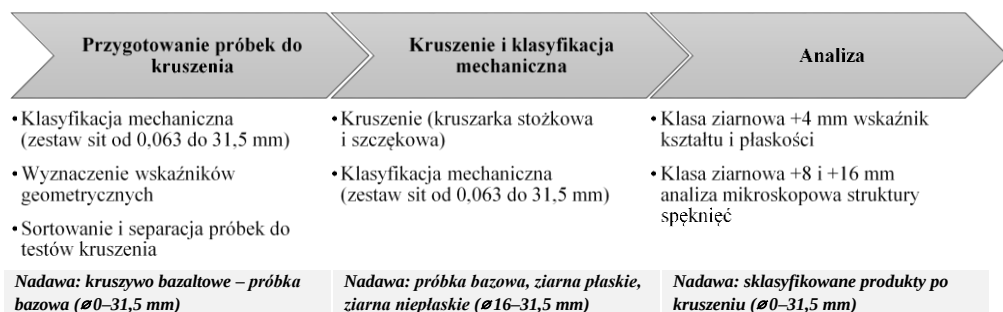
2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Materiał do badań stanowiły próbki bazaltowych kruszyw łamanych pobrane z zakładów z rejonu Lubania i Złotoryi. Do badań pobrano uśrednione 120 kg próbki kruszyw łamanych o uziarnieniu 0–31,5 mm. Z petrograficznego punktu widzenia bazalt z rejonu

Lubania stanowi kenozoiczną skałę magmową wylewną powstałą z law nefelinitowych oraz tefrytowych, w której afanitowe tło obejmuje ponad 80% skały, a w tle tkwią fenokryształy i mikrofenokryształy oliwinu i klinopiroksenu oraz magnetytu. W przypadku bazaltu ze Złotoryi można zauważyć, że w afanitowym tle tkwią fenokryształy piroksenu i oliwinu oraz miejscami występują pęcherzyki powietrza wypełnione wtórnymi minerałami węglanowymi. Kruszywo ze Złotoryi charakteryzowało się wyższą, w stosunku do kruszywa z Lubania, zawartością fragmentów innych skał wulkanicznych i zwietrzeliny bazaltowej (odpowiednio do 15% dla kruszywa ze Złotoryi i do 5% z Lubania).

W pierwszym etapie badań przeprowadzono analizy granulometryczne badanych materiałów zgodnie z normą EN 933-1 [19]. Następnie dla każdej z klas ziarnowych >4 mm oznaczono wskaźniki kształtu i płaskości w oparciu o obowiązujące normy [20–21]. W wyniku procesu separacji otrzymano charakterystykę właściwości geometrycznych próbek pierwotnych.

W kolejnym etapie wydzielono materiał do testów kruszenia. Z próbki pierwotnej dla każdego ze złóż wydzielono pojedynczą próbkę bazową i porównawcze próbki ziarn płaskich i niepłaskich o uziarnieniu 16–31,5 mm. W przypadku analizy procesu kruszenia, przez próbkę bazową należy rozumieć kruszywo pobrane bezpośrednio w stanie pierwotnym w układzie technologicznym, natomiast nadawy w postaci ziarn płaskich i niepłaskich zostały wydzielone przed procesem kruszenia z próbki pierwotnej i były rozdrabniane selektywnie. Badania efektywności kruszenia kruszyw bazaltowych prowadzono w dwóch typach kruszarek: szczękowej i stożkowej. Szerokość szczeliny kruszarek ustawiono na poziomie 18 ± 1 mm. Otrzymane po kruszeniu produkty poddano analizie granulometrycznej, a dla każdej z klas ziarnowych określono wskaźnik kształtu i płaskości (rys. 1).



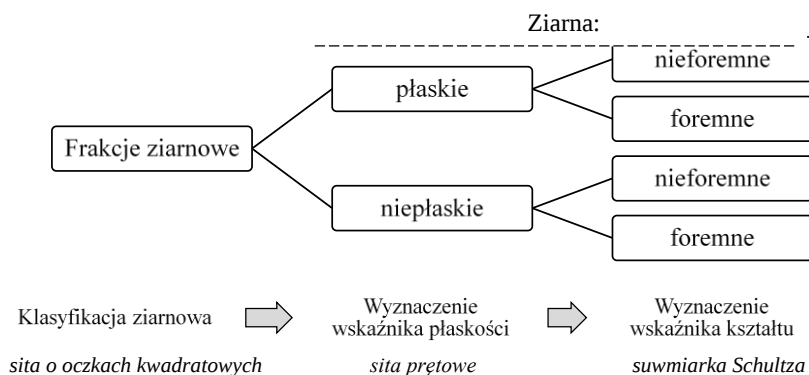
Rys. 1. Schemat metodyki badań

Fig. 1. Experimental flowchart of the crushability tests

Dla każdego produktu kruszenia przeprowadzono analizę porównawczą struktury pęknięć powstałych po kruszeniu w porównaniu do charakterystyki pęknięć w próbkach

pierwotnych. Badania nad strukturą mikropęknięć dla kruszywa o wielkości ziarn 8–10 oraz 16–20 mm przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu Motic SMZ-168 Series, kamery Nikon Digital Sight DS-Fi2 oraz oprogramowania Nikon NIS-Elements Basic Research.

W literaturze przedmiotu bardzo często pojęcia ziarn nieregularnych i regularnych są zamiennie stosowane z niepłaskimi i płaskimi. Według autorów nie jest to poprawna interpretacja. Ziarna płaskie nie muszą być nieforemne i odwrotnie, dlatego rozróżnianie tych czterech pojęć jest bardzo istotne w klasyfikacji ziarn kruszyw łamanych. W pracy przyjęto metodykę pozwalającą na wydzielenie geometrii ziarn pod względem wskaźnika płaskości na ziarna płaskie i niepłaskie, a następnie pod względem wskaźnika kształtu wydzielono ziarna: płaskie foremne, płaskie nieforemne, niepłaskie foremne oraz niepłaskie nieforemne. Na rysunku 3 przedstawiono schemat klasyfikacji ziarn próbek po kruszeniu.



Rys. 2. Schemat klasyfikacji ziarn próbek przed i po kruszeniu
Fig. 2. Grain classification scheme of samples before and after crushing

Przedstawione w pracy badania stanowią cykl standardowych operacji podczas badań kruszyw łamanych zgodnie z istniejącymi i obowiązującymi normami. Połączenie tych operacji w unikatowy schemat badawczy, zwłaszcza w ujęciu odrębnego kruszenia ziarn płaskich i niepłaskich, tworzy nowy schemat postępowania w przypadku standardowych badań kruszyw pozwalający na dokładną charakterystykę właściwości geometrycznych otrzymywanych w wyniku kruszenia produktów.

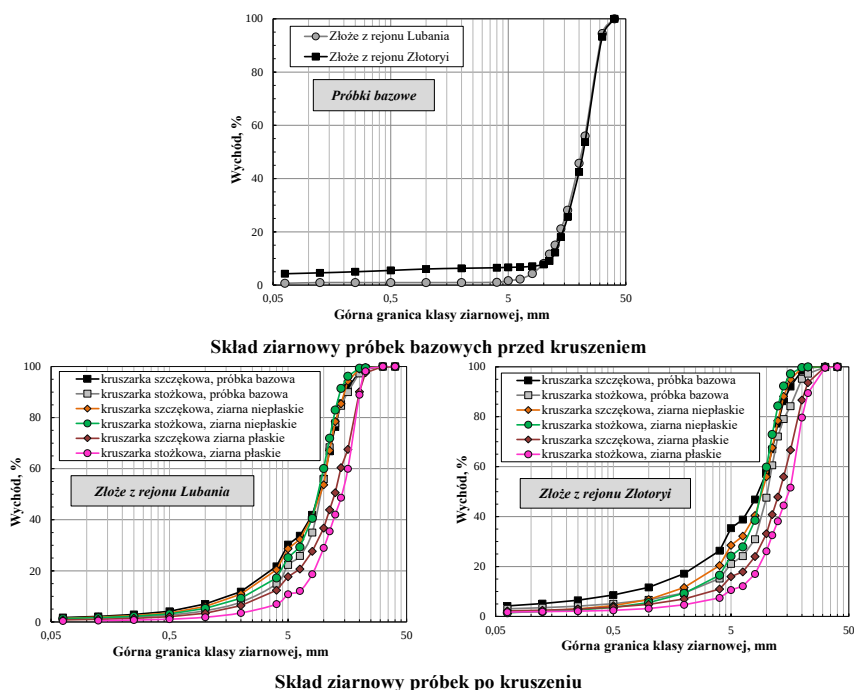
2. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Próbki kruszywa bazaltowego pobrane z kopalń w pierwszym etapie badań poddano analizie granulometrycznej. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy składu ziarnowego dla próbek bazowych przed kruszeniem oraz dla próbek bazowych z po-

działem na ziarna płaskie i niepłaskie po kruszeniu. Wartości na osi poziomej przedstawiono w skali logarytmicznej zgodnie z wymogami normy [19].

Kruszywa przed kruszeniem charakteryzowały się zbliżonym uziarnieniem, z wyjątkiem najdrobniejszych klas ziarnowych. Bazalt z rejonu Złotoryi charakteryzował się wyraźnie wyższą zawartością drobniejszych klas ziarnowych niż bazalt z rejonu Lubania. Na podstawie analizy krzywych składu ziarnowego próbek po kruszeniu można stwierdzić, że w wyniku rozdrabniania ziarn płaskich otrzymuje się wyraźnie drobniejsze uziarnienie produktu po kruszeniu w stosunku do rozdrabniania próbki pierwotnej, jak i ziarn niepłaskich. W przypadku obu próbek, pomimo tej samej przyjętej szerokości szczeliny wylotowej kruszarek, produkty po kruszeniu w kruszarce szczękowej charakteryzowały się drobniejszym uziarnieniem niż produkty po kruszeniu w kruszarce stożkowej.

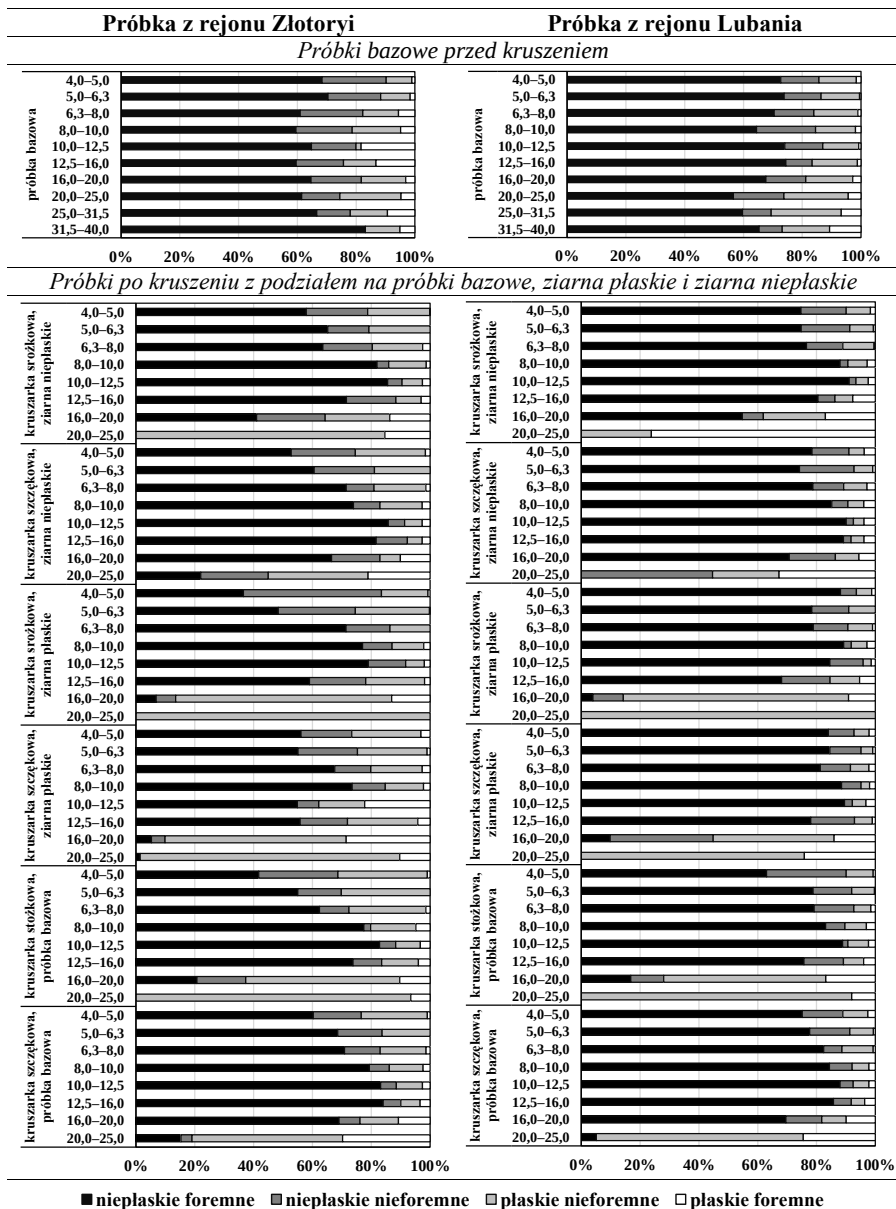
Zauważono, że w przypadku kruszywa o wysokiej zawartości tufów i zwietrzeliny bazaltowej stopień rozdrobnienia pomiędzy nadawą w postaci próbki pierwotnej a nadawą w postaci ziarn płaskich jest wyższy niż w przypadku próbki o niskiej zawartości ziarn innych niż czysty bazalt. Może to sugerować, że zmienny skład litologiczny nadawy w złożu będzie w istotny sposób determinował skład ziarnowy produktu po kruszeniu niezależnie od typu zastosowanej kruszarki.



Rys. 3. Skład ziarnowy próbek bazowych i próbek po kruszeniu

Fig. 3. Particle size distribution of aggregates of base samples and aggregates after crushing

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę sklasyfikowanych według rys. 2 ziarn mineralnych w próbkach zarówno przed, jak i po kruszeniu. Klasy ziarnowe zsumowano operacyjnie do 100%, niezależnie od ich wychodu masowego.



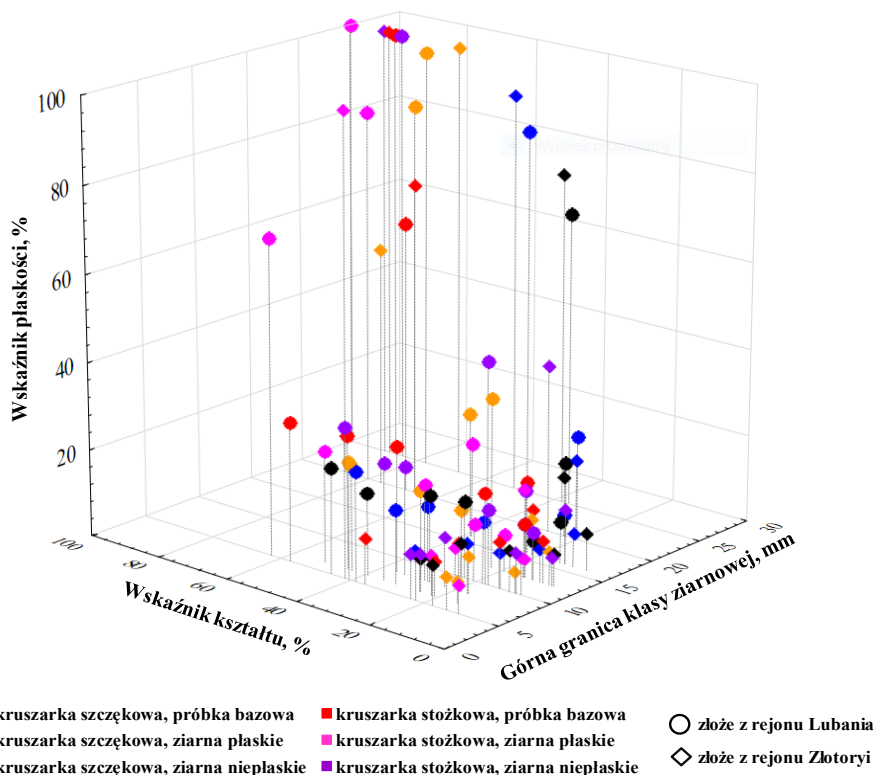
Rys. 4. Charakterystyka rozkładu ziarn o określonych kształtach w klasach ziarnowych
Fig. 4. Characteristics of the distribution of grains with specific geometrical parameters in grain classes

Podczas analizy próbek przed kruszeniem zauważono, że w przypadku grubych klas ziarnowych >20 mm kruszywo z rejonu Lubania charakteryzowało się niższymi wartościami zarówno wskaźnika kształtu, jak i płaskości. W przypadku kruszywa z rejonu Lubania, im drobniejsza klasa ziarnowa, tym wyższa zawartość ziarn nieforemnych i płaskich w stosunku do próbki kruszywa z rejonu Złotoryi.

W przypadku drobnych klas ziarnowych kruszywa z rejonu Złotoryi ziarna tufów i zwietrzliny bazaltowej charakteryzują się kubicznym kształtem, krawędzie ziarn są wyraźnie zaokrąglone i dodatkowo ziarna te stanowią główną masę najdrobniejszych klas ziarnowych. W przypadku grubych klas ziarnowych, w obu badanych próbkach, ziarna w tych klasach to czysty bazalt. W przypadku kruszywa o wysokiej zawartości tufów i zwietrzliny bazaltowej stopień rozdrobnienia pomiędzy nadawą w postaci próbki bazowej, a nadawą w postaci ziarn płaskich jest wyższy niż w przypadku próbki o niskiej zawartości ziarn innych niż czysty bazalt.

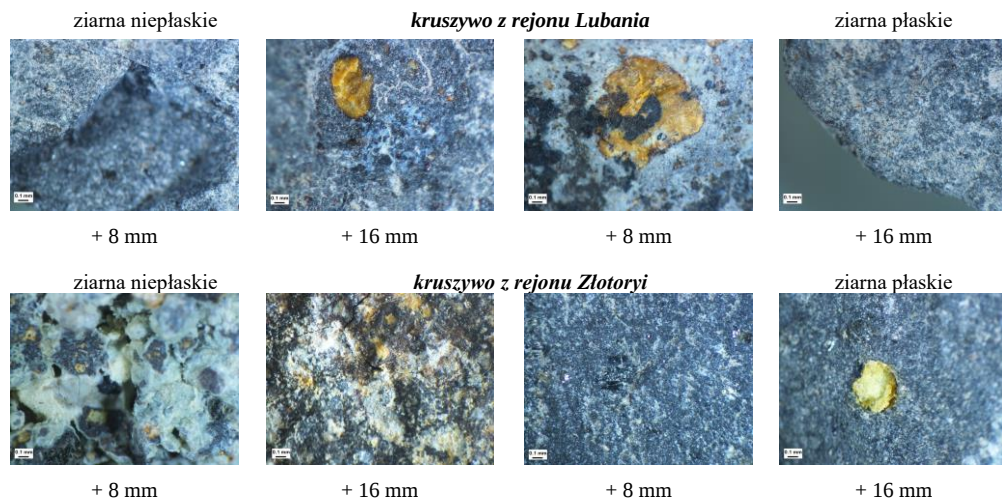
Kruszywo z rejonu Złotoryi po kruszeniu w obu typach kruszarek charakteryzowało się gorszymi parametrami geometrycznymi – zwłaszcza jeśli chodzi o zawartość w produkcie kruszenia ziarn płaskich nieforemnych. Największe różnice występują w zakresie drobnych klas ziarnowych. Na podstawie analizy rozkładu ziarn można zauważyć, że w wyniku rozdrabniania kruszywa z rejonu Lubania w produkcie po kruszeniu wzrósł udział ziarn niepłaskich i foremnych w stosunku do próbki bazowej (poza najgrubszą klasą ziarnową) z około 60 do około 80%, co wiązało się z generalnym spadkiem zawartości zwłaszcza ziarn niepłaskich nieforemnych. Jednocześnie, w przypadku obu próbek bazaltów, rozdrabnianie w układzie kruszarki stożkowej skutkowało wyższą zawartością ziarn nieforemnych i płaskich w produkcie po kruszeniu w stosunku do kruszenia w układzie kruszarki szczękowej, niezależnie od składu geometrycznego ziarn nadawy.

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę geometryczną kruszyw bazaltowych po kruszeniu w kruszarce stożkowej i szczękowej w układzie trójparametrowym, określając rozkład wskaźników kształtu i płaskości dla każdej z klas ziarnowych. Kolorami na wykresie oznaczono rodzaj nadawy i typ kruszarki stosowanej do rozdrabniania, natomiast kształtem znacznika wskazano, z którego złoża pochodzi materiał. Na podstawie analizy rozkładu trójwymiarowości właściwości geometrycznych analizowanych kruszyw (rys. 5) można stwierdzić, że kruszywo z rejonu Złotoryi charakteryzowało się wyższą zawartością ziarn płaskich i nieforemnych, zwłaszcza w układzie drobnych klas ziarnowych. Kruszywo bazaltowe o niskim stopniu zwietrzlenia i niskiej zawartości tufów rozdrabnia się z reguły do ziarn niepłaskich foremnych. Dla obu badanych kruszyw zauważono, że wyższą zawartością ziarn płaskich charakteryzowały się produkty po kruszeniu w kruszarce stożkowej. W przypadku drobnych klas ziarnowych kruszywa z rejonu Złotoryi sumaryczna zawartość ziarn nieforemnych w najdrobniejszych klasach ziarnowych wzrosła z ~ 20 do $\sim 50\%$.



Rys. 5. Charakterystyka 3W rozkładu parametrów geometrycznych w klasach ziarnowych
Fig. 5. 3D distribution characteristics of geometric parameters in grain classes

W przypadku analizy mikroskopowej próbek pierwotnych stwierdzono, że w grubych klasach ziarnowych dominują ziarna czystego bazaltu, w których w afanitowym cieście skalnym występują pojedyncze ziarna wtórnie wykrystalizowanych oliwinów. W próbkach kruszywa z obu rejonów pojedyncze pęknięcia w grubszej klasie ziarnowej występują głównie w układzie wtórnej krystalizacji oliwinowej. Dodatkowo w przypadku kruszywa z rejonu Złotoryi widoczne są pojedyncze pęknięcia, które związane są raczej z samym wietrzeniem materiału i są to raczej pęknięcia pierwotne, niezwiązane z układem rozdrabniania tych kruszyw. W przypadku charakterystyki mikroskopowej drobnych ziarn zauważono, że podobnie jak w grubszej klasie ziarnowej, pęknięcia tworzą koncentryczne sieci od wtórnej krystalizacji, przy czym dodatkowo w drobnych klasach występują pęknięcia od krawędzi ziarn w kierunku ich środka ciężkości, zwłaszcza w układzie struktury ziarn płaskich. Drobne ziarna zwietrzeliły bazaltowej i tufów charakteryzowały się wyraźnie zaokrąglonymi krawędziami, o mniej rozwiniętej linii brzegowej i kubicznym kształcie.

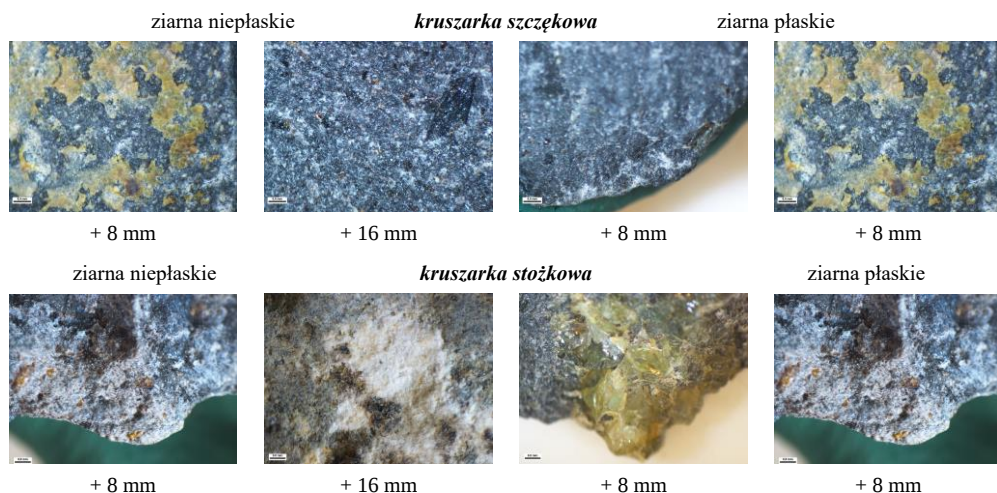


Rys. 6. Charakterystyka struktury pęknięć w próbkach przed kruszeniem
Fig. 6. Characterization of fracture structure in samples before crushing

Na podstawie analizy mikroskopowej pęknięć próbek po kruszeniu stwierdzono, że w przypadku grubych klas ziarnowych dla obu badanych kruszyw pęknięcia związane są głównie z ziarnami mineralizacji wtórnej, w sieci których występują drobne pęknięcia. Co więcej, zaobserwowano, że wtórne pęknięcia, związane głównie z kruszeniem, rozchodzą się promieniście od ziarn wtórnej mineralizacji. Zauważono, że w wyniku kruszenia, niezależnie od kształtu ziarn nadawy, w ziarnach płaskich po kruszeniu klasy powyżej 16 mm, zwłaszcza kruszywa z rejonu Złotoryi w postaci tufów i bazaltu pokrytego zgorzelą, występują wtórne głębsze pęknięcia od krawędzi zewnętrznych tych ziarn. Zaobserwowano również, że w szczególności w ziarnach płaskich struktura pęknięć jest wyraźnie większa niż w przypadku ziarn płaskich w próbce bazowej. Dla obu badanych klas ziarnowych w kruszywie z rejonu Złotoryi pęknięcia na powierzchni ziarn mineralnych po kruszeniu były bardziej liczne niż w przypadku ziarn mineralnych kruszywa z rejonu Lubania.

Analiza struktury ziarn drobnych wykazała, że do klas drobnych przechodzą wyraźnie rozdrobnione ziarna tufów. Tufy w tym układzie z reguły charakteryzują się foremnym kształtem, natomiast ziarna czystego bazaltu są w postaci ziarn płaskich o ostrych krawędziach i sieci pojedynczych pęknięć rozchodzących się promieniście od krawędzi, w miejscu, gdzie ziarna mają najmniejszą grubość. Na ziarnach czystego bazaltu pojawiają się drobne struktury przypominające laminację i oddzielność łuskową. Jeżeli w strukturze ziarn drobnych w afanitowym cieście skalnym występowały wtórne kryształy, to pęknięcia występowały głównie w strukturze tych kryształów, ewentualnie rozchodziły się promieniście od tych kryształów. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe zdjęcia mikroskopowe dla próbek kruszywa bazaltowego z rejonu Złoto-

ryi po kruszeniu ziarn płaskich w kruszarce szczękowej i stożkowej, z podziałem na ziarna płaskie i niepłaskie.



Rys. 7. Charakterystyka struktury pęknięć w próbkach po kruszeniu (nadawa: ziarna płaskie)

Fig. 7. Characterization of fracture structure in samples after crushing (feed: flaky grains)

3. PODSUMOWANIE

Kruszywa łamane powinny charakteryzować się wysoką jakością, bowiem muszą spełniać wysokie wymagania w zależności od ich przeznaczenia. Kluczowym elementem, który wpływa na właściwości kształtu ziarn kruszyw jest kruszenie. Dlatego też analiza właściwości geometrycznych kruszyw w odniesieniu do tego etapu w technologii rozdrabniania, pozwala na odpowiedni wybór metody kruszenia skał, a co za tym idzie uzyskanie kruszyw o wysokiej jakości. Przeprowadzone badania rozdrabniania kruszywa bazaltowego przy użyciu kruszarki szczękowej i stożkowej wykazały:

- 1) niższe wskaźniki płaskości i kształtu po procesie rozdrabniania zarówno w przypadku nadawy o pierwotnym składzie geometrycznym ziarn, jak również w nadawie w postaci ziarn płaskich i niepłaskich,
- 2) wyższy wskaźnik płaskości po procesie rozdrabniania ziarn niepłaskich, a niższy po kruszeniu ziarn płaskich,
- 3) kumulację ziarn płaskich i nieforemnych w najdrobniejszych (>8 mm) i najgrubszych (>20 mm) frakcjach, przyjmując wskaźniki płaskości i kształtu nawet na poziomie 80–100%,
- 4) wyższą zawartość ziarn płaskich i nieforemnych dla klas powyżej 16 mm po rozdrabnianiu w kruszarce stożkowej,

- 5) wyższe zawartości (do 80%) ziarn płaskich i nieforemnych po kruszeniu próbek o wyższej zawartości innych składników niż czysty bazalt – niż czystego kruszywa bazaltowego (do 50%) i jednocześnie występowanie większej ilości spękań ziarn w próbkach o wysokiej zawartości tufów,
- 6) zmienny skład litologiczny – wzrost zawartości tufów, obniża parametry jakościowe kruszyw skutkując wysoką zawartością ziarn płaskich i nieforemnych.

Przeprowadzone analizy parametrów geometrycznych produktów po kruszeniu w ujęciu parametrów geologicznych kruszonej nadawy wykazały, że rozdział ziarn nadawy na ziarna płaskie i niepłaskie może poprawić parametry końcowe produktu handlowego z zaznaczeniem, że w przypadku jednostopniowego kruszenia, zwłaszcza w przypadku zwietrzałych bazaltów, należy stosować układy z kruszarką szczękową. Aby zapewnić właściwy wybór technologii i metody kruszenia skał, zasadne jest prowadzenie dalszych i szerszych analiz w tym zakresie z uwzględnieniem kruszyw o innej genezie oraz opracowanie odpowiedniej procedury rozdrabniania uwzględniającej szczegółowy skład litologiczny skał.

LITERATURA

- [1] RÄISÄNEN M., MERTAMO M., *An evaluation of the procedure and results of laboratory crushing in quality assessment of rock aggregate raw materials*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2004, 63, 33–39, <https://doi.org/10.1007/s10064-003-0218-1>
- [2] HOFER V., BACH H., LATAL C., NEUBAUER A.-C., *Impact of Geometric and Petrographic Characteristics on the Variability of LA Test Values for Railway Ballast*, Mathematical Geosciences, 2013, 45, 727–752, <https://doi.org/10.1007/s11004-013-9472-3>
- [3] GAWENDA T., *Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2013, 29 (1), 53–65, <https://doi.org/10.2478/gospo-2013-0002>
- [4] GAWENDA T., *Innowacyjne technologie produkcji kruszyw o ziarnach foremnych*, Mining Science – Mineral Aggregates, 22 (1) 2015, 45–59.
- [5] RAJAN B., SINGH D., *An image-based approach to capture influence of production mechanism on aggregate dimension distribution and breakage potential*, Advances in Civil Engineering Materials, 2020, 9 (1), 152–168, <https://doi.org/10.1520/ACEM20190197>
- [6] RAJAN B., SINGH D., *Investigation on effects of different crushing stages on morphology of coarse and fine aggregates*, International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21 (2), 177–195, <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1449951>
- [7] RAJAN B., SINGH D., *Quantify effects of stage crushing on dimensional distribution of basaltic aggregates using image technique*, International Journal of Pavement Research and Technology, 2019, 12, 497–507, <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0060-x>
- [8] KÖKEN E., LAWAL A.I., *Investigating the effects of feeding properties on rock breakage by jaw crusher using response surface method and gene expression programming*, Advanced Powder Technology 2021, 32 (5), 1521–1531, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.03.007>
- [9] KÖKEN E., ÖZARSLAN A., *New testing methodology for the quantification of rock crushability: Compressive crushing value (CCV)*, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2018, 25, 1227–1236, <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1675-7>

- [10] STRZAŁKOWSKI P., DUCHNOWSKA M., KAŹMIERCZAK U., BAKALARZ A., WOLNY M., KARWOWSKI P., STĘPIEŃ T., *Evaluation of the Structure and Geometric Properties of Crushed Igneous Rock Aggregates*, Materials, 2021, 14, 7202, <https://doi.org/10.3390/ma14237202>
- [11] GAWENDA T., STEMPKOWSKA A., SARAMAK D., FOSZCZ D., KRAWCZYKOWSKA A., SUROWIAK A., *Assessment of Operational Effectiveness of Innovative Circuit for Production of Crushed Regular Aggregates in Particle Size Fraction 8–16 mm*, Minerals, 2022, 12, 634, <https://doi.org/10.3390/min12050634>
- [12] ELORANTA J., *Influence of crushing process variables on the product quality of crushed rock*, Dissertation, 1995, Tampere University of Technology.
- [13] BENGTTSSON M., EVERTSSON C. M., *An empirical model for predicting flakiness in cone crushing*, International Journal of Mineral Processing, 2006, 79 (1), 49–60.
- [14] CEPURITIS R., GARBOCZI E. J., JACOBSEN S., *Three dimensional shape analysis of concrete aggregate fines produced by VSI crushing*, Powder Technology, 2017, 308, 410–421.
- [15] UMASHANKAR O., GOWREESH Y.S., MAMATHA K.H., DINESH S.V., *Effect of crushing mechanism on the shape properties of coarse aggregates*, Materials Today: Proceedings, 2022, 60, 534–540.
- [16] DIÓGENES L.M., BESSA I.S., CASTELO BRANCO V.T.F., MAHMOUD E., *The influence of stone crushing processes on aggregate shape properties*, Road Materials and Pavement Design, 2019, 20, 877–894, <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1422792>
- [17] KAMANI M., RASOUL A., *The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape*, Construction and Building Materials, 2019, 230, 117016, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117016>
- [18] BOUQUETY M.N., DESCANTES Y., BARCELO L., DE LARRARD F., CLAVAUD B., *Experimental study of crushed aggregate shape*, Construction and Building Materials, 2007, 21, 865–872, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.013>
- [19] EN 933-1:2012, *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method*.
- [20] EN 933-3:2012, *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 3: Determination of particle shape – Flakiness index*.
- [21] EN 933-4:2012, *Tests for geometrical properties of aggregates – Part 4: Determination of particle shape – Shape index*.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF GRINDING ON GEOMETRIC PARAMETERS OF BASALT AGGREGATE

The geometric properties of aggregates determine their applicability to the appropriate application, so the production of aggregates should provide high quality requirements for the final product. The purpose of this study was to evaluate the effect of crushing basalt aggregate in different types of crushers on its geometric properties. Crushing processes were carried out in a jaw crusher and a cone crusher, and the feed for crushing was classified samples in accordance with the flakiness index. The crushing process was evaluated on the basis of grain composition characteristics, shape and flakiness indexes of the samples before and after crushing. It was found that with the same gap, finer grains are obtained from a cone crusher than from a jaw crusher. For both types of crushers, it was shown that flaky grains accumulate in the finest fractions, while crushing in a cone crusher results in a higher content of non-cubical and flaky grains. Petrographic analysis performed before and after crushing found that the lithological composition of the feed has a significant effect on grain structure. Basalt aggregates with a higher content of tuffs had a higher degree of crushing and were more susceptible to the accumulation of flaky grains and the presence of fractures in the structure of these grains.

Tomasz GAWENDA
Agata STEMPKOWSKA

AGH w Krakowie, Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

„KOMPOZYCJA MINERALNA WSPOMAGAJĄCA WZROST ROŚLIN”. WYNALAZEK EFEKTU UBOCZNEGO PRODUKCJI KRUSZYW KUBICZNYCH

Prezentowano innowacyjne wynalazki dotyczące produkcji oraz uszlachetniania kruszyw mineralnych. Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań okazały się korzystne nie tylko dla branży budowlanej i drogowej ze względu na ich wysokie parametry jakościowe, ale także dla zielonej infrastruktury czy ogrodnictwa. Prezentowane technologie umożliwiają wyodrębnienie w trakcie produkcji unikatowych kruszyw o odmiennych właściwościach korzystnych dla uprawy i rozwoju roślin. Mogą to być zupełnie ziarna płaskie o wyższej nasiąkliwości, mniejszej gęstości (zwiętrzałe) i bogate w składniki biodostępne dla roślin. Kolejną cechą takich kruszyw jest wyższa jamistość, co w przypadku wykorzystania ich na podłoża podnosi zdolność aeracji i retencji. Owocem tych badań stał się wynalazek „Kompozycja mineralna wspomagająca wzrost roślin”. W artykule opisano budowę wynalazku, przeznaczenie oraz efekty uzyskane na przykładzie ich aplikacji w nasadzeniach roślin.

1. WSTĘP

Gleba charakteryzuje się trzema fazami: stałą, ciekłą i gazową, z którymi bezpośrednio kontaktują się korzenie roślin. Faza stała składa się z części mineralnej i organicznej, stanowiąc główne źródło pierwiastków niezbędnych dla roślin. Faza ciekła to roztwór glebowy, z którego korzenie pobierają wodę i składniki mineralne głównie w formie jonowej. Faza gazowa, to powietrze wypełniające wolne przestrzenie w glebie. Jest ono źródłem tlenu niezbędnego do normalnego przebiegu procesów życiowych w korzeniu, a także azotu, dwutlenku węgla i pary wodnej. Składnikami mineralnymi są kawałki skał macierzystych i minerały, zaś składnikami organicznymi próchnica oraz pozostałości roślinne i zwierzęce [1].

Obecność trzynastu pierwiastków mineralnych (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, B, Cu, Mo, Mn, Cl) jest bezwzględnie konieczna do pełnej realizacji cyklu życiowego rośliny. Wszystkie te pierwiastki pobierane są przez rośliny osiowe z gleby w postaci jonów

rozpuszczalnych w wodzie. Pierwiastkiem szczególnie istotnym jest azot, który jest dostępny dla rośliny w trzech postaciach: mineralnej jako sole azotanowe i amonowe, organicznej w formie mocznika i cząsteczkowej (N_2) dla roślin żyjących w symbiozie z niektórymi mikroorganizmami. Azot występuje w próchnicy gleby, resztkach obumarłych organizmów oraz związkach organicznych i mineralnych. W powietrzu glebowym występuje więcej azotu N_2 , niż w powietrzu atmosferycznym. Azot jest także składnikiem skał macierzystych oraz źródłem związków azotu są także opady atmosferyczne. Azot nie zawsze występuje w glebie w dostatecznej ilości, dlatego istotne jest nawożenie gleby. Aby system korzeniowy roślin rozwijał się prawidłowo i był odporny na choroby, potrzebuje wystarczająco dużo tlenu, który powinien być również dostarczany [1].

Brak odpowiedniej przepuszczalności w glebach zwięzłych i zbitych sprawia, że takich w podłożach do roślin nie docierają składniki odżywcze, woda, azot i tlen. Napowietrzanie gleby, nawodnienie i nawożenie jest bardzo istotne z punktu widzenia prawidłowego rozwoju roślin. Dotyczy to zwłaszcza roślin narażonych na suszę, którym sprzyja ograniczona powierzchnia podłoża w zabetonowanych klombach miejskich, gleba ilasto-gliniasta oraz strome nachylenie powierzchni podłoża po której szybko spływa woda. Istnieją jednak sposoby, które umożliwiają rozluźnienie nadmiernie zbitego podłoża i przywrócenie mu prawidłowej, sprzyjającej roślinom struktury. Jedną z nich jest opracowana przez autorów niniejszego artykułu kompozycja mineralna wspomagająca wzrost roślin [2], która ma zastosowanie w ogrodnictwie, rolnictwie i leśnictwie w uprawie drzewek i krzewów oraz warzyw jako naturalny mineralny środek, którego celem jest nawożenie, napowietrzenie i nawodnienie korzeni roślin w górnych oraz głębszych warstwach gleby. Może być stosowana dla roślin rosnących w gruncie, wazonach, donicach.

Istotnym zagadnieniem i korzyścią z zastosowania wynalazku jest metoda pozyskiwania składników do kompozycji rdzeni, stanowiących odpady z procesów produkcyjnych żywności (kości, rogi), odpadów pogórnictwa, odpadów materiałów budowlanych i mineralnych. Według „Bilansu zasobów złóż kopalin w Polsce” wydobyto w 2023 r. ponad 79 mln ton kamieni łamanych i blocznych oraz 167 mln ton naturalnych piasków i żwirów. Uwagę należy także zwrócić na wydobycie wapieni i margli dla przemysłu cementowego i wapienniczego w ilości 45,68 mln oraz piasków formierskich, podsadzkowych i do betonów komórkowych – 5,3 mln [3]. Wszystkich złóż zagospodarowanych i niezagospodarowanych jest ponad 12 tysięcy, które stanowią olbrzymi potencjał dla utrzymania infrastruktury i rozwoju przemysłu budowlanego oraz drogowego w Polsce. Duża część złóż posiada kopaliny współtowarzyszące dobrej jakości, a także o niskiej przydatności gospodarczej, traktowane jako zanieczyszczenia, które muszą być odzyskiwane bądź usuwane w procesie mechanicznej przeróbki [4–6].

To właśnie kopaliny współtowarzyszące oraz produkty uboczne powstałe w procesach przerobczych przy produkcji np. kruszyw do betonów i mieszanek mineralno-

-asfaltowych (skrótowo MMA), którymi są zazwyczaj ziarna zwietrzałe (porowate) o dużej nasiąkliwości, niskiej gęstości, o złej jakości kształtu oraz pyły powstające podczas rozdrabniania i przesiewania, a także gliny z procesów płukania mogą stanowić doskonałe wspomagające składniki do nawozów i użyźniania gleby oraz podłoża dla zielonej infrastruktury przy zastosowaniu odpowiednich metod i środków.

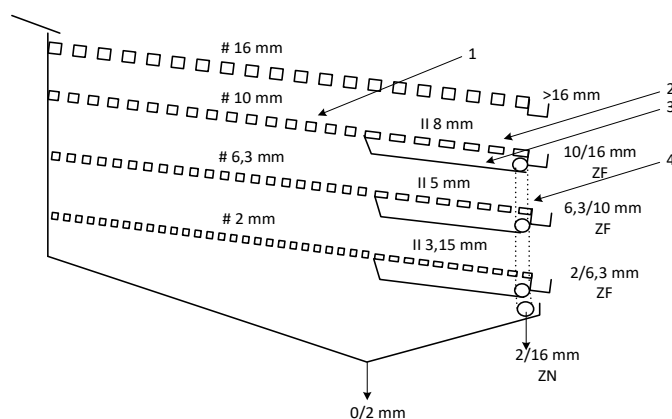
2. INNOWACYJNE METODY PRODUKCJI KRUSZYW FOREMNYCH I NIEFOREMNYCH

Z przeprowadzonych analiz produkcji kruszyw łamanych z różnych surowców mineralnych [6–11] wynika pewna zasada, że na kształt ziarna kruszywa wpływają m.in. struktura, tekstura, twardość i łupliwość surowca. Cechy te zależą od litologii i pochodzenia surowców. Obserwuje się, że im twardszy surowiec, tym w procesie rozdrabniania powstają bardziej nieregularne ziarna (płaskie, wydłużone). Odnotowuje się również większy udział ziaren nieregularnych w klasach drobniejszych, natomiast we frakcjach grubszych udział ten maleje. Czynniki te nie są korzystne z punktu widzenia procesu technologicznego produkcji kruszyw wysokiej jakości, zwłaszcza przy produkcji drobnych frakcji, np. grysu 2–16 mm dla branży drogowej i budowlanej. Surowce twarde i gruboziarniste wymagają wielostadialnych systemów rozdrabniania, aby osiągnąć wymagane rozmiary. W celu zmniejszenia udziału ziaren nieforemnych (ZN) należy utrzymać niski stopień rozdrobnienia (poniżej 1,6), co często wymaga dodatkowego stadium rozdrabniania w kruszarce udarowej z wałem pionowym lub granulatorze stożkowym. Mimo to finalne produkty zawierają kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt procent nieregularnych ziaren. Zatem stosowanie dodatkowych kruszarek, zwłaszcza do kruszenia końcowego, wiąże się z wyższymi nakładami inwestycyjnymi, droższą eksploatacją oraz zwiększoną zawartością pyłu (odpadów) oraz emisji hałasu [6, 11–14].

Alternatywnym rozwiązaniem są opatentowane przez AGH wynalazki dotyczące produkcji kruszyw foremnych i nieforemnych. Oznacza to, że w takich rozwiązaniach technologicznych można uzyskać kruszywa, które mogą zawierać nawet 100% ziaren foremnych albo nieforemnych, przekraczając zakres uziarnienia frakcji 2–4 mm w obowiązujących normach [15, 16] dotyczących badań właściwości geometrycznych kruszyw.

Jednym z tych wynalazków jest wielopokładowy przesiewacz wibracyjny do klasyfikacji ziaren i selektywnej separacji nieregularnych kruszyw [17] (PL 231748B1). Schemat budowy urządzenia przedstawiono na rys. 1. Idea polega na tym, że kruszywo rozdrobnione w kruszarce kierowane jest do wielopokładowego przesiewacza wyposażonego w sita (1) umieszczone jeden nad drugim w celu wydzielenia odpowiednich wąskich klas ziarnowych. Każdy pokład przesiewacza, który tworzy określoną frakcję kruszywa, zakończony jest pokładem przesiewacza (2) z sitem szczelinowym do odsie-

wania nieregularnych ziaren (ZN). Pokład taki (2) wyposażony jest w rynnę (3) umieszczoną pod sitem szczelinowym oraz rynnę (4) do usuwania przesianych ziaren (ZN) ze wszystkich takich pokładów sitowych. Ważne jest, aby wielkość oczek sita szczelinowego była dobrana odpowiednio do wielkości wąskiego zakresu uziarnienia kruszywa. Korzystne jest, aby wielkość oczek sita szczelinowego wynosiła od około 50% do około 70% maksymalnej wielkości ziarna uzyskanej w odpowiedniej frakcji. Produkty pozostające na sitach szczelinowych to końcowe frakcje zawierające ziarna foremne (ZF). Produkty zawierające nieforemne ziarna z poszczególnych pokładów przesiewaczy są kierowane do dalszego kruszenia w kruszarkach drugiego stadium albo zwracane do kruszarki zainstalowanej przed przesiewaczem i po przekruszeniu zwracane do przesiewacza wielopokładowego. System przesiewania może być również skonstruowany tak, aby przesiewać również ziarna nadwymiarowe, które mogą być łączone z ziałami nieforemnymi lub kierowane oddzielnie do drugiego stadium kruszenia. W takim układzie technologicznym można również wytwarzać kruszywa o nieregularnych ziałach, które mogą mieć inne zastosowanie niż do produkcji betonów czy MMA.

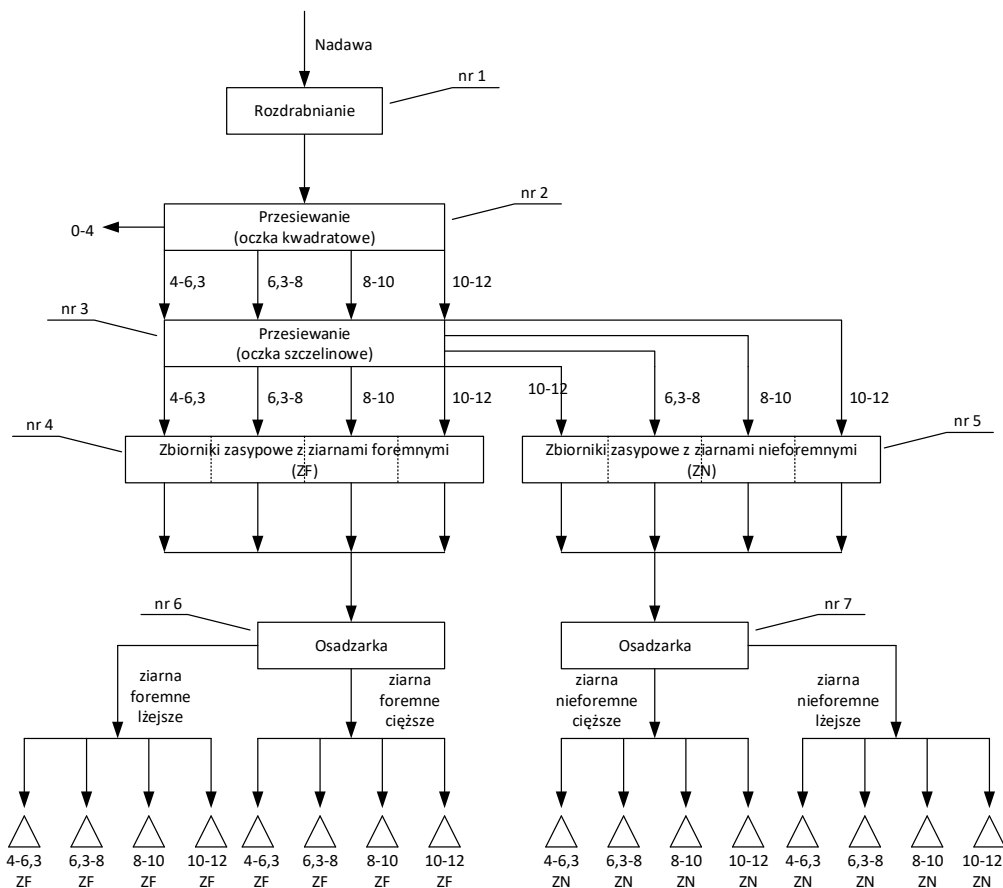


Rys. 1. Schemat przesiewacza do klasyfikacji ziarnowej i selektywnej separacji ziaren foremnych i nieforemnych (PL-231748B1) [18]

Fig. 1. Schematic diagram of a screen for grain classification and selective separation of regular and irregular grains (PL-231748B1) [18]

Wynalazek (PL-233318 B1) *Układ urządzeń do produkcji kruszyw oraz sposób produkcji kruszyw* [18] zaprezentowany na rysunku 2 bazuje na rozwiązaniach technologicznych służących do produkcji (rozdrabniania i klasyfikacji) kruszyw foremnych i nieforemnych, oraz na uszlachetnieniu kruszyw za pomocą separatorów (osadzarek). Za pomocą tych rozwiązań można oddzielić wyprodukować cztery rodzaje kruszywa o dowolnym zakresie uziarnienia, tj. kruszywa foremne (kubiczne) i nieforemne (płaskie, podłużne) o małej i wysokiej gęstości, albo kruszywa foremne i nieforemne wolne od zanieczyszczeń lekkich.

Sposób produkcji kruszyw pokazany na rys. 2 ma na celu rozdrobnienie w kruszarce (nr 1) i rozklasyfikowanie kruszyw na wąskie klasy ziarnowe w przesiewaczu (nr 2), a następnie poddanie dalszemu procesowi separacji w przesiewaczu (nr 3) na sitach szczelinowych, tak aby uzyskać osobno ziarna foremne i nieforemne (kierując je do zbiorników nr 4 i 5), z których metodą grawitacyjną (np. w osadzarkach pulsacyjnych, osadzarkach powietrznych lub powietrznych stołach koncentracyjnych) (nr 6 i 7) zostaną odseparowane ziarna lżejsze od cięższych.



Rys. 2. Schemat układu technologicznego do produkcji kruszyw

o zróżnicowanych właściwościach fizyczno-mechanicznych wg koncepcji patentu nr PL 233318 B1 [19]

Fig. 2. Diagram of the technological system for the production of aggregates with different physical and mechanical properties according to the concept of patent no. PL 233318 B1 [19]

Istotą wydzielania wąskich klas ziarnowych jest wyeliminowanie ziarn równopających przed procesem separacji, które będą miały negatywny wpływ na ostrość rozdziału ziarn w osadzarkach pod względem gęstości. Taki układ do produkcji kruszyw

wysokojakościowych pod względem kubiczności, czystości od zanieczyszczeń lekkich i wadliwych (zwietrzałych, porowatych) ziaren generuje dodatkowe kruszywa o odmiennych właściwościach nadających się dla branży ogrodniczej.

Na podstawie zaprezentowanych wynalazków, aby podnieść jakość kruszyw i zmniejszyć liczbę stadiów rozdrabniania zostały podjęte badania w ramach realizacji projektu aplikacyjnego NCBiR: Działania 4.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020. Spółka Hydro-Tech-Sort Gliwice przy współpracy z AGH w Krakowie i ICIMB Sieć Badawcza Łukasiewicz zbudowała prototyp przesiewacza oraz separatory frakcji trudnej (SET) i lekkiej (SEL) kruszyw w skali laboratoryjnej oraz pełnowymiarowy prototyp innowacyjnego układu technologicznego wraz z przesiewaczami do uszlachetniania kruszyw mineralnych na potrzeby realizacji testów w warunkach rzeczywistych. Linia technologiczna została wybudowana w Kopalni Dolomitu Imielin (rys. 3). Jej obszerna charakterystyka oraz wyniki badań zostały przedstawione w publikacjach [8, 19].



Rys. 3. Linia technologiczna w Kopalni Dolomitu Imielin, obraz z drona
Fig. 3. Technological line in the Imielin Dolomite Mine, image from a drone

3. CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI KRUSZW

Przeprowadzone badania na surowcach mineralnych pochodzących z różnych kopalń w ramach realizacji projektu, pozwoliły na pogłębienie wiedzy na temat znacze-

nia kruszyw foremnych, jak i nieforemnych ze względu na ich odmienne właściwości oraz ich wpływu na produkty z nich wytworzone (betony, MMA, podłoża dla roślin). Testy przesiewania w warunkach przemysłowych w przesiewaczu wielopokładowym wieloproduktowym wykazały, że finalne produkty z ziarnami foremnymi (produkty nadsitowe) pozwoliły zmniejszyć udział podziarna z ponad 20% do poniżej 3%.

Na podstawie analiz z kruszyw stwierdzono, że spadek zawartości ziaren nieforemnych (wzrost kubiczności) wpływa na parametry wytrzymałościowe kruszyw, jak odporność na rozdrabnianie LA i ścieranie M_{DE} . Dla niektórych surowców wartości sięgały 10%, co świadczy o znacznym poprawieniu jakości kruszyw. Wyższa kubiczność kruszyw znacznie poprawiła parametry odporności na rozdrabnianie LA dla dolomitu, żwiru, wapienia zmieniając wskaźnik LA o jeden poziom kategorii. Przykładowo, typowy dolomit, żwir, wapień 2–8 mm posiadał (gorszą) kategorię LA35 a foremny (lepszą) LA30. Również wyższą odporność na ścieranie M_{DE} posiadały kruszywa kubiczne o 1 poziom (granit, wapień 2–8 mm), a nawet o 2 poziomy kategorii. Na przykład dolomit, granit, wapień 2–8 mm foremny posiada $M_{DE}30$, a typowy $M_{DE}40$ [8, 19].

Przeprowadzone badania wytrzymałości betonu na próbkach wytworzonych z kruszyw foremnych wykazały wyższą wytrzymałość od 10–20% w stosunku do betonów wytworzonych z typowych kruszyw (zawierających około 20% ziaren nieforemnych). Ponadto płaskie wydłużone ziarna kruszywa są trudne do zagęszczenia, a co za tym idzie zmniejsza się urabialność betonu, wzrasta wodożądność. Badania struktury wewnętrznej betonów za pomocą tomografu wykazały, że beton z ziarnami nieforemnymi charakteryzuje się zdecydowanie większą zawartością sferycznych porów dużych powyżej kilku milimetrów, umieszczonych na granicach faz kruszywo–matryca cementowa, znaczną porowatością odspojeniową oraz wielkością szczelin hydratacyjnych. Przyjmuje się, że pory małe, sferyczne, niepołączone ze sobą, do wielkości ok 300 μm nie wpływają znacząco na trwałość i właściwości betonu. Ciągłe pory (szczelinowe) oraz duże (pow. 300 μm), sferyczne powodują pogorszenie parametrów wytrzymałościowych. Wzrost zawartości pustek powietrznych o 1% powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie o ok. 5%. Fakt ten ma bezpośrednie przełożenie w wytrzymałości próbek oraz zwiększonego zapotrzebowania na wodę zarobową przy zastosowaniu płaskich ziaren kruszywa. Zwiększenie zawartości wody zmniejsza wytrzymałość i trwałość betonu [20, 21].

Zaletą układu technologicznego do produkcji kruszyw kubicznych i uszlachetniania jest możliwość selektywnego wydzielania dowolnych frakcji oraz ziaren o kształtach regularnych i nieregularnych w tych frakcjach. Wydzielone frakcje mogą być łączone w dowolny produkt końcowy (2–8 mm, 8–16 mm itp.) w odpowiednich proporcjach z zachowaniem stabilności mieszanki kruszywa (stabilizacja krzywej uziarnienia, z udziałem lub bez udziału nadziarna i podziarna). Tak uszlachetnione kruszywo jest cennym materiałem wykorzystywanym do produkcji betonów specjalnych, nawierzchni betonowych lub asfaltowych.

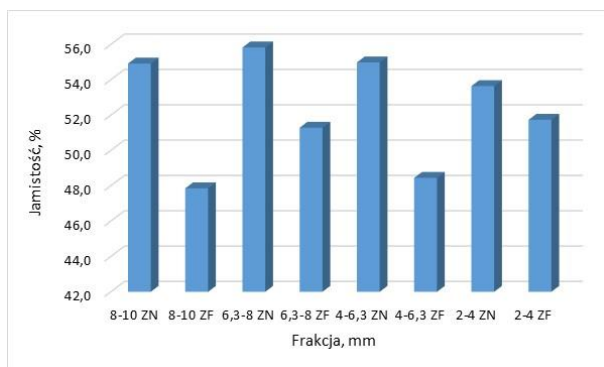
Zauważono poprawę zagęszczenia kruszywa stosowanego do MMA w stanie utrzesionym we wszystkich próbkach zawierających 100% udziału kruszyw foremnych. Ziarna płaskie powodują zwiększenie jamistości, a co za tym idzie – rozluźnienie szkieletu skalnego tworzonego przez kruszywo. Wskaźnik penetracji dla MMA wytworzonej z kruszyw foremnych i zmodyfikowany ziarnami drobnymi polepszył swoją wartość do poniżej 1 mm. Znacznie poprawiono wskaźnik nośności CBR kruszywa sięgający nawet 49%, który jest stałą materiałową dla badanego gruntu czy kruszywa i odpowiada nośności materiału zagęszczonego. Nośność kruszywa w nawierzchni drogowej odpowiada za przenoszenie obciążeń bez wywoływania nadmiernych odkształceń. Kruszywa o wskaźniku CBR wyższym niż 40% mogą być stosowane jako warstwa wzmacniająca (technologiczna) dla dróg ekspresowych i autostrad [21].

W przeprowadzonych badaniach nad procesem uszlachetniania w osadzarkach kruszyw chalcedonitu i żwiru [22], zaobserwowano zależność, że kruszywo w klasie 6,3–8 mm z ziarnami foremnymi gromadzące się w dolnej warstwie materiału cechowało się najmniejszą nasiąkliwością procesową (0,6% w przypadku żwiru i 3,6% w przypadku chalcedonitu). W górnych warstwach kruszywa miały najwyższą nasiąkliwość. Ziarna nieforemne żwiru posiadały 4% nasiąkliwości a chalcedonitu 8%. Zauważono, wyraźny wpływ procesu rozdziału na odseparowanie ziarn zanieczyszczonych tlenkami żelaza, które zgromadziły się w dolnej warstwie w przypadku chalcedonitu, jak również wyraźny rozdział ziarn kwarcytu od piaskowca w kruszywie żwirowym. W górnych warstwach produkty żwiru i chalcedonitu zawierały największy udział ziaren lżejszych zwietrzałych i porowatych.

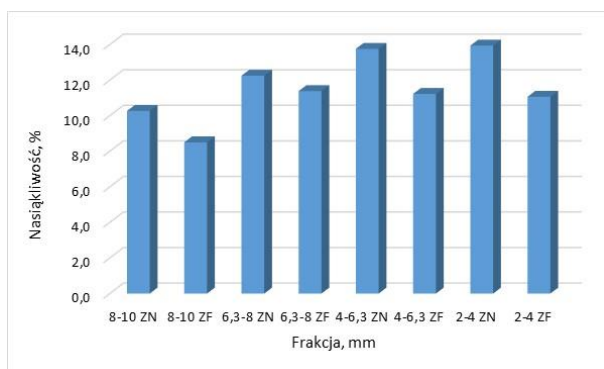
Te obserwacje przyczyniły się do rozwoju dalszych badań pod kątem oceny właściwości oraz wykorzystania w innym kierunku takich kruszyw, skoro nie nadają się do produkcji betonów oraz mineralnych mieszanek asfaltowych. Badania zostały przeprowadzone pod kątem oceny gęstości nasypowej, jamistości i nasiąkliwości jako materiału niezbędnego do produkcji konstrukcji do kompozycji rdzenia mineralnego.

Wyseparowany chalcedonit w wąskich frakcjach 2–4 mm, 4–6,3 mm, 6,3–8 mm i 8–10 mm rozdzielonych na ziarna foremne i nieforemne, wykazał wysokie zróżnicowanie pod kątem ich właściwości. Wyniki wyraźnie wskazują, że ziarna nieforemne (płaskie i wydłużone) posiadają wyższą jamistość przekraczającą nawet 55% w stosunku do ziaren foremnych (rys. 4). Ziarna nieforemne posiadają także wyższą nasiąkliwość sięgającą 14% oraz niższą gęstość nasypową poniżej 1 g/cm³ (rys. 5–6).

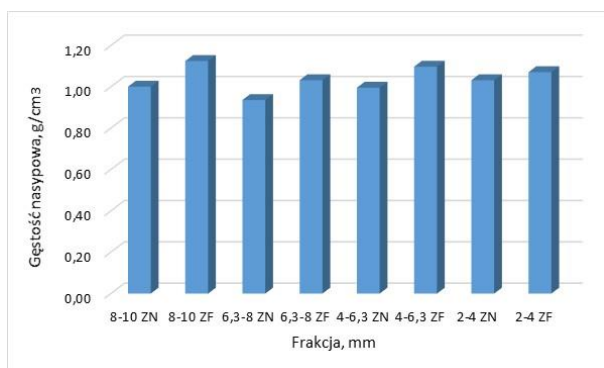
Właściwości płaskich kruszyw, mogą stanowić zalety w przypadku wykorzystania ich w podłożach dla roślin stosowanych na dachach, ponieważ takie podłoża mineralne powinny charakteryzować się wysoką jamistością poprawiającą aerację i wysoką nasiąkliwością wpływającą na retencję wodną. Korzystne właściwości tego materiału wykorzystano także do opracowania konstrukcji do kompozycji rdzenia mineralnego stanowiącej wynalazek (P.448412) [2].



Rys. 4. Jamistość chalcedonitu w zależności od wielkości frakcji i kształtu ziaren
Fig. 4. The cavernasity of chalcedonite depending on the fraction size and grain shape



Rys. 5. Nasiąkliwość chalcedonitu w zależności od wielkości frakcji i kształtu ziaren
Fig. 5. Water absorption of chalcedonite depending on the fraction size and grain shape



Rys. 6. Gęstość nasypowa chalcedonitu w zależności od wielkości frakcji i kształtu ziaren
Fig. 6. Bulk density of chalcedonite depending on the fraction size and grain shape

4. KOMPOZYCJA MINERALNA WSPOMAGAJĄCA WZROST ROŚLIN

4.1. ZASTOSOWANIE

Kompozycja mineralna wspomagająca wzrost roślin jest to rdzeń powietrzno-mineralno-nawadniający, która ma zastosowanie w ogrodnictwie, rolnictwie i leśnictwie w uprawie drzew i krzewów, roślin ozdobnych rosnących zarówno w gruncie jak i w pojemnikach. Szczególne zastosowanie ma dla roślin rosnących w miejskich nasadzeniach w otoczeniu kostki brukowej, o ograniczonej powierzchni trawnika (rys. 7).



Rys. 7. Przykład aplikacji rdzeni pod dębem czerwonym (*Quercus rubra*) na terenie kampusu AGH
Fig. 7. Example of cores application under a red oak (*Quercus rubra*) on the AGH campus

W obliczu zmian klimatycznych, rdzenie są bardzo dobrym rozwiązaniem na występujące coraz częściej nawały opadów, ponieważ po ich odpowiednim ułożeniu woda spływająca po powierzchni gleby może trafiać do niej w głąb poprzez strukturę jamistą rdzenia, dzięki czemu będzie nawadniać głębiej rosnące korzenie drzewa i magazynować wodę w porach kruszywa i w przestrzeniach jamistych występujących pomiędzy kruszywami.

4.2. BUDOWA KOMPOZYCJI RDZENIA

Wynalazek (rys. 8–10) zbudowany jest z:

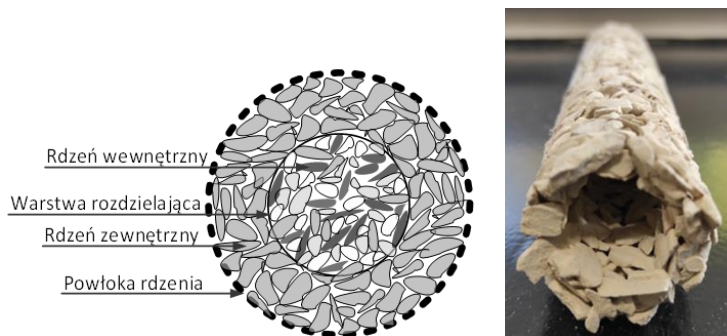
- a) zewnętrznej powłoki, np. siatki, dzianiny, tekstury perforowanej w zależności od planowanej żywotności kompozycji rdzenia,

- b) pierścienia zewnętrznego zbudowanego z kruszyw o ziarnach płaskich w wąskiej klasie ziarnowej, której celem jest utrzymanie stabilnej konstrukcji o dużej jamistości i nasiąkliwości (rys. 9). Wybór odpowiedniego rodzaju kruszywa jest istotny i zależy od rośliny, którą ma wspomagać. Przykładowo, kruszywa wapienne są korzystne dla roślin wymagających glebę odkwaszoną – obojętną (winorośla, dęby), a kruszywa diatomitowe będą zakwaszać glebę (rośliny iglaste, borówki). Porowatość i nasiąkliwość tych kruszyw jest wykorzystywana również do nasączenia ich w nawozie np. żelu długodziałającym.
- c) pierścienia wewnętrznego, który zbudowany jest z różnych składników (rys. 10):
- kruszyw płaskich o tej samej frakcji, w celu stabilizacji jamistej konstrukcji,
 - wiórów z kości i rogów zwierzęcych, które są bogate w składniki mineralne zwłaszcza hydroapatyt, niezbędne dla żywienia roślin,
 - granul powstających z drobno zmielonych surowców mineralnych różnego rodzaju. Zazwyczaj są to surowce powstające podczas rozdrabniania, płukania i odpylania kruszyw. Mogą to być mączki bazaltowe, granitowe, diabazowe, serpentynitowe, wapienne, dolomitowe. Granule powstają w procesie grudkowania poprzez zmieszanie tych mączek z kwasem huminowym i lepiszczem z dodatkiem wody,
 - nawozu granulowanego (długodziałającego), dedykowanego pod konkretną roślinę.

Wszystkie te surowce mogą być produktami ubocznymi przeróbki, ale najistotniejszymi są cenne w minerały biodostępne dla roślin i powinny być dobierane w odpowiednich proporcjach z przeznaczeniem dla konkretnych roślin. Do wytworzenia rdzeni zewnętrznych wykorzystano kruszywo chalcedonitowe o uziarnieniu 6,3–8 mm o ziarnach płaskich ze względu na wysoką jamistość sięgającą 56% oraz nasiąkliwość prawie 12% po 24 h nasiąkania wodą (rys. 9 z prawej).



Rys. 8. Widok kompozycji mineralnej (od lewej) wykonanej w siatce plastikowej, jucie i tekturze
Fig. 8. View of the mineral composition (from the left) made of plastic mesh, jute and cardboard



Rys. 9. Budowa i przekrój kompozycji mineralnej (z lewej), widok rdzenia zewnętrznego (z prawej)
 Fig. 9. Structure and cross-section of the mineral composition (left), view of the outer core (right)



Rys. 10. Skład mieszanki nawozowo-mineralnej rdzenia wewnętrznego
 Fig. 10. The composition of the fertilizer-mineral mixture of the inner core

W prowadzonych badaniach do wytworzenia granul wchodzących w skład rdzenia wewnętrznego wykorzystano surowce mineralne zmielone w młynie kulowym na sucho do uziarnienia poniżej 0,1 mm oraz dodatki (tabela 1). Wszystkie składniki poddano granulacji standardową metodą w granulatorze dynamicznym mieszalnikowym firmy IdeaPro. Wytworzono granule mineralne w zakresie uziarnienia od 3,15 do 6,3 mm.

Tabela 1. Skład granul mineralnych
 Table 1. Composition of mineral granules

Składniki	Udział, %
Bazalt	29,6
Glaukonit	29,6
Serpentynit	29,6
Mąka pszenna	1,2
Kwas huminowy (KH)	6,3
Woda	3,6

Wytworzono 7 próbek kompozycji mineralnych o różnych udziałach składów mineralnych i przeprowadzono czterotygodniowy eksperyment monitorując zmiany pH oraz przewodność elektrolityczną roztworów, w których zanurzone były wytworzone kompozycje mineralne. Na podstawie uzyskanych wyników [2], wytypowano rdzenie pod względem korzystnego składu i działania dla sadzonek iglastych (tabela 2), mających dużo związków łatwo rozpuszczalnych i przyswajalnych oraz uwalniających również związki trudno rozpuszczalne, które są potencjalnie odżywcze w okresie wydłużonej ekspozycji.

Tabela 2. Skład kompozycji mineralnej rdzeni
Table 2. The mineral composition of the cores

Element	Składniki	Udział, %
Rdzeń wewnętrzny	granule mineralne	50
	wióry z rogów i kopyt	10
	kruszywo chalcedonitowe nasączone agrecolem	30
	nawóz granulowany długodziałający substral	10
Rdzeń zewnętrzny	kruszywo chalcedonitowe	100
Powłoka rdzenia	perforowana rolka tekturowa nasączona agrecolem lub juta	–

4.3. PRZYKŁADY I EFEKTY APLIKACJI KOMPOZYCJI MINERALNEJ NA ROŚLINACH

Wykonano ponad 100 sztuk kompozycji mineralnych składających się z rdzeni w powłokach jutowych i tekturowych w kształcie walca o średnicy 4,5 cm i wysokości 26 cm, które zostały użyte do badań wzrostu roślin w różnych warunkach. Badania polowe prowadzono dla gatunków *Pinus banksiana*, sosna Banksa i *Pinus tabulaeformis*, sosna chińska. Badania doniczkowe prowadzono dla gatunku *Pinus uncinata*, sosna hakowata i *Pinus tabulaeformis*, sosna chińska, a badania wazonowe prowadzono dla gatunku *Pinus thunbergii*, sosna Thunberga.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono przykładowe rezultaty uprawy sadzonek w warunkach wazonowych i doniczkowych przy zastosowaniu oraz bez zastosowania kompozycji mineralnych [2]. Wszystkie rośliny w wazonach i doniczkach (z zaaplikowanymi kompozycjami mineralnymi i bez) były jednakowo pielęgnowane (podlewane i dwukrotnie podsypane nawozem granulowanym w kwietniu i maju po 4 g pod każdą roślinę (19N, 5P, 13K, 2Mg).

Największe efekty przyrostu masy zielonej i korzeniowej zaobserwowano w uprawie wazonowej eksponowanej na stanowisku silnie nasłonecznionym osłoniętym od wiatru. Pędy jednoroczne sadzonek z zastosowanymi kompozycjami w okresie wzrostu od marca do sierpnia sięgały maksymalnie 20 cm i były nawet dwukrotnie większe od

sadzonek bez zaaplikowanych kompozycji (rys. 11). Masa korzeniowa roślin uprawianych z zastosowaniem kompozycji również była dwukrotnie większa.



Rys. 11. *Pinus thunbergii*, sosna Thunberga po pozyskaniu z uprawy wazonowej (bez rdzenia – z lewej, z rdzeniem – z prawej)

Fig. 11. *Pinus thunbergii*, Thunberg pine after being harvested from a pot culture (without core – left, with core – right)



Rys. 12. *Pinus uncinata*, sosna hakowata po roku z doniczkowej uprawy (8.04.2024), z lewej z rdzeniem, z prawej bez rdzenia

Fig. 12. *Pinus uncinata*, a hooked pine after a year from a potted crop (08.04.2024), on the left with a core, on the right without a core

Mniejsze efekty przyrostu masy zielonej zaobserwowano w uprawie doniczkowej roślin eksponowanych na stanowisku umiarkowanie nasłonecznionym, częściowo zacienionym również osłoniętym od wiatru. Przyrosty pędów sadzonek z zastosowanymi kompozycjami sięgały maksymalnie 17 cm i były większe od 20 do 70% od sadzonek uprawianych bez zastosowania kompozycji mineralnej. Po okresie wzrostu od marca do kwietnia kolejnego roku (13 miesięcy) zaobserwowano znaczny rozrost masy korzeniowej, tj. ponad dwukrotnie (rys. 12). Skład podłoża dla roślin w wazonach i doniczkach stanowił 50% gleby ilasto-gliniastej oraz 50% odkwaszonego podłoża torfowego (torf odkwaszony pH od 5,5 do 6,5).

Najmniejsze efekty przyrostu masy zielonej zaobserwowano w warunkach polowych na stanowisku nasłonecznionym narażonym na wiatry w glebie ilasto-gliniastej z tendencją do lekkiego przesuszania w upalne dni. Sadzonki z zastosowanymi kompozycjami osiągnęły wyższy przyrost pędów od 10 do 40% w stosunku do sadzonek uprawianych bez kompozycji w zależności od rodzaju sosny. Sadzonki w warunkach polowych z zastosowanymi kompozycjami nie były zasilane dodatkowo nawozami, natomiast sadzonki uprawiane bez kompozycji były podobnie nawożone jak rośliny w wazonach i doniczkach.

W wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić, że kompozycje mineralne według wynalazku zaaplikowane dla roślin uprawianych w gruncie, doniczkach oraz wazonach powodują przyrost masy zielonej w postaci pędów jednorocznych od 20 do 100% i rozwój masy korzeniowej ponad dwukrotnie większej.

5. PODSUMOWANIE

Opracowane wynalazki do produkcji kruszyw foremnych stanowią innowację procesową i produktową w skali światowej. Dzięki nim zbudowane technologie pozwalają na produkcję kruszyw o silnie zróżnicowanych właściwościach i parametrach, ponieważ powstają ziarna foremne i nieforemne w wąskich frakcjach o wyższych oraz niższych gęstościach. Kruszywa takie różnią się także od siebie nasiąkliwością, jamiistością oraz wytrzymałością.

Okazuje się, że wszystkie kruszywa mogą mieć korzystne zastosowanie, jeśli znajdzie się w nich zaleta zgodna z przeznaczeniem. Kruszywa płaskie okazały się znakomitą budulcem konstrukcyjnym kompozycji mineralnej wspomagającej wzrost roślin. Istotnym zagadnieniem i korzyścią z zastosowania wynalazku jest metoda pozyskiwania składników do kompozycji rdzeni, stanowiących produkty uboczne nie tylko z przeróbki surowców mineralnych, ale również odpady budowlane czy z procesów produkcyjnych żywności (kości, rogi).

Artykuł jest wynikiem realizacji projektu w ramach konkursu NCBiR: konkursu nr 1, Poddziałania 4.1.4 „Projekty aplikacyjne” POIR w 2017 r., pt.: *Opracowanie i budowa zestawu prototypowych*

urządzeń technologicznych do budowy innowacyjnego układu technologicznego do uszlachetniania kruszyw mineralnych wraz z przeprowadzeniem ich testów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych". Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Działania 4.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020.



Rzeczpospolita
Polska



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

Unia Europejska



LITERATURA

- [1] LEWAK S., KOPCEWICZ J., JAWORSKI K., *Fizjologia roślin*. Wprowadzenie, PWN Warszawa 2021.
- [2] GAWENDA T., STEMPKOWSKA A., *Kompozycja mineralna wspomagająca wzrost roślin*, Wynalazek P.448412, zgłoszony 25.04.2024, *Mineral composition promoting plant growth EP24203099.7* 27, AGH, Kraków, September 2024.
- [3] *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2023 r.*, PIG-PIB, Warszawa 2024.
- [4] NAZIEMIEC Z., GAWENDA T., *Plukanie kruszyw*. Surowce i Maszyny Budowlane, 2007, nr 5, s. 30–34.
- [5] NAZIEMIEC Z., *Przeróbka i badania kruszyw mineralnych*, Rozprawy Monografie nr 356. Wyd. AGH, Kraków 2019.
- [6] GAWENDA T., *Zasady doboru kruszarek oraz układów technologicznych w produkcji kruszyw łamanych*, Rozprawy Monografie nr 304, Wyd. AGH, Kraków 2015.
- [7] GAWENDA T., *Innowacyjne technologie produkcji kruszyw o ziarnach foremnych*, Mining Science, Mineral Aggregates, Vol. 22 (1), Wrocław 2015, s. 45–59.
- [8] GAWENDA T., *Production Methods for Regular Aggregates and Innovative Developments in Poland*, Minerals, 2021, 11, 1429.
- [9] NAZIEMIEC Z., GAWENDA T., *Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr Nr 115., Seria Konferencje Nr 46, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2006, s. 83–94.
- [10] TUMIDAJSKI T., NAZIEMIEC Z., *Wpływ warunków procesu kruszenia na kształt ziaren kruszyw mineralnych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr Nr 108, Seria Konferencje Nr 40, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2004, s. 163–176.
- [11] GAWENDA T., *Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi PAN, Komitet Gospodarki Surowcami Mineralnymi, t. 29, z. 1, Kraków 2013.
- [12] NAZIEMIEC Z., SARAMAK D., *Analiza energochłonności procesów rozdrabniania kruszyw mineralnych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr Nr 134, Seria Studia i Materiały Nr 41, Górnictwo i Geologia XVII, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2012, s. 209–220.
- [13] SARAMAK A., NAZIEMIEC Z., *Determination of dust emission level for various crushing devices*, Mining Science, 2019, Vol. 26, pp. 45–54.
- [14] SARAMAK A., GAWENDA T., SARAMAK D., *Comparative analysis of dust and noise emission in aggregate production systems*, Minerals, 2022, Vol. 12, Iss. 4, art. no. 452, s. 1–14.
- [15] PN-EN 933-3:2012. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości.*
- [16] PN-EN 933-4:2008, *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – część 4: Oznaczanie kształtu ziarn – wskaźnik kształtu.*

- [17] GAWENDA T., *Wibracyjny przesiewacz wielopokładowy*. Patent PL-231748B1, AGH w Krakowie 2019.
- [18] GAWENDA T., SARAMAK D., NAZIEMIEC Z., *Układ urządzeń do produkcji kruszyw oraz sposób produkcji kruszyw*. Patent nr 233318 B1, AGH w Krakowie 2019.
- [19] GAWENDA T., STEMPKOWSKA A., SARAMAK D., FOSZCZ D., *Analiza produkcji kruszyw foremnych w innowacyjnym układzie technologicznym kopalni dolomitu Imielin*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 5, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2022, 27–38.
- [20] STEMPKOWSKA A., GAWENDA T., NAZIEMIEC Z., OSTROWSKI K.A., SARAMAK D., SUROWIAK A., *Impact of the geometrical parameters of dolomite coarse aggregate on the thermal and mechanic properties of preplaced aggregate concerto*, *Materials*, 2020, Vol. 13, Iss. 19, art. no. 4358, s. 1–17.
- [21] STEMPKOWSKA A., GAWENDA T., GÓRNIAK A., *Wybrane właściwości kruszyw uszlachetnionych w kontekście zastosowań do betonowych i asfaltowych nawierzchni drogowych*, Wyd. Elamed, *Kruszywa: Produkcja, Transport, Zastosowanie*, 2022, nr 1, s. 50–55.
- [22] GAWENDA T., SARAMAK D., NAD A., SUROWIAK A., KRAWCZYKOWSKA A., FOSZCZ D., *Badania procesu uszlachetniania kruszyw w innowacyjnym układzie technologicznym*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 3, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2019, 39–41.

“MINERAL COMPOSITION PROMOTING PLANT GROWTH” AS AN INVENTION OF A SIDE EFFECT OF CUBIC AGGREGATE PRODUCTION

The article presents innovative inventions concerning the production and refinement of mineral aggregates. The results obtained from the conducted research turned out to be very beneficial not only for the construction and road industry due to their high quality parameters, but also for the green infrastructure or horticultural industry. The presented technologies allow for the isolation of unique aggregates with different properties beneficial for the cultivation and development of plants during production. These can be completely flat grains with higher water absorption, lower density (weathered) and rich in bioavailable components for plants. Another feature of such flat and mono-fraction aggregates is higher voids, which in the case of their use in substrates increases the ability of aeration and retention. The result of these studies was the invention “Mineral composition promoting plant growth”. The article discusses the construction of the invention, its purpose and the effects obtained on the example of their application in plantings.

Stefan GÓRALCZYK

Federacja Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Naczelna Organizacja Techniczna, Warszawa

25 LAT KONFERENCJI „KRUSZYWA MINERALNE”. NAUKA I PRZEMYSŁ RAZEM DO INNOWACJI

Artykuł został napisany z okazji 25 rocznicy powstania i funkcjonowania konferencji naukowo-technicznej „Kruszywa Mineralne”. Zawiera elementy historii konferencji, tematyki i analizy oraz wpływu na rozwój przemysłu kruszyw. Jest podziękowaniem dla organizatorów, a także wszystkich uczestników konferencji.

1. KILKA SŁÓW WSPOMNIEN

Pierwsza konferencja „Kruszywa Mineralne” odbyła się 18–19 kwietnia 2001 r. w Polanicy-Zdroju. Jej organizatorami byli i są przez kolejne 25 lat Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej oraz Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa Oddział we Wrocławiu.

Potrzeba powstania i funkcjonowania takiej konferencji była zgłaszana przez środowiska przemysłu kruszyw oraz nauki od kilku lat. Od początku tematyka konferencji była ściśle związana z potrzebami i problemami rozwojowymi górnictwa kruszywowego w myśl zasady „nauka dla przemysłu”. Główna idea konferencji ujęta została w jej tytule, aby podkreślić ważność tych obszarów dla firm wydobywających kruszywo, jako czynnik rozwojowy.

W pierwszej edycji konferencji ogłoszono 19 referatów. W następnych latach została uściślona jej tematyka w obszarach:

- prognoz funkcjonowania rynku surowców skalnych i bazy zasobowej,
- eksploatacji złóż i przeróbki – technologii, innowacyjności rozwiązań,
- jakości kruszyw i kamienia budowlanego,
- bezpieczeństwa pracy, środowiska i społeczności lokalnej,
- zagadnień formalno-prawnych górnictwa kruszywowego.

Przywołana tematyka jest również aktualna obecnie. W poszczególnych latach konferencje odbywały się: w Polanicy-Zdroju (2001–2003), Szklarskiej Porębie (2004–2011), a od 2012 r. w Kudowie Zdroju. Podczas dotychczasowych konferencji zostało wygło-

szonych i opublikowanych w materiałach konferencyjnych, a od 2017 r. w monografiach „Kruszywa mineralne” – 483 artykułów, średnio 20 na konferencję. Oczekujemy w tym 2025 r. podczas jubileuszowej konferencji na 500 artykuł.

Godną podkreślenia jest także frekwencja. Z dużym prawdopodobieństwem, przyjmując średnio na każdej konferencji udział tylko 200 uczestników, to w jubileuszowej sumaryczna liczba uczestników przekroczy 5000 osób.

2. ANALIZA MERYTORYCZNYCH OBSZARÓW KONFERENCJI

Analizując tematykę konferencji w 25-letnim okresie należy zauważyć, że dominującymi obszarami wiedzy w artykułach i dyskusjach były istotne dla praktyki obszary zagadnień: prognoz funkcjonowania rynku kruszyw i bazy zasobowej, eksploatacja złóż, technologii wydobywania i przeróbki wraz z nowoczesnym wyposażeniem maszynowym oraz jakości kruszyw.

Oczywiście ta kolejność tematyki zmieniała się. Były to jednak i są główne obszary prezentowanych zagadnień. Poruszana problematyka uzależniona była w dużym stopniu od zmieniającej się sytuacji gospodarki krajowej, a w szczególności w budownictwie – w sektorze gospodarczym z wiodącym wpływem zapotrzebowania na surowce skalne.

Początkowe funkcjonowanie konferencji (lata 2001–2004), były okresem stowarzyszeniowym Polski z Unią Europejską. Referowano wówczas zagadnienia przyjmowanie unijnych przepisów technicznych do krajowego prawodawstwa, w tym dyrektyw i norm europejskich dotyczących kruszyw, ale również maszyn i urządzeń i wymagań dla środowiskowych. W tym okresie dominowały artykuły związane z tematyką jakości europejskiej, nowych metod badań oraz zasad oceny wyrobów z kopalin skalnych. Głównym celem było przedstawienie różnic w podejściu do jakości wyrobów na rynku krajowym i UE oraz przygotowanie przemysłu do koniecznych zmian, także nowego podejścia do eksploatacji i przeróbki jakościowej surowca. Było to ściśle powiązane z tematyką nowych technologii i zastosowania nowoczesnych maszyn i urządzeń.

Był to również początek tematyki nowoczesnego zarządzania firmami, a także stosowania narzędzi komputerowych na wszystkich etapach – od wydobywania poprzez przeróbkę i dystrybucję produktów rynkowych. W tym okresie zapoczątkowano duże zmiany w górnictwie kruszywowym, mające na celu dostosowanie wyrobów do jakości europejskiej. Ten moment zaowocował powstawaniem w kraju nowoczesnego, porównywalnego z europejskim, przemysłu kruszyw.

Konferencja „Kruszywa Mineralne” ma ogromny wkład w przywołane powyżej zmiany. W artykułach i dyskusjach z przedstawicielami przemysłu przedstawiano nowe, europejskie i światowe kierunki osiągnięcia w technologiach, maszynach, urządzeniach i jakości wyrobów. Ustalane są propozycje działań, w tym współpracy z nauką, jak te zmiany wdrożyć w krajowym przemyśle.

Bardzo ważna tematyka, rozpoczynająca się w tym początkowym okresie, dotyczyła zmian w prawodawstwie w gospodarce, a szczególnie w dziedzinie BHP w górnictwie i jako nowy trend – w zakresie eksploatacji przyjaznej środowisku, co oznaczało nowość w dotychczasowych zasadach eksploatacji i pełnego wykorzystania wydobytego ze złoża surowca. W tym okresie możemy zauważyć, już w tematyce pierwszych konferencji, referaty dotyczące wykorzystania surowców odpadowych, powstających przy eksploatacji i przeróbce wydobytej ze złóż kopalin.

W naszych konferencjach towarzyszy tematyka „gospodarki obiegu zamkniętego”, poruszana w kraju powszechnie i przyjęta do stosowania dopiero po kilku latach – teraz jest normalnością. Stąd konferencja ta była więc jedną z pierwszych, poruszających tę tematykę i przedstawiającą takie podejście do produkcji jako opłacalne tak dla producenta, odbiorcy oraz środowiska. Nowa wiedza audytorium konferencji, co należy podkreślić, wynikała z szerokich kontaktów firm i naukowców w obszarze europejskim i światowym, czyniąc tematykę konferencji przodującą w kraju.

Zupełną nowością w kraju we wczesnym okresie lat 2000 były artykuły dotyczące wykorzystania różnych odpadów, także z innych przemysłów, w tym niebezpiecznych do produkcji kruszyw sztucznych. Przedstawiano całkowicie innowacyjne technologie i maszyny, zagospodarowania odpadów uciążliwych dla środowiska, do wyprodukowania kruszyw sztucznych jako bezpiecznych i jakościowo porównywalnych z naturalnymi. To tylko kilka przykładów wpływu tej konferencji w nowoczesny rozwój przemysłu surowcowego, szczególnie kruszyw.

Przedstawiona ogólnie tematyka realizowana była w następnych latach funkcjonowania konferencji uwzględniając podstawowe kryterium: innowacyjności przedstawianych zagadnień, a w szczególności nowoczesne technologie, maszyny, urządzenia oraz nowe metody badań.

Z wyszczególnionej tematyki i osiągnięć wynikają główne cele konferencji:

- przedstawianie i informowanie przemysłu kruszyw o nowoczesnych technologiach, maszynach i urządzeniach oraz o osiągnięciach nauki w tym obszarze,
- wymiana doświadczeń, pomiędzy nauką i przemysłem, integracja nauki i przemysłu w formie wspólnych działań na rzecz wdrażania innowacyjnych rozwiązań,
- informowanie o zmianach przepisów w obszarze jakości i dopuszczania wyrobów do obrotu rynkowego, bezpieczeństwa pracy, środowiska, eksploatacji, w tym uruchamiania zagospodarowania złóż oraz zasad sprzedaży produktów,
- promocja firm z obszaru produkcji kruszyw oraz firm działających na rzecz przemysłu kruszyw: producentów maszyn, usługodawców itp.

Realizacja tych celów to istota funkcjonowania konferencji, jej trwanie, rozwój i przydatność dla branży kruszyw. Dzięki tym zasadom, pomimo 25 lat, różnych okresów dla gospodarki i przemysłu kruszyw, funkcjonowanie konferencji nigdy nie było zagrożone, z istnieniem wysokiego zainteresowania nauki i przemysłu.

Ważne i duże znaczenie, obok istotnego udziału przedstawicieli nauki, osób o dużym dorobku badawczym, znanych i cenionych w środowisku naukowym, pracowników wy-

bitnych uczelni i instytutów – ma liczny udział przedstawicieli firm. To potwierdza tezę, że w obszarze surowcowym, przemysł jest bardzo zainteresowany współpracą z nauką, jej osiągnięciami i wdrażaniem wyników badań. Stąd, stały, czynny i zawsze bardzo liczny udział przedstawicieli przemysłu we wszystkich konferencjach od 2001 r. Ten czynny udział, to nie tylko autopromocja, lecz także ciekawe artykuły, a przede wszystkim udział w dyskusjach dotyczących prezentowanej tematyki w poszczególnych sesjach.

Ważnym obszarem wszystkich konferencji są dyskusje i wycieczki techniczne do zakładów produkcyjnych – kopalń. To jeszcze jeden ważny sposób prezentacji działań oraz ogromnego postępu, jaki dokonał się w przemyśle kruszyw przez ostatnie lata. Myślę, że ta konferencja jest szczególnym narzędziem tego postępu. Świadczy o tym, coroczna, bardzo wysoka frekwencja, tak pracowników nauki jak i przemysłu.

Jak wynika z przedstawionych powyżej faktów, konferencja stanowiła wyjątkowe miejsce spotkań nauki, przemysłu a także przedstawicieli urzędów, m.in. samorządu terytorialnego, Urzędu Górniczego i ministerstw. Szczególną kontynuacją opisanych działań będzie 25. jubileuszowa konferencja. Oczekuje się z dużą niecierpliwością jej rozpoczęcia oraz zaplanowanych wydarzeń i spotkań.

25-letnia historia konferencji, to ogromna zasługa organizatorów – pracowników Politechniki Wrocławskiej, Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii oraz koleżanek i kolegów z wrocławskiego Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa. Ich ogromny wkład ciągłej pracy, przynosi tak cenne efekty.

Wysoki poziom merytoryczny konferencji oraz rozpowszechnianie informacji naukowej w publikacjach zapewnia Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wszystkie artykuły konferencyjne publikowane są corocznie w materiałach konferencyjnych, a ostatnio monografiach „Kruszywa mineralne” o wysokim poziomie edytorskim. Konferencja to wydarzenie nie tylko naukowe, informacyjne, ale również integrujące. Jesteśmy sobie potrzebni. Do zobaczenia w Kudowie Zdroju na 25 konferencji „Kruszywa Mineralne. Surowce – Rynek – Technologie – Jakość”.

25 YEARS OF THE CONFERENCE “MINERAL AGGREGATES”. SCIENCE AND INDUSTRY TOGETHER FOR INNOVATION

The article was written on the occasion of the 25th anniversary of the establishment and functioning of the scientific and technical conference “Mineral Aggregates”. It contains elements of the history of the conference, the subject matter and its analysis, and the impact on the development of the aggregates industry. It is a thank you to the Organizers, as well as all participants of the Conference.

Katarzyna GUZIK

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

HANDEL ZAGRANICZNY KAMIENIAMI BUDOWLANymi I BLOCZNYMI W POLSCE W LATACH 2014–2023

Dla trzech grup wyrobów: surowych i wstępnie obrobionych bloków i płyt, obrabianych elementów kamiennych oraz kostki i innych kamieni drogowych – np. krawężników, płyt chodnikowych, przedstawiono dane dotyczące struktury, wielkości oraz kierunków eksportu i importu. Analizie poddano również wartość obrotów tymi surowcami oraz wartości jednostkowe ich importu i eksportu. Zarówno w przypadku materiałów kamiennych obrobionych, jak i surowych oraz wstępnie obrobionych dane przedstawione zostały dla wszystkich odmian skał będących przedmiotem obrotów handlowych.

1. WPROWADZENIE

W Polsce użytkowane są znaczne ilości różnego rodzaju materiałów kamiennych, pochodzących zarówno z krajowych złóż, jak też importowanych. Rodzime kopalnie dostarczają przede wszystkim granity oraz piaskowce, a tylko w mniejszym zakresie inne odmiany skał [3, 5, 7]. Wydobycie blocznych skał węglanowych zostało w ostatnich latach bardzo ograniczone, realizowane jest w jednej kopalni: marmuru (Sławniowice) i dolomitu (Libiąż) oraz w kilku kopalniach wapieni. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku sjenitów, pozyskiwanych obecnie w niewielkich ilościach z jednego złoża, eksploatowanego przede wszystkim na potrzeby produkcji kruszyw.

Ocenia się, że wielkość krajowego zapotrzebowania na elementy kamienie zmieniła się w latach 2014–2023 w zakresie 1,4–1,9 mln t [3]. Taki poziom oszacowany został na podstawie danych od krajowych producentów, wielkości wydobycia ze złóż kamieni łamanych i blocznych [1] oraz importu i eksportu materiałów kamiennych [2]. Jednocześnie warto podkreślić, że wielkość zużycia obliczona na podstawie danych produkcyjnych, bazujących na oficjalnych statystykach GUS jest nawet kilkakrotnie większa 3,6–5,8 mln t [3], co wynika zapewne w znacznym stopniu z wielokrotnego ewidencjonowania produkcji tych materiałów o różnym stopniu obróbki.

Jeszcze na początku lat 90. XX w. krajowe zapotrzebowanie na kamienie budowlane i drogowe pokrywane było niemal w całości ze źródeł krajowych [4, 9]. Rozwój budownictwa oraz realizacja licznych inwestycji drogowych (m.in. rewitalizacja starówek

miast) spowodowały znaczący wzrost zapotrzebowania na materiały kamienne, w tym również te importowane. W szczególności dotyczy to zróżnicowanych petrograficznie odmian skał przyjmujących trwałe poler i zaliczanych do tzw. granitów technicznych, które stały się popularnym materiałem okładzinowym. Jednocześnie pozyskiwane obecnie rodzime odmiany granitów – głównie granitu strzegomskiego, a tylko w ograniczonym zakresie strzelińskiego i karkonoskiego, charakteryzują się niewielkim zróżnicowaniem walorów dekoracyjnych i wizualnych [8].

W analizowanym okresie lat łączny poziom krajowej produkcji kamieni budowlanych i blocznych w Polsce oceniany był na 1,2–1,8 mln t/rok [3]. Wielkość importu kamieni surowych i obrobionych, a także krawężników, kostki i innych elementów, kształtowała się w tym czasie na poziomie 400–600 tys. t/rok. Rodzima produkcja pozwalała zatem na pokrycie 64–78% krajowego zapotrzebowania, a dostawy zewnętrzne stanowiły 22–36%. Jednocześnie notowany był eksport różnego rodzaju kamieni budowlanych i blocznych z Polski, w ilościach 190–300 tys. t/rok [3].

Celem artykułu jest analiza handlu zagranicznego tymi wyrobami w Polsce. Obejmuje ona w szczególności dane dotyczące wielkości i kierunków importu i eksportu dla trzech grup wyrobów: surowych i wstępnie obrobionych bloków i płyt, elementów kamiennych obrobionych, kostki i innych, np. krawężników, płyt chodnikowych. Dodatkowo analizie poddano strukturę wartościową obrotów tymi surowcami oraz wartości jednostkowe ich importu i eksportu.

2. WIELKOŚĆ I STRUKTURA IMPORTU MATERIAŁÓW KAMIENNYCH

Łączna wielkość importu różnego rodzaju materiałów kamiennych do Polski w okresie 2014–2023 wynosiła od 403,2 do 623,1 tys. t/rok, osiągając maksimum w latach 2015–2016 (rys. 1, tab. 1). W strukturze asortymentowej importu zdecydowanie dominowały **surowe oraz wstępnie obrobione bloki i płyty**, stanowiąc 33–64%. Sprowadzane były w ilości 142,6–398,9 tys. t/rok.

Udział **elementów obrobionych** zmieniał się od 32 do 53%, a ich łączne dostawy kształtowały się na poziomie 179,4–258,5 tys. t/rok (rys. 1). Zdecydowanie najmniejsze

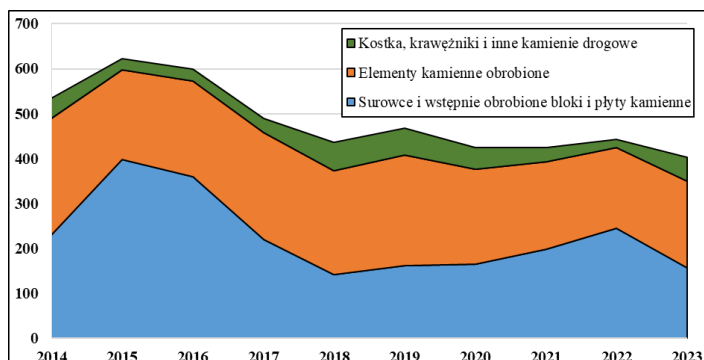
Tabela 1. Gospodarka kamieniami budowlanymi i blocznymi w Polsce, tys. t
Table 1. Management of dimension of building and block stone in Poland, thousands of tons

Rok	2014	2016	2018	2020	2022	2023
Produkcja ^{1, 2}	1150,0	1470,0	1440,0	1720,0	1710,0	1560,0
Import	533,1	598,6	436,5	424,3	442,3	403,2
Eksport	213,0	203,2	247,3	254,3	483,9	297,5
Zużycie pozorne	1470,1	1865,4	1629,2	1890,0	1668,4	1665,7

¹ Szacunkowa wielkość wydobywania bloków i mniejszych elementów kamiennych z krajowych złóż.

² Wielkość produkcji wykazywana przez GUS kształtowała 3,5–5,7 mln t/rok.

Źródło: [2, 3] i obliczenia własne.



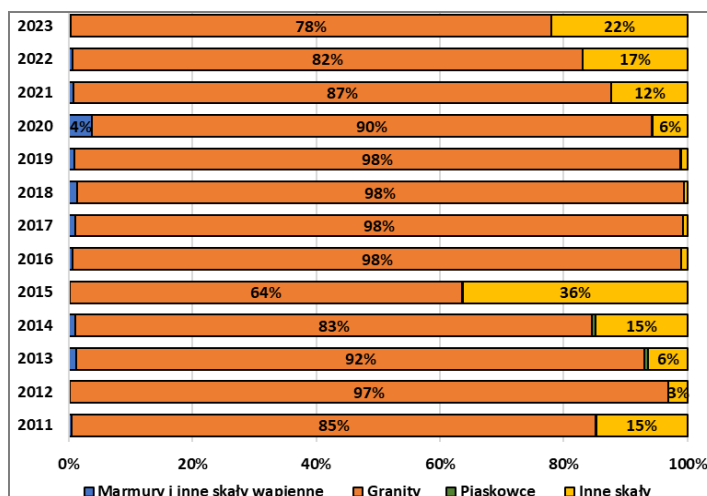
Rys. 1. Struktura importu materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023 (tys. t); obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 1. The structure of dimension stone imports to Poland in the years 2014–2023 (thousands of tons); own calculations based on [2, 3]

znaczenie miał import **kostki, krawężników i innych kamieni drogowych** – 63 tys. t/rok. Ich udział w strukturze importu materiałów kamiennych był podrzędny (4–14%; rys. 1).

2.1. MATERIAŁY KAMIENNE SUROWE I WSTĘPNIE OBROBIONE

W grupie surowych lub obrobionych wstępnie bloków i płyt zdecydowanie dominowały dostawy **granitów** (122,1–353,6 tys. t/rok, rys. 2). Przypadało na nie, na ogół powy-



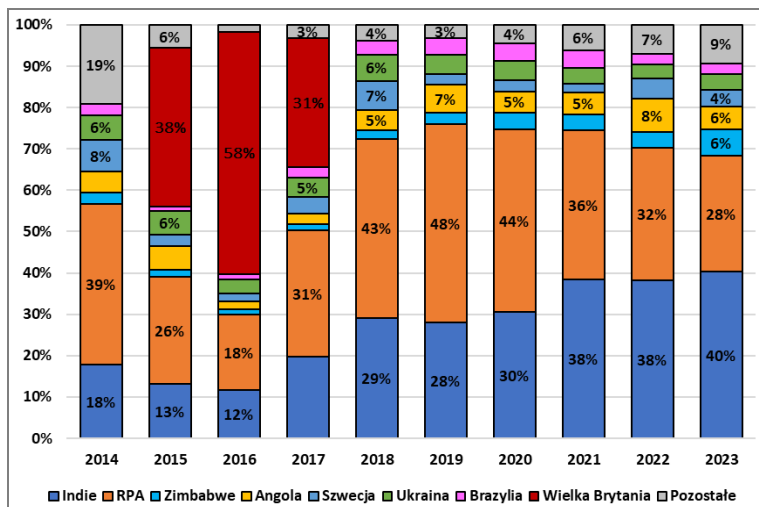
Rys. 2. Struktura importu surowych i wstępnie obrobionych materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 2. The structure of crude and roughly worked dimension stone imports to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

żej 80%, a w niektórych latach nawet do 100% łącznego importu. Dostawy **piaskowców** (do 1,2 tys. t/rok) oraz **marmurów i innych skał węglanowych** (0,5–6,3 tys. t/rok) miały marginalne znaczenie (rys. 2).

Pozostałe odmiany skał sprowadzane były w ilości kilka-kilkadziesiąt tys. t/rok, co stanowiło 1–22% łącznych krajowych dostaw surowych lub wstępnie obrobionych materiałów kamiennych. Wyjątek stanowił rok 2015, gdy wielkość ich importu okresowo wzrosła do 144,8 tys. t/rok, a jego udział zwiększył się do 36% (rys. 2).

Granity sprowadzane były do Polski głównie z Indii i RPA. W latach 2014–2023 na te dwa kraje przypadało 30–76% łącznych dostaw (rys. 3). Wielkość importu tych materiałów z Indii zmieniała się w badanym okresie w przedziale 33,1–77,1 tys. t/rok. Kraj ten pozostaje najważniejszym dostawcą surowych i wstępnie obrobionych elementów granitowych do Polski od 2021 r. We wcześniejszych latach największym i regularnym źródłem pochodzenia tego rodzaju materiałów było RPA. Wolumen importu zmieniał się w latach 2014–2023 w zakresie 34,2–76,3 tys. t/rok.



Rys. 3. Główne kierunki importu surowych i wstępnie obrobionych granitowych materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 3. The major imports directions of crude and roughly worked dimension granite to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

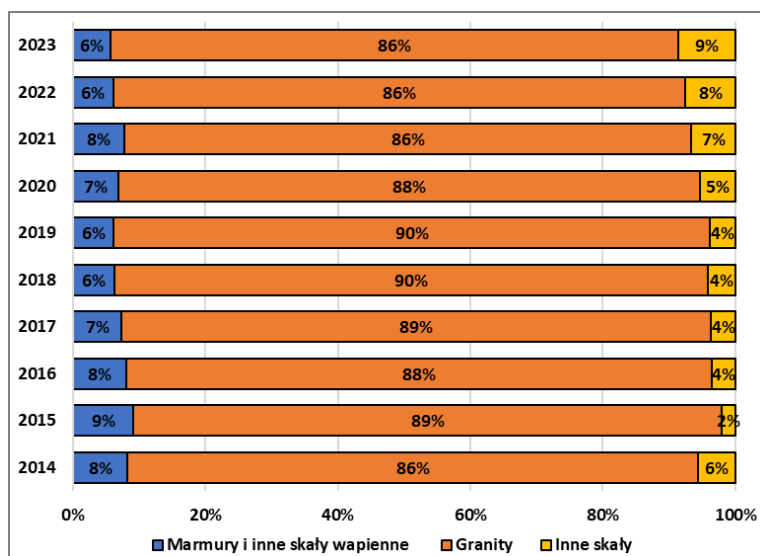
Warto podkreślić, że w 2023 r. nastąpiło znaczące ograniczenie dostaw z tych kierunków, a łączny poziom importu granitowych materiałów kamiennych zmniejszył się w stosunku do 2022 r. prawie dwukrotnie. Na liście krajów, z których w ostatniej dekadzie sprowadzano większe ilości tego rodzaju surowców (kilka-kilkanaście tys. t/rok) znajdują się również Zimbabwe, Angola, Szwecja, Ukraina i Brazylia (rys. 3). Dodatkowo w latach 2015–2017 notowano większe dostawy z Wielkiej Brytanii

(67,5–206,8 tys. t/rok; rys. 3). Z pozostałych krajów: m.in. Hiszpanii, Finlandii i Norwegii pochodzą ilości kilku tys. t/rok.

Inne skały importowane były w ilościach – kilka-kilkadziesiąt tys. t/rok, zwykle z Ukrainy, Niemiec, Słowacji i Litwy, a tylko okresowo notowany był wzrost dostaw ze Szwecji (25,7–137,8 tys. t/rok w latach 2014–2015; rys. 2). Od 2020 r. najważniejszym krajem pochodzenia tego rodzaju materiałów pozostaje Słowacja (8,4–40,4 tys. t/rok). W przypadku **marmurów i innych skał węglanowych oraz piaskowców**, których dostawy utrzymywały się w całym analizowanym okresie na bardzo niewielkim poziomie, trudno wskazać regularnych dostawców. Pierwsze z wymienionych skał importowane były najczęściej z Turcji, Norwegii, Włoch, Indii i Macedonii (w 2020 r. także z Czech), natomiast piaskowce pochodziły głównie z Indii, Niemiec i Ukrainy. Poziom dostaw z poszczególnych krajów najczęściej nie przekraczał kilkaset t/rok.

2.2. ELEMENTY KAMIENNE OBROBIONE

W strukturze importu obrobionych elementów kamiennych, podobnie jak w przypadku surowych bloków i płyt, zaznacza się zdecydowana dominacja **granitów** (86–90%; 154,8–222,7 tys. t/rok; rys. 4), większy jest natomiast udział marmurów i innych skał

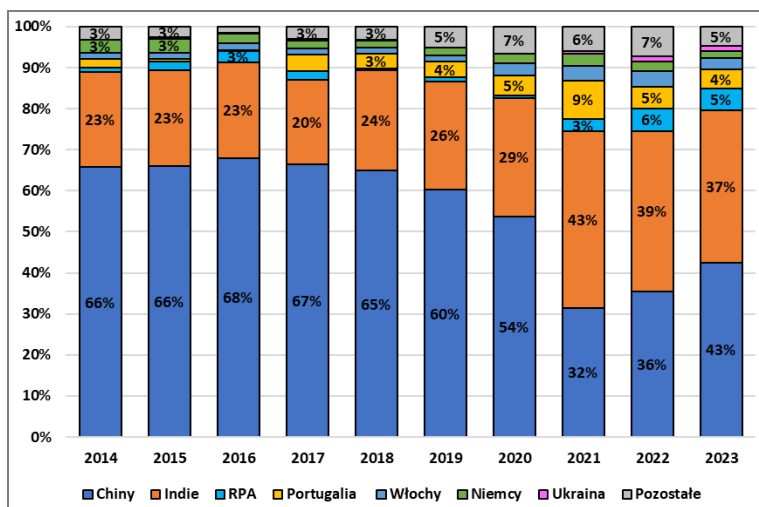


Rys. 4. Struktura importu obrobionych materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 4. The structure of worked dimension stone imports to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

węglanowych (6–9%; 11,0–21,3 tys. t/rok; rys. 4). Na grupę pozostałych skał przypada natomiast 2–9% łącznych dostaw (4,0–16,4 tys. t/r.; rys. 4).

Granity sprowadzane były przede wszystkim z krajów azjatyckich (rys. 5). Najważniejszym i regularnym dostawcą były Chiny oraz Indie, na które w latach 2014–2020 przypadało między 74 a 89% łącznej wielkości importu. W analizowanym okresie wielkość dostaw z Chin została ograniczona z poziomu 100,5–146,5 tys. t/rok (w latach 2014–2020) do 52,5–70,0 tys. t/rok. (w latach 2021–2023). Import z Indii nie wykazywał tak znaczących zmian, utrzymując się na stabilnym poziomie 41,2–60,9 tys. t/rok. Do grona większych dostawców obrobionych elementów granitowych należały również RPA, Portugalia, Włochy, Niemcy oraz Ukraina (rys. 5). Poziom importu z tych krajów na ogół nie przekraczał kilku tysięcy t/rok. Tylko okresowo większe znaczenie miały Hiszpania, Belgia, Egipt, Brazylia i Wietnam.



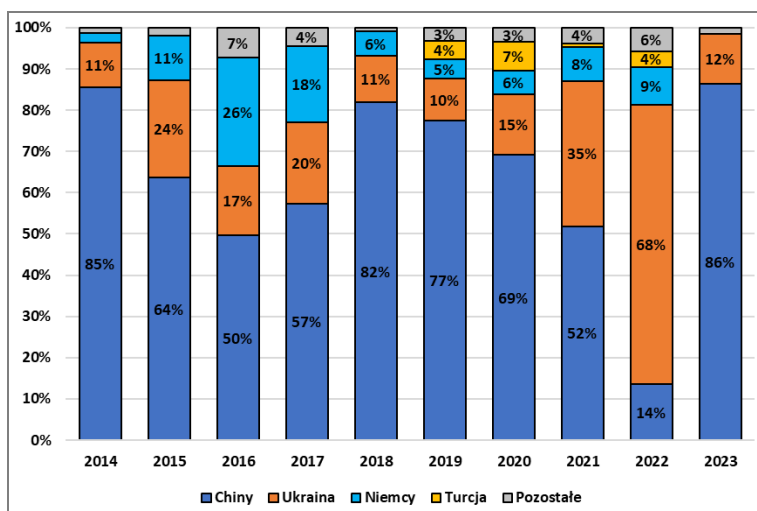
Rys. 5. Główne kierunki importu obrobionych granitowych materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 5. The major imports directions of worked dimension granite to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

Wielkość dostaw **marmurów i innych skał węglanowych** została w latach 2014–2023 ograniczona z 21,3 do ~11 tys. t/rok. Te materiały sprowadzane były przede wszystkim z Turcji, Chin, Indii, Włoch, Niemiec, Wietnamu i Czech. Wielkość dostaw z poszczególnych krajów nie przekraczała kilka tysięcy t/rok. Dostawcami niewielkich ilości elementów obrobionych zaliczanych do grupy pozostałych skał (najczęściej do kilku tysięcy t/rok) były głównie Ukraina, Niemcy, Chiny i Indie.

2.3. KOSTKA, KRAWĘŻNIKI I INNE KAMIEŃ DROGOWE

Wielkość importu kostki, krawężników oraz innych kamieni drogowych zmieniła się w szerokim zakresie – od 17,7 do 62,7 tys. t/rok, głównie w zależności od zmiennych dostaw z Chin (2,4–51,4 tys. t/rok), Ukrainy (4,4–12,0) i Niemiec (do 6,8). Najważniejszym źródłem importu do Polski były Chiny, na które w latach 2014–2023 przypadało na ogół między 50 a 86% łącznych dostaw (rys. 6). Tylko w 2022 r. udział ten był mniejszy (14%), a większość sprowadzanej kostki i krawężników pochodziła wówczas z Ukrainy (rys. 6). W latach 2019–2023 niewielkie ilości tych elementów kamiennych (do 3,3 tys. t/rok) importowane były ponadto z Turcji (rys. 6).

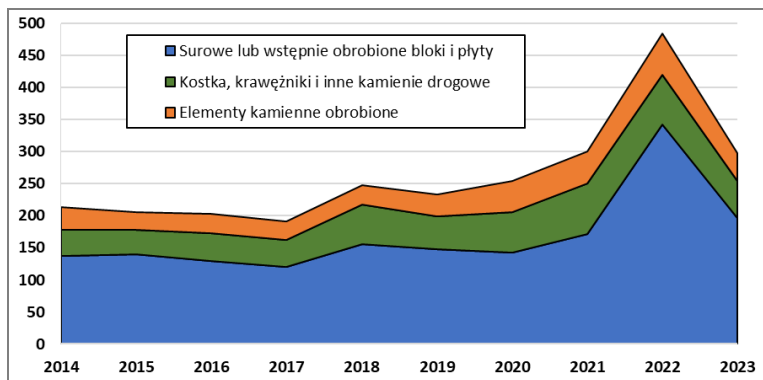


Rys. 6. Główne kierunki importu kostki, krawężników i pozostałych kamieni blocznych do Polski w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 6. The major imports directions of pitcher, curbs and other block stones to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

3. WIELKOŚĆ I STRUKTURA EKSPORTU MATERIAŁÓW KAMIENNYCH

Wielkość eksportu materiałów kamiennych z Polski kształtowała się w latach 2014–2023 na poziomie 191,6–483,9 tys. t/rok (rys. 7). Eksportowane były głównie **surowe i wstępnie obrobione bloki i płyty** (52–71%), w mniejszym zakresie **kostka, krawężniki i inne kamienie drogowe** (16–35%) oraz **elementy kamienne obrobione** (10–19%) – rys. 7.

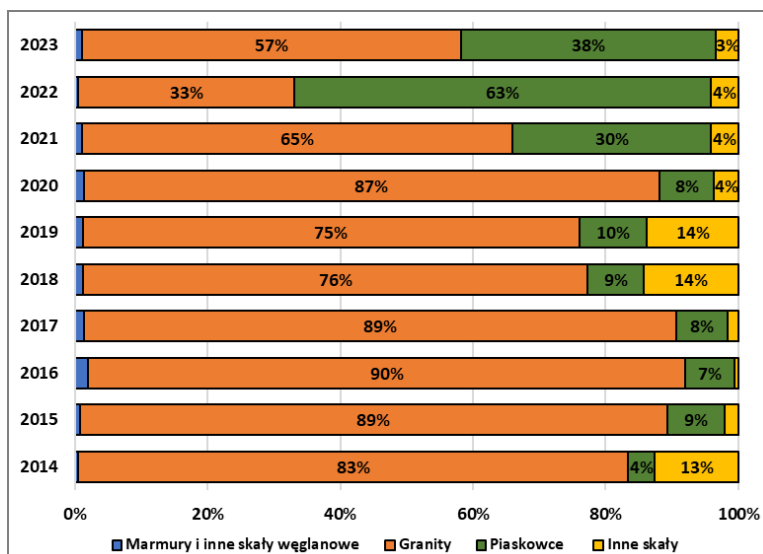


Rys. 7. Struktura eksportu materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023 (tys. t); obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 7. The structure of dimension stone exports to Poland in the years 2014–2023 (thousands of tons); own calculations based on [2, 3]

3.1. MATERIAŁY KAMIENNE SUROWE I WSTĘPNIE OBROBIONE

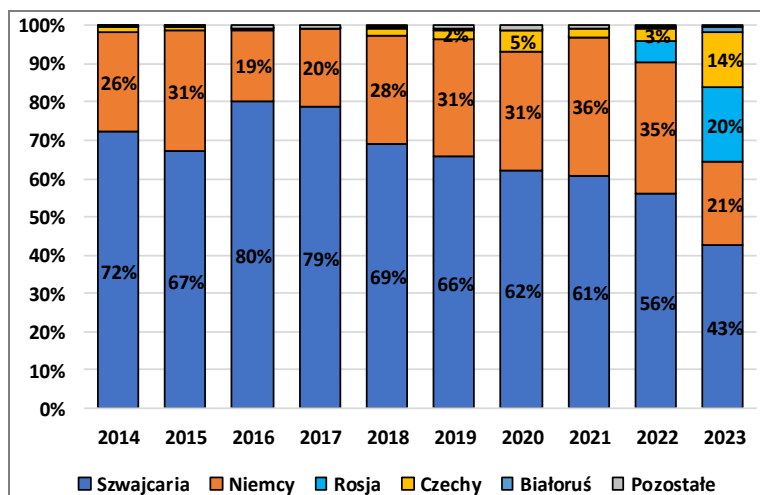
Wielkość eksportu surowych lub wstępnie obrobionych bloków i płyt w analizowanym okresie czasu zmieniała się w zakresie 120,7–196,0 tys. t/rok i tylko w 2022 r.



Rys. 8. Struktura eksportu surowych i wstępnie obrobionych materiałów kamiennych w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 8. The structure of crude and roughly worked dimension stone exports to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

wzrosła do 342,3 tys. t/rok. Na ogół znacząco przeważały dostawy **granitów**, których udział stanowił 57–90% (wyjątkiem był 2022 r. z wynikiem zaledwie 33%, rys. 8). Skały te eksportowane były w ilości 107,9–124,1 tys. t/rok. Mniejszy udział w strukturze eksportu miały na ogół **piaskowce** (4–38%, tylko w 2022 r. wzrost do 63%), **marmury i inne skały węglanowe** (do 2%) oraz **pozostałe skały** (do 14%) – rys. 8).



Rys. 9. Główne kierunki eksportu surowych i wstępnie obrobionych granitowych materiałów kamiennych w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 9. The major exports directions of crude and roughly worked dimension granite to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

Głównym odbiorcą surowych i wstępnie obrobionych **granitów** była Szwajcaria, sprzedawano tam przede wszystkim znaczące ilości tzw. kamienia murowego (48,0–93,1 tys. t/rok; rys. 9). Jej udział w strukturze eksportu zmniejszył się jednak z ~70–80% w latach 2014–2017 do ~40% w 2023 r.

Drugim ważnym kierunkiem eksportu były Niemcy (21,5–41,0 tys. t/rok), z udziałem 19 do 36% łącznych dostaw (rys. 9). W ostatnich dwóch latach zwiększyła się wielkość eksportu do Rosji (do 22,1 tys. t/rok). Stałym odbiorcą niewielkich ilości surowych i wstępnie obrobionych elementów granitowych – na ogół kilka tys. t/rok; w 2023 r. wzrost do 16,2 tys. t/rok, były również Czechy (rys. 9).

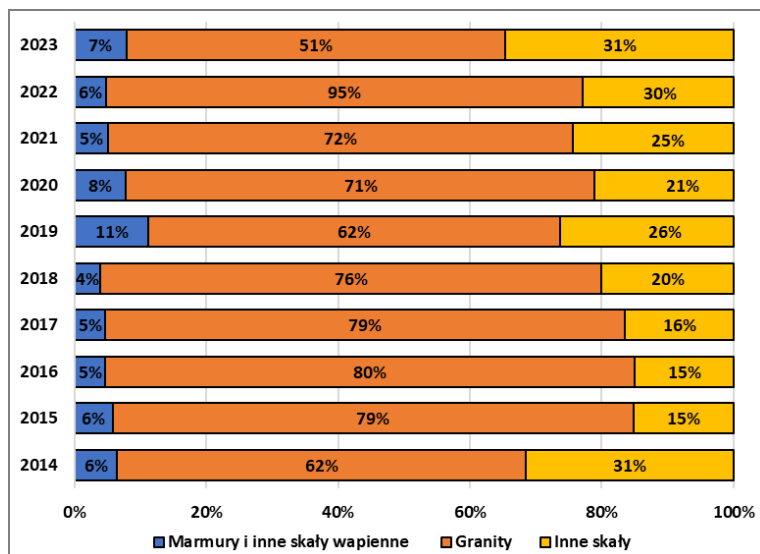
Piaskowce eksportowane były w latach 2014–2020 w ilości 5,5–15,1 tys. t/rok, a ich głównym i stałym odbiorcą pozostawały Niemcy. W latach 2020–2023 nastąpił znaczący rozwój sprzedaży tych skał do Czech, a łączne dostawy zwiększyły się w tym okresie do 52,2–214,9 tys. t/rok. Biorąc pod uwagę sumaryczną wielkość wydobycia piaskowcowych bloków i mniejszych elementów foremnych z krajowych złóż (100–140 tys. t/rok w ostatnich trzech latach) a także wielkość ich importu do

Polski wydaje się, że przedmiotem eksportu do Czech, przynajmniej częściowo, mógł być kamień łamany.

Surowe i wstępnie obrobione elementy kamienne reprezentujące pozostałe odmiany skał kierowane były głównie do krajów ościennych, w tym przede wszystkim do Czech (do 22,1 tys. t/rok elementów z innych skał i do 0,6 tys. t elementów z marmurów i innych skał węglanowych), Szwajcarii (do 2,2 tys. t/rok elementów z innych skał) oraz na Słowację (0,4–1,5 tys. t/rok elementów z marmurów i innych skał węglanowych) i Ukrainę (do 1,6 tys. t/rok elementów z marmurów i innych skał węglanowych). Łączny poziom eksportu marmurów i innych skał węglanowych nie przekraczał 2,6 tys. t/rok, a pozostałych odmian skał od 0,7 do 22,2 tys. t/rok.

3.2. MATERIAŁY KAMIENNE OBROBIONE

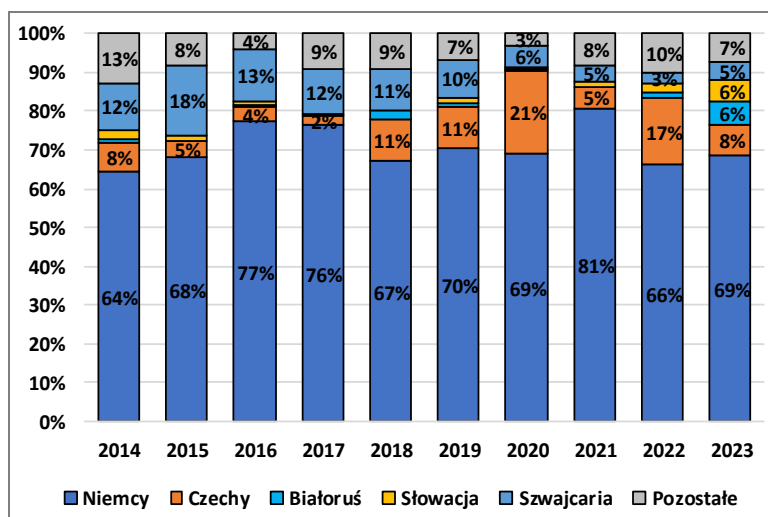
Wielkość eksportu elementów kamiennych obrobionych zmieniała się w latach 2014–2023 od 27,6 do 63,4 tys. t/rok, przeważały granity (51–95%; 21,8–45,9 tys. t/rok). W porównaniu do grupy surowych i wstępnie obrobionych bloków i płyt większy jest natomiast eksport innych skał (4,2–14,9 tys. t/rok), z udziałem od 15 do 31%. Marmury i inne skały węglanowe sprzedawane były za granicę w niewielkich ilościach, od 1,2 do 3,8 tys. t/rok (4–11% łącznych dostaw; rys. 10).



Rys. 10. Struktura eksportu obrobionych materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 10. The structure of worked dimension stone exports to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

Najważniejszym krajem – odbiorcą obrobionych elementów kamiennych z różnych odmian skał były Niemcy (53–77% wszystkich elementów); w tym 14,2–30,4 tys. t/rok elementów granitowych, do 0,5 elementów z marmurów i innych skał węglanowych i 3,6–10,5 elementów z innych skał. Niewielki poziom eksportu notowany był w przypadku innych krajów ościennych, także Szwajcarii i Austrii. W przypadku obrobionych elementów granitowych w całym analizowanym okresie zaznaczała się silna dominacja Niemiec, z udziałem 64–81% – rys. 11. Regularnymi, aczkolwiek mniejszymi ich odbiorcami były Czechy i Szwajcaria, okresowo większe dostawy kierowane były na Białoruś i Słowację (rys. 11).

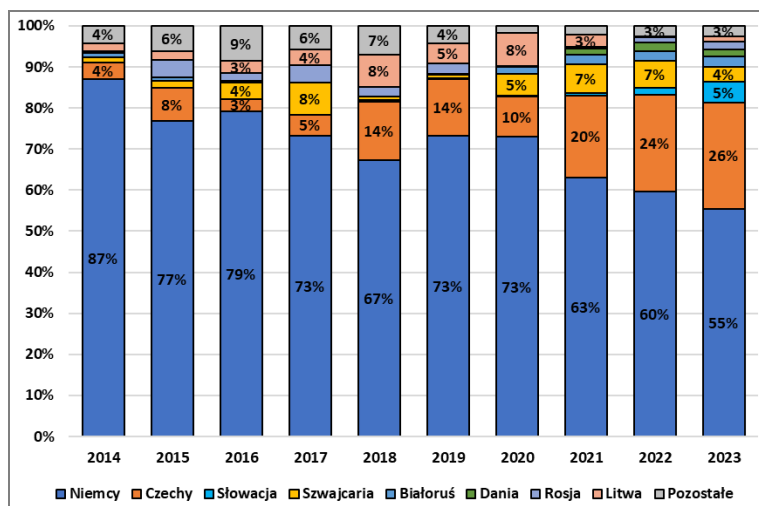


Rys. 11. Główne kierunki eksportu obrobionych granitowych materiałów kamiennych do Polski w latach 2014–2023: obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 11. The major exports directions of worked dimension granite to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

3.3. KOSTKA, KRAWĘŻNIKI I INNE KAMIEŃ DROGOWE

Kostka, krawężniki oraz inne kamienie drogowe w latach 2014–2023 eksportowane były w ilościach 38,3–78,7 tys. t/rok (rys. 12). Tradycyjnie najważniejszym odbiorcą tych materiałów były Niemcy (29,4–49,7 tys. t/rok). Jednocześnie w ostatnich trzech latach istotnie zwiększył się ich eksport do Czech (z kilku do 15,1–18,5 tys. t/rok). W gronie mniejszych odbiorców tych elementów kamiennych – maksymalnie kilka tys. t/rok, znalazły się ponadto m.in.: Słowacja, Szwajcaria, Białoruś, Dania, Rosja, Litwa, Łotwa i Austria.



Rys. 12. Główne kierunki eksportu kostki, krawężników i pozostałych kamieni drogowych do Polski w latach 2014–2023; obliczenia własne na podstawie [2, 3]

Fig. 12. The major exports directions of paver, curbs and other road stones to Poland in the years 2014–2023; own calculations based on [2, 3]

4. SALDO OBROTÓW

Saldo obrotów dla analizowanych grup materiałów kamiennych było ujemne niemal przez cały analizowany okres. Największy deficyt, między 226 a 380 mln PLN, notowany był w grupie obrobionych elementów kamiennych. Nieco mniejszy, rzędu 78–218 mln PLN, stwierdzono w przypadku bloków i płyt kamiennych surowych i wstępnie obrobionych. Wartości ujemne miało też na ogół saldo obrotów kostką, krawężnikami i innymi kamieniami drogowymi (deficyt do 17 mln PLN), aczkolwiek okresowo jego wartość była dodatnia. Nadwyżka w handlu tymi materiałami (5–25 mln PLN) notowana w latach 2021–2022 spowodowana była wzrostem wolumenu ich sprzedaży do Niemiec i Czech [2, 3].

5. WARTOŚCI JEDNOSTKOWE IMPORTU I EKSPORTU

Spośród analizowanych odmian skał najwyższe średnie wartości jednostkowe importu i eksportu notowane były w latach 2014–2023 w przypadku surowych i wstępnie obrobionych marmurów i innych skał węglanowych (tab. 2). Dla materiałów kamiennych importowanych nie przekraczały one 3,0 tys. PLN/t, a dla kamieni eksportowanych sięgały nawet 15 tys. PLN/t. Tak wysokie wartości jednostkowe związane są m.in. z niewielkim poziomem obrotów tymi surowcami.

Średnie wartości jednostkowe importowanych surowych i wstępnie elementów granitowych nie przekraczały 1,5 tys. PLN/t (tab. 2). Są one zróżnicowane w zależności od kierunku dostaw (0,9–2,1 tys. PLN/t z Indii; 0,9–1,6 tys. PLN/t z RPA), ale generalnie kształtują się na zdecydowanie wyższym poziomie w porównaniu do wartości jednostkowych eksportu, których średnia wartość nie przekraczała 0,6 tys. PLN/t (0,3–0,5 tys. PLN/t do Niemiec; 0,4–0,8 tys. PLN/t do Szwajcarii).

Średnie wartości jednostkowe importu i eksportu surowych lub wstępnie obrobionych piaskowców oraz pozostałych skał wykazywały znaczną zmienność. Stosunkowo wysokie były średnie wartości jednostkowe importu piaskowców, pomimo obserwowanej tendencji spadkowej (tab. 2). Z kolei bardzo niskie średnie wartości jednostkowe notowane były w ostatnich trzech latach, na co wpływ miały przede wszystkim wartości sprzedaży do Czech (30–40 PLN/t). Z tego względu wnioskować można, że przedmiotem eksportu było raczej kruszywo, a nie bloki i płyty kamienne.

Zarówno średnie wartości jednostkowe importu, jak i eksportu kostki, krawężników i innych kamieni drogowych wzrosły w analizowanym okresie czasu. Pierwsze z nich były na ogół niemal dwukrotnie wyższe od drugich, jednak ostatnio te różnice zaczynają się zmniejszać (tab. 2).

Tabela 2. Średnie wartości jednostkowe importu i eksportu kamieni budowlanych i blocznych w latach 2014–2023 (PLN/t)

Table 2. An average unit values of building and block stones imports and exports in the years 2014–2023 (PLN/ton)

Rodzaj kopaliny	2014	2016	2018	2020	2022	2023	Zmiana 2014–2023, %
Marmury i inne skały węglanowe surowce lub wstępnie obrobione							
Import	710	1 886	2 073	2 916	1 060	1 450	+104
Eksport	5 404	1 026	1 296	5 105	5 936	14 817	+174
Granity surowe lub wstępnie obrobione							
Import	812	435	980	1 086	1 419	1 336	+65
Eksport	386	443	423	405	546	515	+33
Piaskowce surowe lub wstępnie obrobione							
Import	2 093	1 039	1 206	1 050	1 628	1 231	–41
Eksport	817	895	630	539	57	56	–93
Pozostałe skały surowe lub wstępnie obrobione							
Import	218	422	1 586	222	81	60	–72
Eksport	60	433	34	64	107	206	+243
Kostka, krawężniki i inne kamienie drogowe							
Import	548	517	514	567	1 032	671	+22
Eksport	294	299	448	402	552	599	+104

Źródło: [2, 3] i obliczenia własne.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W strukturze importu materiałów kamiennych do Polski dominują surowe i wstępnie obrobione bloki i płyty oraz materiały kamienne obrobione, chociaż wielkość dostaw tych drugich od 2020 r. została znacznie ograniczona. Zdecydowanie mniejszy udział w strukturze importu mają kostka, krawężniki i inne kamienie drogowe. Przedmiotem eksportu są natomiast przede wszystkim surowe i wstępnie obrobione bloki i płyty, przy znacznie mniejszym udziale elementów obrobionych oraz kostki, krawężników i kamieni drogowych.

Najważniejszymi użytkowanymi w Polsce elementami kamiennymi są granity. Zapotrzebowanie na te materiały pokrywane jest w przewadze ze źródeł krajowych, a podrzędnie importem. Jego udział został w analizowanym okresie ograniczony z ~30 do 20%. Główne kierunki dostaw to: dla bloków i surowych płyt Indie i RPA, a w przypadku elementów obrobionych Chiny (choć udział dostaw z tego kraju w ostatnich czterech latach znacząco się zmniejszył). Jednocześnie nastąpił wzrost dostaw elementów obrobionych z Indii, a w 2021 r. okresowo zwiększyły się również dostawy z Portugalii (do kilkunastu tys. t/rok). Miało to związek z ograniczoną dostępnością chińskich bloków granitowych na skutek pandemii koronawirusa. Zaburzenia łańcuchów dostaw wynikały m.in. z problemów z transportem i ograniczoną przepustowością w portach kontenerowych. Niedobory na rynku granitowych materiałów kamiennych rekompensowane były częściowo wzrostem wielkości wydobywania bloków z krajowych złóż, które od 2021 r. znacząco wzrosło.

Granity są również przedmiotem eksportu, głównie w formie surowych i wstępnie obrobionych płyt, a ich najwięksi odbiorcy to Szwajcaria, Niemcy, a ostatnio również Rosja i Czechy. Ważną grupą skał użytkowanych w Polsce w formie różnego rodzaju materiałów kamiennych są piaskowce. W odróżnieniu od granitów, skały te pochodzą głównie z krajowych złóż a udział ich importu w łącznym krajowym zużyciu nie przekracza 1%. Sprowadzane do Polski były niewielkie ilości surowych i wstępnie obrobionych bloków piaskowców indyjskich, a okresowo również niemieckich i ukraińskich. Eksport w całym analizowanym okresie utrzymywał się na wyższym poziomie w porównaniu z importem. W ostatnich trzech latach jego wielkość istotnie wzrosła (do poziomu 50–215 tys. t/rok), co może wskazywać, że przedmiotem eksportu był prawdopodobnie kamień łamany. Głównym odbiorcą piaskowcowych materiałów kamiennych były tradycyjnie Niemcy, a od 2021 r. większość dostaw kierowana jest do Czech.

W związku z marginalną ilością wydobywanych w kraju marmurów i innych skał węglanowych zapotrzebowanie na ten rodzaj materiałów pokrywane jest importem, sprowadzanych głównie elementów obrobionych. Systematyczny spadek wielkości dostaw – z ponad 21 do zaledwie 11–15 tys. t/rok (2018–2023), świadczy o coraz mniejszym zainteresowaniu tymi materiałami na krajowym rynku. Głównymi dostawcami: Turcja, Chiny, Indie, Włochy, Niemcy, Wietnam i Czechy. Poziom eksportu tego rodzaju wyrobów był marginalny.

Krajowe zużycie kostki, krawężników, płyt chodnikowych i innych kamieni drogowych bazuje głównie na produkcji krajowej, a udział importu na ogół nie przekracza kilkanaście procent. Wielkość importu kostki i innych kamieni drogowych kształtowała się w analizowanym okresie na poziomie 25–63 tys. t/rok. Chiny zapewniały na ogół ponad połowę, a w 2023 r. nawet ~86% łącznych dostaw. W latach 2021–2022 wielkość dostaw z tego kraju została mocno ograniczona, skutkując wzrostem krajowej produkcji. Jednocześnie obserwowany był wzrost wielkości eksportu – w latach 2014–2021 utrzymywał się na poziomie 38–63 tys. t/rok, a w 2021–2022 zwiększył się do ~80 tys. t/rok. Spowodowane było to zarówno zwiększeniem sprzedaży do największego zagranicznego odbiorcy wytwarzanej w Polsce kostki, krawężników i innych kamieni drogowych – Niemiec, a dodatkowo znaczącym wzrostem eksportu do Czech. W handlu zagranicznym kamieniami budowlanymi i blocznymi notowany jest na ogół trwały deficyt i tylko w przypadku kostki, krawężników i pozostałych kamieni saldo obrotów było okresowo dodatnie (lata 2021–2022).

Wartości jednostkowe importu i eksportu analizowanych materiałów wykazują znaczną zmienność i na ogół są one zdecydowanie wyższe w przypadku materiałów importowanych. Nasuwa się zatem wniosek, że należałoby w większym stopniu wykorzystywać krajowy potencjał zasobowy. W szczególności dotyczy to krajowych granitów wydobywanych w masywie Strzegom-Sobótka, które mogłyby przynajmniej częściowo zastąpić sprowadzane w znacznej ilości elementów, jak kostka, krawężniki czy płyty chodnikowe.

LITERATURA

- [1] *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2023 r.*, Wyd. PIG-PIB, Warszawa 2024 i wcześniejsze wyd.
- [2] *Dane statystyczne w zakresie produkcji, eksportu i importu kruszyw łamanych*, GUS.
- [3] *Gospodarka surowcami mineralnymi w Polsce w latach 2014–2023*, [w:] E. Lewicka, A. Burkowicz (red.), Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2024 i wcześniejsze wyd., ss. 394.
- [4] GALOS K., *Evolution of domestic market of dimension and road stone since 1990*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Kraków, 2002, t. 18, z. 4, 71–83.
- [5] GUZIK K., FIGARSKA-WARCHOŁ B., 2023. *The management of dimension stones in Poland in the years 2011–2021*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, Kraków, t. 39, z. 1, s. 87–107. DOI: 10.24425/gsm.2023.144635
- [7] GUZIK K., GALOS K., 2020. *Wystarczalność zasobów kamieni łamanych i blocznych w Polsce*, [w:] W. Głapa (red.), *Kruszywa Mineralne* t. 4, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2022, 55–68.
- [8] GUZIK K., KOT-NIEWIADOMSKA A., *Środowiskowe ograniczenia eksploatacji złóż kamieni blocznych w Sudetach i Górach Świętokrzyskich*. Zeszyty Nauk. IGSMiE PAN, Kraków, 2015, 91, 67–80.
- [9] GUZIK K., SMAKOWSKI T., 2015. *Kamienie budowlane i drogowe*. [w:] T. Smakowski, K. Galos, E. Lewicka (red.) *Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata 2013*, Wyd. PIG-PIB, Warszawa 2015.

FOREIGN TRADE IN CONSTRUCTION AND BLOCK STONES IN POLAND
IN THE YEARS 2014–2023

The article presents the results of analyses of foreign trade in building and road stones in Poland. For three groups of products, i.e.: raw and crude and roughly worked blocks and slabs, worked dimension stone as well as pitchers and other road stones (e.g., curbs, pavement slabs), data on the structure, volume and directions of import and export are presented. The value of trade in these raw materials and the unit values of their import and export are also analyzed. In the case of both processed and crude and roughly processed dimension stones, data are presented separately for all varieties of rocks that are the subject of trade.

Urszula KAŻMIERCZAK

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

REWITALIZACJA TERENÓW POGÓRNICZYCH W KONTEKŚCIE DOBRYCH PRAKTYK

Podniesienie jakości życia oparte jest przede wszystkim na surowcach mineralnych bowiem są one siłą napędową rozwoju społeczno-gospodarczego. To wykorzystanie surowców wiąże się z wpływem na środowisko. Branża górnicza zauważa to oddziaływanie i dlatego w ramach koncepcji społecznej odpowiedzialności biznesu (SCR – Corporate Social Responsibility) stara się przedstawić swoją ingerencję w środowisko przyrodnicze jako przemijającą w czasie (po wyczerpaniu złożeń). Dowodami na tak postawioną tezę są zrekultywowane tereny pogórnice, które bardzo często stanowią atrakcyjne tereny, zarówno dla społeczeństwa, ekologów a także przemysłu. Niniejsza publikacja zwraca uwagę na takie tereny pokazując możliwości górnictwa w aspekcie nowych funkcji jakie takie obszary mogą pełnić.

1. WPROWADZENIE

Tereny poeksploatacyjne posiadają niezwykle duży potencjał związany z możliwościami ich rewitalizacji. Bowiem po przeprowadzeniu tego procesu mogą wnosić do środowiska i życia społecznego nowe wartości przyrodnicze, naukowe, rekreacyjne a nawet kulturowe. Takie obszary są chętnie odwiedzane przez społeczeństwo i mogą stanowić ważny argument w dyskusji dotyczącej wpływu górnictwa na środowisko. Wpływu, który powinien być traktowany jako przemijający w czasie (po wydobyciu kopaliny ze złoża) ponieważ w efekcie końcowym przedsiębiorstwa górnicze po eksploatacji złóż pozostawiają różnorodne i atrakcyjne tereny wykorzystywane w rozmaity sposób: przyrodniczy, sportowy, rekreacyjny, artystyczny czy gospodarczy. Z tego względu propagowanie interesujących przykładów z rewitalizacji i zagospodarowania terenów pogórnich zasługuje na szczególne miejsce w literaturze przedmiotu ze względu na filar komunikacji między przemysłem górniczym a społeczeństwem, które ciągle nie akceptuje branży górniczej. Taki dialog ze społeczeństwem powinien dobywać się na zasadzie przedstawiania dobrych praktyk z rewitalizacji terenów pogórnich. Dobre praktyki bowiem są to wzorcowe rozwiązania, które przynoszą bardzo dobre rezultaty, posiadają potencjał innowacji a przede wszystkim są trwałe i mają możliwość inspirowania

acji, powtarzalności oraz implementacji w podobnych warunkach lub innym miejscu [1, 2].

Niniejsza publikacja jest kontynuacją wcześniejszych prac [3–5], mającą na celu wskazanie kolejnych rozwiązań, które mogą stanowić inspirację do ciekawych form rewitalizacji i zagospodarowania terenów po eksploatacji surowców skalnych.

2. DOBRE PRAKTYKI W REKUTLYWACJI TERENÓW POGÓRNICZYCH

2.1. SZTUKA W DZIAŁALNOŚCI GÓRNICZEJ

Idea przedstawianego przykładu dobrych praktyk wzrastała wraz z rozwojem koncepcji Land Art., sztuki wychodzącej poza galerie i przestrzeń kreowaną przez człowieka. Koncepcja ta miała stanowić formę uzupełniającą krajobraz i dorównującą tworam natury, które podobnie jak ona ulegają przekształceniom i degradacji.

Robert Smithson jako pierwszy spojrzął na kopalnię jako obiekt o przestrzeni artystycznej i w efekcie w 1971 r. w kopalni firmy DE Boer w Emmen (Dania) powstały dwa obiekty zatytułowane „Broken Circle” i „Spiral Hill”. Są to dwa elementy dopełniające się w krajobrazie, które stanowią mikrokosmos, odzwierciedlający tragiczną powódź w Zelandii w 1953 r. Dodatkowo dzieło to nawiązuje do megalitycznych rzeźb geologicznych [6].

„Spiral Hill” to usypane z ziemi wzgórze, na które wchodzi się spiralnie ukształtowaną ścieżką. To wzgórze stanowi naturalny punkt obserwacyjny dla wyłaniającego się ze zbiornika eksploatacyjnego betonowego obiektu w formie niepełnego koła (Broken Circle). W centrum tego koła umiejscowiono naturalny głąz.

Artysta poprzez tą instalację chciał podkreślić koncepcję sztuki jako nieustannego rozwoju. To dzieło bowiem cały czas ulega zmianom, podobnie jak otaczające środowisko. Na wzgórze wstąpiła sukcesja naturalna, a betonowy obiekt jest powoli zatapiany ze względu na podnoszący się poziom wody w zbiorniku, z którego wydobywane było kruszywo [6].

Jako dobrą praktykę oraz inspirację do rewitalizacji terenów po eksploatacji górnictwa skalnego można potraktować zagospodarowanie terenów po eksploatacji torfów Sculpture in the Parklands w Irlandii o powierzchni 40 ha. Jest to projekt bliski sztuki ekologicznej Ecological Art. (Eco Art.). Celem tego nurtu jest wskazanie możliwości odwrócenia negatywnych skutków działalności człowieka.

W 2002 r. na tym obszarze odbyło się międzynarodowe Sympozjum rzeźbiarskie Lough Bora. Na to sympozjum zaproszono artystów z różnych stron świata do tworzenia wielkoformatowych dzieł sztuki w krajobrazie przekształconym przez górnictwo w celu budowania świadomości sztuki w społeczności, a także udokumentowania działalności górniczej. Istotne jest tutaj to, że do wytworzenia rzeźb czy instalacji

artyści wykorzystali elementy wyposażenia, które znajdowały się na terenie dawnej kopalni. W ramach tej inicjatywy w 2002 r. powstało 8 obiektów, a obecnie jest 24. Bowiem co roku zapraszani są kolejni artyści, którzy tworzą nowe rzeźby. Aktualnie ten teren jest obiektem turystycznym z elementami rekreacji, otwartą galerią rzeźby. Obiekty, które powstały w 2002 r., to m.in. [7]:

Sky Train (Michael Bulfin) – umieszczone w płaszczyźnie tęczowej krzywej lokomotywy i wagonów, wykorzystywanych do transportu torfu. Tak przedstawiony pociąg ma wznosić się do nieba. Koła pociągu natomiast zostały umieszczone na skarpie, by obserwować przez nie światło słoneczne.

Boora Pyramid (Eileen MacDonagh) – piramida o szerokości 8 i wysokości 6 m, posiada bardzo stabilną konstrukcję i odnosi się do danych czasów i kultur.

60 Degrees (Kewin O'Dwyer) – trzy trójkątne formy, z których dwie zewnętrzne wykonane są z drewna torfowego a środkowa z torów kolejowych, podkładów i blachy ze stali nierdzewnej. Drewniane formy mają nawiązywać do działalności przemysłowej na tym obszarze, a stal odnosi się do nowego wykorzystanie tego terenu w formie rekreacyjnej i społecznej.

Trippler Brege (Kewin O'Dwyer) – wykorzystanie wywrotnicy do rozładunku torfu jako mostu, schronienia dla ptactwa oraz punkt widokowy na otaczający krajobraz.

Lough Boora (John Ronnau) – przestrzeń do medytacji zbudowana wokół żelaznej bramy. Wykorzystano tutaj kawałki drewna bagiennego, które tworzą nieco przezroczyste ściany. Wewnątrz znajduje się cisowe siedzisko.

A Tree (Naomi Seki) – rzeźba ma 8 m wysokości, 2,7 m szerokości i 5,6 m głębokości i porównuje to, co stworzone naturalnie i przez człowieka.

Raised Line (Maurice MacDonagh) – 100 m szyna wznosząca się ok. 1 m nad ziemią, odnosząc się do drogi jaką był transportowany torf.

2.2. INTERCONTINENTAL SHANGHAI WONDERLAND

Inter Continental Shanghai Wonderland – hotel, park rozrywki i centrum kongresowe na terenie Narodowego Parku Turystyki Sheshan w miejscowości Sogjang. Hotel otworzono w 2018 r. i jest wkomponowany w ścianę kamieniołomu, którego eksploatację zakończono w 2000 r., a jego głębokość sięga 100 m. Hotel ma 17 pięter, jedno nad powierzchnią terenu, a pozostałe 16 pod powierzchnią terenu. Najniższe poziomy przeznaczone są do obsługi sportów wodnych, basenów, spa, podwodnej restauracji itp. Na wyższych poziomach znajdują się: centrum sportów ekstremalnych oraz pokoje hotelowe.

Nad powierzchnią terenu jest hol wejściowy, centrum konferencyjno-bankietowe, a także kilka restauracji z widokami na kamieniołom. Bardzo spektakularnym aspektem tego hotelu jest atrium łączące poziomy budynku. Jest to 16-metrowa szklana ściana, która ma imitować wodospad. Na terenie obiektu znajduje się także szklany chodnik

wychodzący z klifu kamieniołomu. Co istotne, hotel zasilany jest energią z wód geotermalnych i paneli słonecznych [7].

2.3. PARK GŁAZÓW NARZUTOWYCH

Idea stworzenia parku pojawiła się w latach 90. XX w., a powstał w 2004 r. w Nochten (Niemcy) – rys. 1, 2. Został założony przez geologa pracującego w pobliskiej kopalni węgla brunatnego [8]. Kopalnię oraz blisko położoną elektrownię można zaobserwować, przechadzając się po ścieżkach parku (rys. 3, 4).

W parku o powierzchni 20 ha zlokalizowano 7000 głazów wśród pięknej roślinności. W budynku „Centrum” zlokalizowano wystawę pt. „Mroźna, olbrzymi, ekscytująca, przygoda z lodowcem”, która objaśnia, w jaki sposób głazy narzutowe pojawiły się w Łużycach. W centralnej części parku znajduje się ogród skalny, a ze szczytu można obserwować cały park. Interesującym akcentem szczytu parku jest artystyczny pomnik symbolizujący lodowiec skandynawski.



Rys. 1. Park Głazów Narzutowych – widok na wjazd i budynek edukacyjny (po lewej) oraz widok na kopalnię w oddali (po prawej)

Fig. 1. The Erratic Boulder Park – view of the entrance and education building (left) and of the mine in the distance (right)



Rys. 2. Park Głazów Narzutowych – widok na zbiornik wodny

Fig. 2. The Erratic Boulder Park – view of the reservoir



Rys. 3. Park Głazów Narzutowych – widok na elektrownię

Fig. 3. The Erratic Boulder Park – view of the power station

Park to także ciekawe miejsce dydaktyczne – przechadzając się po ścieżce edukacyjnej z tablic informacyjnych można dowiedzieć się wielu ciekawostek o botanice i geologii. W parku znajduje się 7 malowniczych ogrodów tematycznych: „Skalniak”, „Ogród nad stawem”, „Wrzosowisko” – 130 odmian wrzosów, „Torfowisko”, „Leśne jezioro”, „Stepy” oraz „Mała Skandynawia”. Roślinność utworzono w taki sposób aby o każdej porze roku można było zobaczyć kwitnące rośliny, a w nieco ukrytej dolinie leży tzw. „Pustynia” – plac zabaw dla dzieci, gdzie w piaskownicy ukryte są „skarby”, które można zabrać do domu [8].

Park otwarty jest od 15 marca do 15 listopada i co ciekawe, utrzymuje się jedynie z biletów wstępu.



Rys. 4. Park Głazów Narzutowych – widok ogólny

Fig. 4. The Erratic Boulder Park – general view

3. PODSUMOWANIE

Przedstawione przykłady rewitalizacji terenów pogórnich pokazują niezwykle potencjał, jaki kryją tereny poeksploatacyjne. Są to obszary zarówno o potencjale kulturalnym, jak i rekreacyjnym, biznesowym, a także przyrodniczym. Oczywiście możliwości jest jeszcze więcej, co trudno jest przedstawić w jednej publikacji. Jednakże propagowanie wpływu działalności górniczej może przyczynić się do łagodniejszego odbioru wpływów górnictwa przez społeczeństwo. Istotne jest jeszcze to, że takie lub podobne zagospodarowanie terenów pogórnich może być inspiracją do działań innych przedsiębiorstw w branży przemysłowej.

LITERATURA

- [1] KARWIŃSKA A., WIKTOR D., *Przedsiębiorczość i korzyści społeczne: identyfikacja dobrych praktyk w ekonomii społecznej*, *Ekonomia Społeczna Teksty*, UE w Krakowie, Kraków 2008, vol. 6, 25.
- [2] BRAJER-MARCZAK R., *Dobre praktyki w doskonaleniu procesów biznesowych*, *Studia Informatica Pomerania*, 2017, vol. 1, 43, 15–25, DOI: 10.18276/si.2017.43-02.
- [3] KAŻMIERCZAK U., LORENC M.W., MAREK P., RAJCAKOWSKA D., *Examples of good practices in the reclamation and use of abandoned quarries*, *Geoheritage* 2024, vol. 16, art. 32, 1–16, DOI:10.1007/s12371-024-00934-0.
- [4] KAŻMIERCZAK U., LORENC M.W., *Rewitalizacja terenów w górnictwie surowców skalnych*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 7, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2024, 95–112.
- [5] KAŻMIERCZAK U., LORENC M.W., MAREK P., RAJCAKOWSKA D., *Dobre praktyki w rekultywacji terenów poeksploatacyjnych*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 6, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2023, 29–44.
- [6] <https://holtsmithsonfoundation.org/broken-circle-spiral-hill>
- [7] <http://skosnymokiem.wordpress.com/2012/04/05/luksusowy-hotel-w-kamieniolomie>
- [8] <https://www.findlingspark-nochten.d>

REVITALISATION OF POST-MINING AREAS IN THE GOOD PRACTICE CONTEXT

The improvement of the quality of life is based primarily on mineral resources as they are the driving force behind socio-economic development. This use of raw materials is related to environmental impact. The mining industry recognises this impact and therefore, within the framework of the concept of Corporate Social Responsibility (SCR). It thus seeks to portray its interference with the natural environment as transient in time (once the deposit is exploited). Evidence for this can be found in reclaimed mining areas, which are very often attractive areas for society, ecologists and industry alike. This publication draws attention to such areas, showing the possibilities of mining in terms of new functions that such areas can fulfil.

Łukasz MACHNIAK¹
Konrad SŁOWIŃSKI²

¹ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

² Polski Związek Producentów Kruszyw, Kielce

PRZEGLĄD AKTUALNEJ LEGISLACJI UE WRAZ Z OCENĄ POTENCJALNEGO WPŁYWU NA PROWADZENIE DZIAŁALNOŚCI PRODUCENTÓW KRUSZYW

Legislacja Unii Europejskiej jest istotną częścią funkcjonowania każdego państwa członkowskiego. W artykule przedstawiono przepisy wybranych rozporządzeń UE: odbudowy zasobów przyrodniczych, monitorowania jakości gleby oraz dyrektywy w sprawie wyrobów budowlanych, które mogą mieć istotny wpływ na funkcjonowanie branży kruszyw.

1. WPROWADZENIE

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej wiązało się z dużymi oczekiwaniami. Widoczna była przede wszystkim szansa na poprawę i przyspieszenie zachodzących w kraju przemian gospodarczych [1]. Oczywiście było, że dołączenie do tych struktur będzie związane z koniecznością dostosowania polskiego prawa do nowej rzeczywistości – jako część europejskiej wspólnoty. Zgodnie z art. 17 ust. 1 Traktatu o Unii Europejskiej, państwa członkowskie zobowiązane są do przestrzegania prawa UE, a za nadzór nad jego stosowaniem odpowiada Komisja Europejska [2]. W związku z tym istnieje realna potrzeba wdrażania tego prawa oraz zmierzenia się z jego potencjalnymi skutkami w przyszłości. W niniejszym artykule skupiono się nad wybranymi aktami prawnymi, które mogą mieć znaczący wpływ na funkcjonowanie branży kruszyw:

- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie odbudowy zasobów przyrodniczych (Nature Restoration Law), mającym na celu odbudowę ekosystemów lądowych i morskich na terenie UE,
- Unijna Dyrektywa o monitorowaniu jakości gleby (Soil Monitoring Law),
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE w sprawie wyrobów budowlanych „Nowy CPR”.

2. ODBUDOWA ZASOBÓW PRZYRODNICZYCH (NATURE RESTORATION LAW)

Rozporządzenie o odbudowie zasobów przyrodniczych zostało przyjęte po długich negocjacjach 17.06.2024 r. Jest częścią europejskiej strategii odbudowy bioróżnorodności. Szacuje się, że ok. 80% ekosystemów na terenie UE znajduje się obecnie w złym stanie. Rozporządzenie ustanawia przepisy, które mają przyczynić się do:

- długoterminowej i trwałej odbudowy różnorodnych biologicznie i odpornych ekosystemów na obszarach lądowych i morskich państw członkowskich poprzez odbudowę zdegradowanych ekosystemów,
- osiągnięcia nadrzędnych celów dotyczących łagodzenia zmiany klimatu, przystosowywania się do niej oraz neutralności degradacji gruntów,
- poprawy bezpieczeństwa żywnościowego,
- wypełniania międzynarodowych zobowiązań Unii [3].

Mimo że w dokumencie nie ma wprost odniesienia do konieczności ograniczenia eksploatacji kopalin, to bez wątpienia będzie on miał wpływ na sposób jej prowadzenia. Eksploatacja wiąże się z funkcjonowaniem w środowisku naturalnym, a przepisy tego dokumentu mogą doprowadzić do zaostrzenia regulacji, szczególnie w zakresie ochrony wód oraz gleby. Może to w niedalekiej przyszłości spowodować problemy z pozyskiwaniem nowych koncesji lub rozszerzaniem istniejących.

Szczególnie trudna sytuacja będzie miała miejsce w obszarach uznanych za szczególnie cenne pod względem bioróżnorodności, jak Natura 2000, parki narodowe czy inne tereny uznane przez ustawodawców krajowych za miejsca o szczególnych walorach przyrodniczych. O ile prowadzenie działalności górniczej w parkach narodowych jest zasadniczo niemożliwe, o tyle na obszarach Natura 2000 działalność ta jest wciąż możliwa. Nowe przepisy ustawy mogą jednak utrudnić tę działalność, a uzyskiwanie koncesji na działalność górniczą stanie się jeszcze bardziej problematyczne.

Biorąc pod uwagę fakt, że znaczna część Polski jest objęta różnymi formami ochrony przyrody, nowe regulacje nałożą kolejne uwarunkowania w dziedzinie prowadzenia działalności górniczej. Może to również skutkować wyłączeniem części złóż z eksploatacji, co jeszcze bardziej uszczupli już i tak ograniczoną bazę surowcową Polski [4].

Dokument pomija fakt, że realizowanie działalności górniczej, mimo istotnego wpływu na środowisko, ma charakter tymczasowy. Doświadczenia z poprzednich lat pokazują, że możliwe jest odtworzenie – choć odmienne, a czasami bardziej różnorodnego środowiska, które staje się schronieniem dla wielu gatunków rzadkich roślin i zwierząt. A co za tym idzie, istnieje możliwość odzyskania równowagi ekologicznej po zakończeniu działalności górniczej. Tym bardziej, że rekultywacja wyrobisk po górniczych może być skutecznym sposobem zarówno na zachowanie, jak i na poprawienie bioróżnorodności [5].

3. DYREKTYWA O MONITOROWANIU JAKOŚCI GLEBY (SOIL MONITORING LAW)

Dyrektywa ta, choć jeszcze nie ma mocy prawnej, będzie dotyczyć ochrony zasobów glebowych Unii Europejskiej. Według szacunków podawanych przez Komisję Europejską, ok. 60–70% gleb znajduje się w złym stanie, a zubożenie oraz zanieczyszczenie gleby kosztują wspólnotę łącznie 50 bln € rocznie. Z założenia dyrektywa, będąca częścią europejskiej strategii ochrony gleby, ma przyczynić się do: zatrzymanie stepowania, ochronę zasobów organicznych węgla, zmniejszenie zanieczyszczenia gleby, zapobieganie erozji, oraz poprawę struktury gleby, oprawę bioróżnorodności gleby, zwiększenie bezpieczeństwa żywnościowego, redukcję wpływu UE na stan gleb [6].

Dokument nałoży na państwa członkowskie obowiązek monitorowania, jakości oraz stanu gleb, co bez wątpienia zostanie przełożone na przedsiębiorców prowadzących działalność gospodarczą. Aby dostosować się do nowych przepisów, będą oni obciążeni dodatkowymi kosztami związanymi z przeprowadzaniem bardziej szczegółowych pomiarów oraz koniecznością realizacji kosztownych programów mających na celu niwelowanie ewentualnych negatywnych skutków działalności. W wyniku podwyższenia standardów, przedsiębiorcy będą musieli bardzo dokładnie wykazać brak wpływu ich działalności na stan gleby.

Dyrektywa wprost kategoryzuje działalność górnictwą, jako szkodliwą dla gleby, stwierdzając, że taka aktywność prowadzi do trwałego, a czasami także tymczasowego zniszczenia gleby. Takie stwierdzenie będzie miało wpływ na planowanie przestrzenne i może doprowadzić do jeszcze większych trudności w pozyskiwaniu nowych gruntów pod działalność górnictwą.

4. ROZPORZĄDZENIE W SPRAWIE WYROBÓW BUDOWLANYCH (NOWY CPR)

Rozporządzenie znane pod nazwą „nowy CPR” lub „CPR 2.0” obowiązuje od 7.01.2025 r., jednak większość jego artykułów wejdzie w życie dopiero w 2026 r., dokładnie w rok po jego ustanowieniu. Jest to nowelizacja rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) z 2011 r. [7], określająca zasady wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych objętych zharmonizowaną normą lub posiadających wydaną europejską ocenę techniczną. Wyroby te oznaczane są znakiem „CE” i konieczne jest sporządzanie dla nich deklaracji właściwości użytkowych. Celem rewizji rozporządzenia była poprawa rynku wewnętrznego wyrobów budowlanych oraz zwiększenie świadomości o wpływie tych wyrobów na środowisko. Wśród głównych wad poprzedniego rozporządzenia 305/2011 (CPR) wymienia się [8]:

- problemy z wdrażaniem rozporządzenia CPR na poziomie krajowym, w tym związane z różnym poziomem nadzoru nad rynkiem w państwach członkowskich,
- brak właściwego zrozumienia znaczenia oznakowania CE czy procedur uproszczonych przez uczestników rynku,
- potencjalną kolizyjność z innymi przepisami UE, w tym z dyrektywą w sprawie ekoprojektu,
- brak uwzględnienia priorytetu cyfrowej i ekologicznej transformacji sektora budowlanego UE oraz zagadnień związanych z bezpieczeństwem wyrobów.

Według definicji, kruszywo jest również wyrobem budowlanym. Dlatego bez wątpienia Nowy CPR dotknie także i branżę wydobywczą, nowe rozporządzenie ma z założenia niejako odblokować potencjał sektora budowlanego, zwiększyć jego konkurencyjność, digitalizację oraz zrównoważoną produkcję i jego wykorzystanie do obiektów budowlanych. Wśród najważniejszych zmian należy wymienić:

- zmianę deklaracji właściwości użytkowych (DWU) na deklarację właściwości użytkowych i zgodności (DWUiZ),
- DWUiZ będzie wymagała również określania równoważenia środowiskowe wyrobu w całym jego cyklu życia w odniesieniu do z góry ustalonych charakterystyk środowiskowych, równoważenia środowiskowe wyrobu w całym jego cyklu życia w odniesieniu do z góry ustalonych charakterystyk środowiskowych,
- nowy system oceny i weryfikacji 3+, kontrola przeprowadzana przez jednostkę notyfikowaną w zakresie oceny zrównoważenia środowiskowego.
- zharmonizowane specyfikacje techniczne muszą – na ile to możliwe, obejmować zasadnicze charakterystyki związane z oceną cyklu życia:
 - skutki zmiany klimatu: ogółem (obowiązkowo), paliwa kopalne, emisje biogeniczne, użytkowanie gruntów i zmiana użytkowania,
 - zubożenie warstwy ozonowej,
 - potencjał zakwaszania,
 - eutrofizacja: wody w akwenach słodkowodnych, morskich; lądowa,
 - ozon fotochemiczny,
 - ubożenie zasobów abiotycznych – minerały, metale; paliwa kopalne,
 - zużycie wody,
 - cząstki stałe,
 - promieniowanie jonizujące, zdrowie człowieka,
 - ekotoksyczność wody słodkiej,
 - działanie toksyczne dla ludzi, rakotwórcze; inne niż rakotwórcze,
 - oddziaływanie związane z użytkowaniem gruntów [9]

W porównaniu do poprzedniego dokumentu jest sporo zmian – sam dokument jest niemal 3-krotnie obszerniejszy. Nakłada również wiele dodatkowych obowiązków na przedsiębiorcę. Szczególnie w kwestii wpływu produktu na środowisko.

5. PODSUMOWANIE

Legislacja unijna stała się istotną częścią funkcjonowania każdego państwa członkowskiego. Państwa te zobowiązane są do stosowania i przestrzegania prawa unijnego w sposób dostosowany do swoich specyficznych warunków.

Rozporządzenie o odbudowie zasobów przyrodniczych, choć nie odnosi się bezpośrednio do działalności górniczej, może negatywnie wpłynąć na rozpoczęcie lub rozszerzenie takiej działalności. Nowe przepisy bez wątpienia utrudnią funkcjonowanie zakładów górniczych, które prowadzą działalność w pobliżu obszarów chronionych. Obecnie aż 33% powierzchni Polski objęte jest różnymi formami ochrony prawnej. Pod znakiem zapytania może stać również zagospodarowanie złóż, które w niedalekiej przyszłości mogłyby zostać przedmiotem pozyskiwania kopalin.

Rozporządzenie nie uwzględnia możliwości wykorzystania zrewitalizowanych wyrobisk pogórnich, jako potencjalnych miejsc tworzenia nowych siedlisk czy rezerwatów. Górnictwo odkrywkowe powinno być traktowane, jako tymczasowa działalność niezbędna do pozyskania surowców, a sama rewitalizacja, jako „chirurgia plastyczna” krajobrazu i ekosystemu.

Bardzo często tereny po wyrobiskach tworzą bogate środowiska przyrodnicze o wysokich walorach estetycznych i krajobrazowych. Co prawda dokument dopuszcza pewne odstępstwa w zakresie działań niezbędnych do funkcjonowania państwa, jednak biorąc pod uwagę podejście do surowców skalnych, które nie są uznawane za strategiczne, trudno spodziewać się takich odstępstw.

Unijna dyrektywa o monitorowaniu jakości gleby wprost kategoryzuje działalność wydobywczą jako szkodliwą dla zasobów glebowych. Zwraca uwagę, że odkrywkowa eksploatacja prowadzi do niszczenia dużych obszarów, w tym terenów rolnych, oraz skutkuje trwałym lub tymczasowym zniszczeniem gleby. Dyrektywa nie uwzględnia jednak faktu, że większość cennego, żyznego materiału glebowego jest składowana na zwalówiskach, w celu późniejszego wykorzystania w procesie rekultywacji.

Nowe przepisy nałożą na przedsiębiorców większe obowiązki w zakresie monitorowania stanu gleb, co może wiązać się z dodatkowymi kosztami i utrudnieniami. Rygorystyczne warunki niwelowania ewentualnie powstałych szkód. Konieczne będzie wykonywanie dodatkowych ekspertyz, a co za tym idzie zostaną nałożone dodatkowe koszty. W ten sposób szczególnie dotknięte zostaną mniejsze przedsiębiorstwa górnicze.

Z kolei nowy CPR wprowadza dodatkowe obowiązki dla przedsiębiorców. Sama deklaracja zawiera łącznie 5 nowych punktów w porównaniu do obowiązującego rozporządzenia. Z uwagi jednak na długi okres przejściowy, podmioty gospodarcze będą miały wystarczająco dużo czasu na przygotowanie się do nowych wymagań. W przypadku branży kruszyw warto skupić się głównie na systemie oceny i weryfikacji 3+ oraz deklaracji DWUIZ.

Nowo wybrany skład Komisji Europejskiej w swoich priorytetach wskazał na zwiększenie konkurencyjności Europy oraz uproszczenie procesów legislacyjnych. Tymcza-

sem jednak omawiane regulacje zdają się wprowadzać szereg dodatkowych obowiązków dla przedsiębiorców. Komisja wskazała także na potrzebę wsparcia małych i średnich przedsiębiorstw. Jednakże, patrząc na wyżej wymienione dokumenty, wydaje się, że to właśnie te firmy będą obciążone najbardziej.

Konieczność korzystania ze specjalistycznej wiedzy eksperckiej oraz wprowadzanie dodatkowych obowiązków znacząco ograniczy możliwości finansowe najmniejszych producentów kruszyw. Biorąc pod uwagę słabnącą pozycję Europy na arenie międzynarodowej, warto zastanowić się, czy tak skomplikowane procesy administracyjne rzeczywiście pomogą Europie w odzyskaniu silnej pozycji na świecie.

LITERATURA

- [1] *Bilans korzyści i kosztów przystąpienia polski do Unii Europejskiej – Prezentacja wyników prac polskich ośrodków badawczych*, Urząd Komitetu Integracji Europejskiej, 2003.
- [2] *Traktat o funkcjonowaniu Unii Europejskiej*, Dz.U.2004.90.864/2.
- [3] *Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation*, (EU) 2022/869.
- [4] MACHNIAK Ł., *Wydobycie piasku i żwiru na terenach chronionych w ujęciu geoprzestrzennym*, XI Konferencja Nowoczesne Kopalnie Żwiru i Piasku, Rzeszów 2019, <https://www.kieruneksurowce.pl/konferencja,2082.html>
- [5] *NEEIP – Joint Position Paper on the Nature Restoration Law*, <https://www.aggregates-europe.eu>
- [6] *Wniosek dotyczący dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie monitorowania i odporności gleb (prawo o monitorowaniu gleb)*, Sekretariat Generalny Rady, 17.06.2024.
- [7] *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z 9.03.2011 r., ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EEG*, Dz.U.UE.L.2011.88.5.
- [8] WALL S., *Analiza propozycji dotyczącej nowego podejścia UE do harmonizacji technicznej warunków wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych*, Materiały Budowlane, 2023, nr 5, 22–25.
- [9] <https://www.kruszpol.pl/index.php/component/content/article/w-dniu-7-stycznia-2025-r.1>

A REVIEW OF CURRENT EU LEGISLATION, ALONG WITH AN ASSESSMENT OF THE POTENTIAL IMPACT ON THE OPERATIONS OF AGGREGATE PRODUCERS

When joining the European Union in 2004, it was clear that it would have an impact on the functioning of the state. With the passage of time and, consequently, the introduction of subsequent legislation, membership in the community influenced further aspects of the economic activity of member countries. The following article analyzes selected changes in EU legislation and attempts to assess its potential impact on the activities of aggregate producers. The focus was, among others, on the Regulation of the European Parliament and of the Council on the restoration of natural resources (Nature Restoration Law), aimed at restoring land and marine ecosystems in the EU. The EU directive on monitoring soil quality (Soil Monitoring Law) was also discussed, concerning the restoration and protection of soil quality for food production and the preservation of a healthy ecosystem in the EU, which is part of the European soil strategy until 2030. The new regulation of the European Parliament and the EU Council on construction products and its direct impact on aggregate producers are also described.

Jerzy MALEWSKI

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii

25 LAT OBECNOŚCI W DOROCZNYCH KONFERENCJACH „KRUSZYWA MINERALNE”

Artykuł jest rodzajem podsumowania aktywności autora w dorocznych konferencjach „Kruszywa Mineralne” organizowanych przez SITG i Politechnikę Wrocławską i poświęconych zagadnieniom teorii i praktyki przemysłu kruszyw mineralnych. Przedstawiono problemy kooperacji tego przemysłu z procesem kształcenia inżynierów górnictwa i geologii oraz roli jaką pełni ta konferencja na rzecz dydaktyki i praktyki. Przedstawiono także wkład autora w treść tej konferencji w formie referatów, wymienionych tu jako elementy pewnego systemu ogólniejszej wiedzy w zakresie zarządzania produkcją w górnictwie kruszywowym.

1. WSTĘP

Ćwierć wieku obecności konferencji w przestrzeni gospodarczej Polski jest niewątpliwie sukcesem organizacyjnym Politechniki Wrocławskiej i Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa. Jest też cennym wkładem w budowę społeczeństwa wiedzy przez uczestnictwo w kształceniu kadr dla tego przemysłu, czyli kształtowaniu kultury naukowo-technicznej w szeroko rozumianej produkcji mineralnej.

W przeszłości współpraca przemysłu z uczelnią techniczną była potrzebna głównie z powodu planowania zdolności produkcyjnej instalacji kopalnianych. Niedobór materiałów budowlanych na krajowym rynku powodował nieustanny nacisk władzy państwowej na podnoszenie planów produkcyjnych zakładów wydobywczych. Jednym ze sposobów obiektywizacji takiego planowania były ekspertyzy dotyczące zdolności produkcyjnych instalacji kopalnianych i przeróbczych. Na ten cel przemysł ten ustanowił nawet specjalne fundusze na innowacje i wdrożenia, z których finansowana była działalność badawczo-wdrożeniowa jednostek produkcyjnych i naukowo-badawczych. W interesie przemysłu i nauki było więc inwestowanie w wiedzę jednostek badawczo-wdrożeniowych i uczelni technicznych.

Dziś tę funkcję kontroli przemysłu surowcowego przejął kapitał prywatny, głównie zagraniczny ze swoimi projektantami i producentami maszyn. Obecne zamówienia tego

przemysłu na tzw. eksperckie usługi w zakresie dokumentacji ruchowej lub projektowej, potrzebnej w postępowaniach administracyjnych w zakresie eksploatacji złoża i ruchu zakładu górniczego, to drobne usługi i trudno je nazwać działalnością naukową. I tak uczelniom wyższym pozostało jedynie dostarczenie na ten rynek, i to na własny koszt, odpowiednich kadr technicznych. Aby to czynić, uczelnia musi rozpoznawać potrzeby i reagować na rynek pracy programem kształcenia, w czym bardzo pomocna okazała się platforma informacyjna w rodzaju konferencji „Kruszywa Mineralne”.

Jak w tym kontekście poluzowania współpracy z przemysłem mineralnym powinna znaleźć się nauka i dydaktyka w uczelniach akademickich nie jest sprawą oczywistą i prostą. Dzisiejszy przemysł stanowi bardzo zaawansowaną technik (maszyny, narzędzia, systemy kontroli i sterowania). Wprawdzie surowiec jest wciąż ten sam, technologia niewiele się zmienia, podobnie jak prawa ekonomii. Rosną natomiast wymagania jakościowe dla surowca i produktów przeróbki oraz ochrony środowiska i BHP. Zmniejsza się jednocześnie baza surowcowa z powodu wyczerpywania się łatwiej dostępnych zasobów złożowych, następują przewartościowania w psychologii i socjologii pracy, rośnie wartość wykształcenia ogólnego i tzw. kompetencji miękkich.

Wszystko to stawia szkoły wyższe przed trudnym zadaniem wypełnienia swojej misji przygotowania kadr technicznych dla przemysłu surowcowego, działając jednocześnie w pewnym oddaleniu od tego przemysłu. Uczelnia może to czynić jedynie w warunkach laboratoryjnych: wykładach, projektach, ćwiczeniach – ogólnie, zadaniach abstrakcyjnych wzorowanych na obiektach i warunkach rzeczywistych, ale w ujęciu systemowym, wielowymiarowym. Natomiast absolwent powinien widzieć technologie kompleksowo, jako wielowymiarowy obiekt techniczny i gospodarczy i posiadać wiedzę o metodach i środkach zarządzania produkcją – nie musi wiedzieć jak dokręca się śrubę regulacyjną w jakiejś maszynie, ale powinien wiedzieć, że taka możliwość istnieje i ma określony wpływ na wynik pojedynczej operacji oraz na konsekwencje jakościowo-ilościowe i ekonomiczne tej manipulacji regulacyjnej dla efektywności całego systemu produkcyjnego.

Przy braku dostępu do obiektów rzeczywistych jedynym wyjściem pozostają tu techniki symulacyjne, które obecnie stają się niezastąpione w kształceniu pracowników. Jednocześnie sens i skuteczność tego kierunku rozwoju technik analitycznych może być konfrontowana z praktyką przez publikacje właśnie na takich konferencjach, jak „Kruszywa Mineralne”, które stały się dla Politechniki Wrocławskiej nową formą kooperacji uczelni z przemysłem.

Zatem nasza współpraca z przemysłem kruszyw byłaby frustrująca, gdyby nie korzyści dla dydaktyki z uczestnictwa w pracach konferencji. Z jednej strony była to przez wiele lat możliwość śledzenia rozwoju tego przemysłu i zdobywania informacji o jego potrzebach kadrowych co do kwalifikacji inżynierskich, a z drugiej zaś okazja do zaprezentowania wyników prac naukowo-dydaktycznych w postaci publikacji konferencyjnych. Artykuł ten jest relacją i przeglądem wkładu autora w treść tej konferencji na pograniczu nauki i dydaktyki w dziedzinie górnictwa kruszywo-

wego. Większość z podanych na końcu tekstu opracowań ([1–33]) są publikacjami autora.

Audytoria konferencji są ludzie przemysłu i jednostek badawczych współpracujących z tym przemysłem. Czas prezentacji referatów jest bardzo ograniczony, stąd przekaz musi być zwięzły i zrozumiały, a treści niezbyt zaawansowane. I tak to też wygląda w naszych publikacjach, gdzie omawiane były zasady projektowania i obliczania schematów technologicznych, metoda doboru maszyn, zagadnienia optymalizacji produkcji, oceny ekonomiczne, energochłonności, studia porównawcze jakości analiz *off-line* z wynikami rzeczywistych systemów itp. zagadnienia praktyczne. Przywołana literatura pokazuje w tytułach treści materiałów konferencyjnych lub magazynów branżowych, stąd ich powtarzanie w tym artykule nie wydaje się być celowe. W zamian warto, choćby w zarysie przedstawić autorską koncepcję systemowego spojrzenia na problemy analizy systemów produkcyjnych kopalni, w których kruszywa mineralne są jednym z wielu produktów na rynku surowcowym.

2. ZARZĄDZANIE PRODUKCJĄ JAKO PRZEDMIOT KSZTAŁCENIA

Eksploracja złoża jest produkcją realizowaną w odpowiednich instalacjach zakładu górniczego, którego produktem jest przetworzona kopalina. Aby ten produkt był odpowiedni dla tych przemysłów musi przejść proces oczyszczania i uszlachetniania. Inaczej mówiąc: eksploatacja złoża = produkcja górnicza = wydobywanie i przeróbka kopaliny.

Technologie górnicze to metody i środki eksploatacji złóż realizowane w odpowiednich instalacjach technicznych. Relacje pojęciowe między technologią i techniką a środowiskiem wyjaśnia rys. 1, lewa strona schematu pokazuje strukturę i hierarchię idei, a prawa ich wyraz materialny [3].

Górnictwo jest działem gospodarki osadzone w środowisku idei i materii, jako część ogólniejszego systemu kultury materialnej człowieka. W świecie idei, interakcje ze środowiskiem wyrażają się w sposobie zarządzania i polityki państwa, które ustanawia sposoby (technologie), zasady, normy lub prawa funkcjonowania tego działu gospodarki w środowisku. W świecie techniki leżą instalacje – maszyny i urządzenia, które są efektem realizacji określonej technologii. Ten wstęp jest ważny dla wskazania obszaru zainteresowań i jasności pojęć stosowanych w tym artykule.

Rozważania w dziedzinie profilu i kształcenia inżynierów na potrzeby przemysłu górniczego doprowadziły do wniosku, że inżynier-górnik to specjalista od zarządzania produkcją górniczą, czyli najogólniej biorąc jest znawcą pochodzenia i właściwości kopalni, technologii ich wydobywania i przerobu, organizacji i zarządzania produkcją i bezpieczeństwem w zakresie ochrony środowiska (w tym środowiska pracy). Zatem nie jest to mechanik, budowlaniec, elektryk etc., lecz technolog i organizator produkcji górniczej; stąd jego profil wykształcenia musi być znacznie szerszy od wymienionych i bardziej zróżnicowany [12].

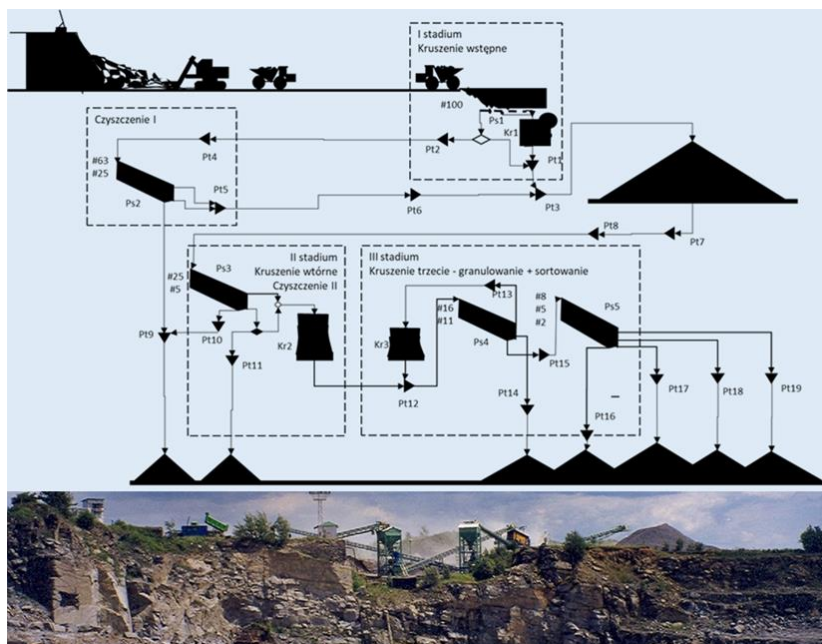


Rys. 1. Górnictwo i środowisko – struktura i znaczenie pojęć
 Fig. 1. Mining and environment – structure and system of meanings

Dlaczego branża kruszyw może być interesującym polem dla nauki na fakultetach górniczych o kierunku górnictwo i geologia, choć technologie produkcji kruszyw nie są skomplikowane (rys. 2), a produkty działalności nie są wielkiej wartości, porównując z przemysłem np. metali nieżelaznych. Mamy tu do czynienia z wielokrotnie większym wolumenem produkcji w setkach rozproszonych przestrzennie zakładach produkcyjnych, co sprawia, że obok rolnictwa i energetyki odgrywa on kluczową rolę w gospodarce każdego kraju, stwarzając jednocześnie przez swoje rozproszenie poważne problemy środowiskowe. Nawet nieduży zakład górniczy tej branży, to przedsięwzięcie techniczne, ekonomiczne, środowiskowe i społeczne, które wymaga od jego pracowników znacznie szerszych kwalifikacji i kompetencji, niż bardzo specjalistyczne stanowisko w dużym przedsiębiorstwie. Dodatkowym argumentem na atrakcyjność tego przemysłu jako modelu dydaktycznego jest to, że dobrze nadaje się on do systemowego ujęcia w sensie technologicznym, ekonomicznym i środowiskowym. Rysunek 3 jest pomocny w wyjaśnieniu tego zagadnienia.

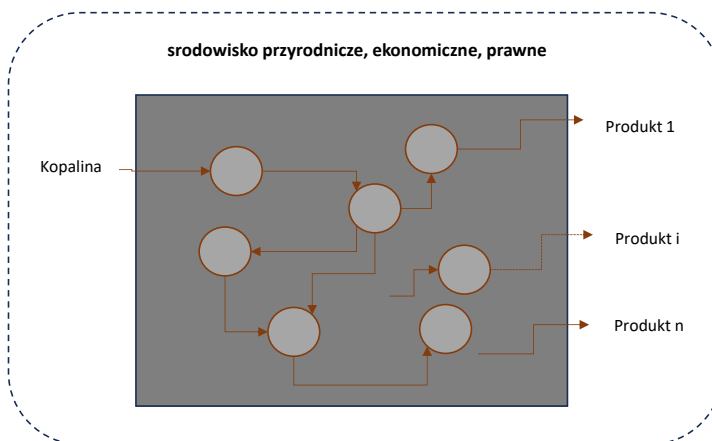
Student otrzymuje zadanie zaprojektowania technologii produkcji kruszyw i dobór odpowiednich maszyn dla zadanych parametrów nadawy (kopaliny), mając do dyspozycji znajomość rynku kruszyw w postaci rodzaju i cen produktów końcowych zakładu, rynku maszyn górniczych i przerobczych (w tym ich ceny), ograniczeń

środowiskowych – rodzaju i wielkości złoża oraz konieczności rekultywacji terenów poeksploatacyjnych.



Rys. 2. Typowa technologia eksploatacji złoża jako zintegrowany zespół operacji górniczo-przeróbczych

Fig. 2. Typical quarry technology as the integrated extraction and processing system



Rys. 3. Technologia jako czarna skrzynka i zadanie projektowe do rozpoznania

Fig. 3. Technology as the black box and exercise of project development

metod obliczeniowych operacji, a także sposobu korzystania w tym celu z arkusza kalkulacyjnego. Kurs trwa dwa semestry, z tym, że pierwszy semestr poświęcony jest analizie złoża i sposobie rekultywacji terenów poeksploatacyjnych, a efekt tej analizy jest wejściem do systemu projektowania technologii i oceny efektywności produkcji kruszyw.

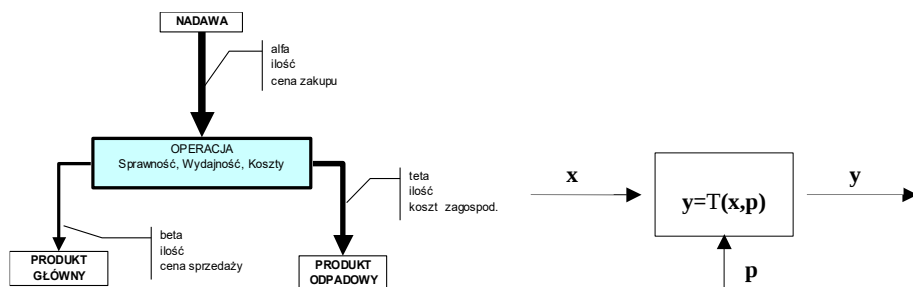
Przychodząc do projektowania technologii i rachunku ekonomicznego inwestycji, student wie, z jakim złożem ma do czynienia, jakie są jego zasoby, technologia i technika wydobywania, przekształcenia terenu i powierzchnia do rekultywacji. Efekt końcowy pracy to rodzaj studium wykonalności projektu syntetycznie pokazanym w tabeli 1. Obliczenia ekonomiczne wykonywane są specjalnym programem, do którego danymi wejściowymi są zadane parametry złoża, obliczenia technologii, dobór maszyn i wyniki produkcyjne projektu studenta. Ten wynik i obrona projektu są podstawą oceny.

W tym miejscu zasadne jest pytanie skąd student czerpie wiedzę poza wykładem, jeśli nie ma podręczników, których wydawaniem szkoła nie jest zainteresowana, bo taka działalność nie liczy się w jej rankingach. I tu wielką pomocą w tym zakresie jest możliwość uczestnictwa nauczycieli akademickich w takich wydarzeniach, jak konferencje naukowo-techniczne w rodzaju „Kruszywa Mineralnych”. Uczestniczą w konferencjach wydawnictwa branżowe, które publikują wybrane artykuły na swoich łamach rozszerzając krąg czytelników, no i potencjalnych recenzentów treści akademickich. W tym upatrujemy główną wartość dydaktyczną czynnego uczestnictwa w konferencji z referatami, do których zawsze można odesłać studenta, gdy trzeba rozszerzyć wiedzę podawaną na wykładach. Jednocześnie uczestnictwo nauczycieli w tym ruchu to korzyść w dostępie do nowych informacji w tej sferze gospodarki. Korzyści są więc obopólne, choć – w świetle tego, co powiedziano wcześniej – nierówno rozłożone.

3. TECHNOLOGIE MINERALNE JAKO TECHNOLOGICZNY FRAKTAL

Nasze zainteresowania i publikacje w zakresie geotechnologii to próby heurystycznego ujęcia i opisanie operacji produkcyjnych na poziomie pojedynczych cząstek skały i konstruowania (algorytmizacji) procedur tego opisanie dla zbiorów ziaren o dowolnych rozkładach uziarnienia. Kontrola przejścia zbiorów z jednego stanu do drugiego w procesach operacji technologicznych jest istotą analizy tych operacji. Aby taka analiza miała większe znaczenie praktyczne, należy ocenić ją pod względem ekonomicznym.

Podstawowym problemem analizy systemów jest posiadanie wiarygodnych narzędzi obliczeniowych, czyli zagadnienie identyfikacji operacji technologicznych, w sensie ich przydatności do odwzorowania realnych procesów produkcyjnych. Zauważmy tu, że istnieją dwa rodzaje analizy systemów: *on-line* i *off-line*. Pierwszy jest kontrolą procesów operacji realizowanych w czasie rzeczywistym, drugi to kontrola realizacji tych procesów w sensie wirtualnym, czyli poza czasowym i fizycznym związkiem z systemem rzeczywistym lub analizowanym.



Rys. 5. Informacyjny model operacji x jest wektorem wejść/zmiennych, a y wektorem wyjść, p – zbiorem parametrów operacji, T – zbiorem funkcji lub algorytmów, za pomocą których transformujemy x w y

Fig. 5. Informational model of the processing operation: x , y – input and output data, p – parameters vector, T – operator of transition x to the y

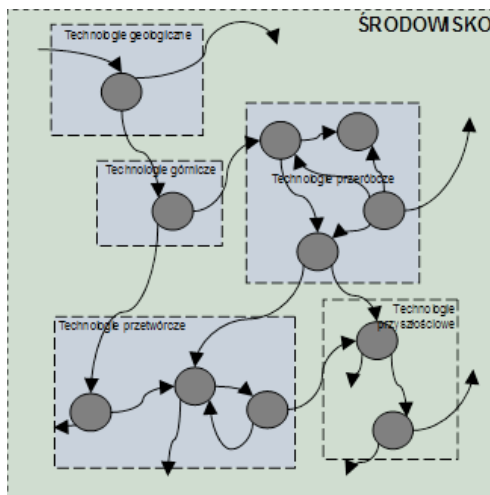
Polem zainteresowania jest analiza *off-line*, która jest możliwa wtedy, gdy posiadamy modele i sposoby ich realizacji za pomocą odpowiednich algorytmów obliczeniowych. Narzędzia tego typu to podstawa warsztatu projektanta i technologa produkcji. Na tym poziomie trzeba zacząć od zdefiniowania informacyjnego modelu operacji technologicznej, jak na rys. 5. Wejściem systemu jest jeden lub więcej strumieni pochodzących z innych operacji, a wyjściem jeden lub więcej strumieni przetworzonych operatorem T , który jest zbiorem funkcji lub algorytmów sterowanych zmienną x i parametrami p . Jakość – szczegółowość informacyjna zależy tu od stopnia identyfikacji procesu operacji [30].

To, co jest szczególnie interesujące w technologiach surowcowych, to ich skalowalność technologiczna, polegająca na powtarzalności operacji separacji w miarę zaawansowania technologii. Na przykład od złoża geologicznego do produkcji metalu mamy wiele stadiów operacji kwalifikacji złoża oraz jego eksploatacji i przeróbki na produkt pożądany i uboczny, które to produkty mogą być początkiem kolejnych operacji aż do granic możliwości technologicznych lub opłacalności [11]. Naszym wynalazkiem jest tu identyfikacja tej technologii jako technologicznego fraktala, zapisywanego równaniem, jak na rys. 5.

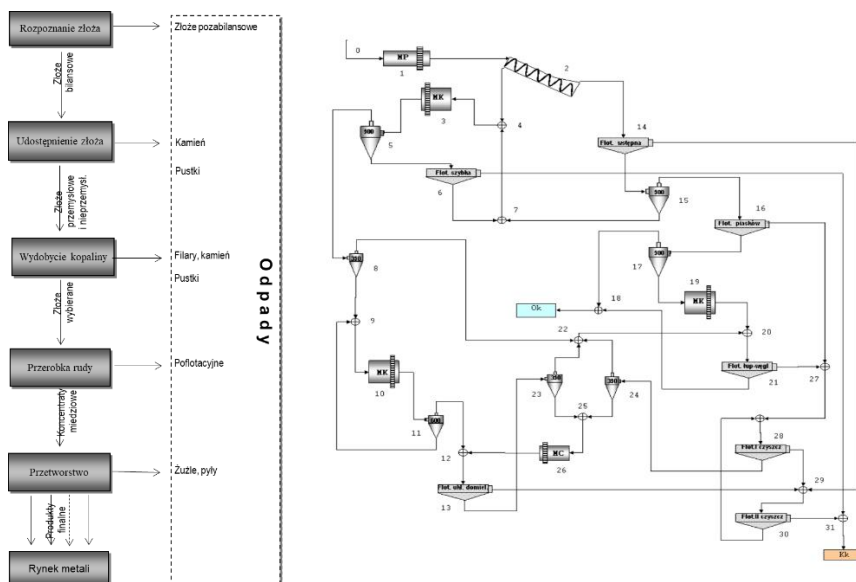
Jak się okazuje, każdy obraz stadium ma cechy fraktala, czyli obiektu samopodobnego, i dotyczy to zarówno natury samego procesu, jak i sposobu identyfikacji. Na każdym etapie procesu chodzi o kontrolę składu ziarnowego i wyróżnionych cech produktów operacji (koncentracja składnika użytecznego, gęstość, kształt ziaren, zawartość substancji szkodliwych etc.), lub cech eksploatacyjnych procesu (energochłonność, koszt operacji).

Podstawową cechą fraktala jest samopodobieństwo, tzn. niezależnie od skali szczegółowości mamy w zasadzie jeden produkt główny i reszta, które mogą rozrastać się do granic racjonalności (rys. 6). Jest to typ fraktala DLA (*diffusion limited aggregate*). Tak jest w technologiach surowcowych, gdzie powtarzalność podobnych operacji separacji jest do pewnego stopnia ograniczona w miarę zaawansowania i kosztów technologii. Na przykład od złoża do produkcji metalu mamy wiele stadiów operacji rozpoznania (kwalifikacji użytkowej złoża), ekstrakcji części opłacalnej, przeróbki na

produkt pożądaný i uboczny, które mogą być początkiem kolejnych operacji aż do granic możliwości technologicznych lub opłacalności (rys. 7).

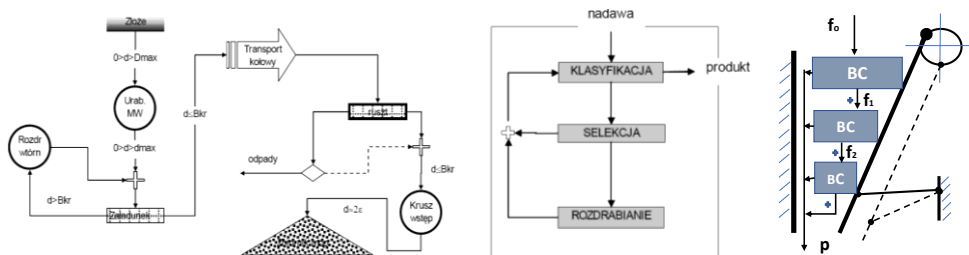


Rys. 6. Rozwój geotechnologia jako technologiczny fractal
Fig. 6. Development of the geotechnology as the technological fractal



Rys. 7. Stadalność i powtarzalność operacji jako cecha technologii,
z prawej struktura fraktala technologii na etapie wzbogacania rud CuS
Fig. 7. Repeatability of the Cu processing technology;
on the right – structure of processing as the subfractal of CuS production technology

Fraktalem jest też efekt operacji kruszenia skał w kolejnych aktach kruszenia (rys. 8).



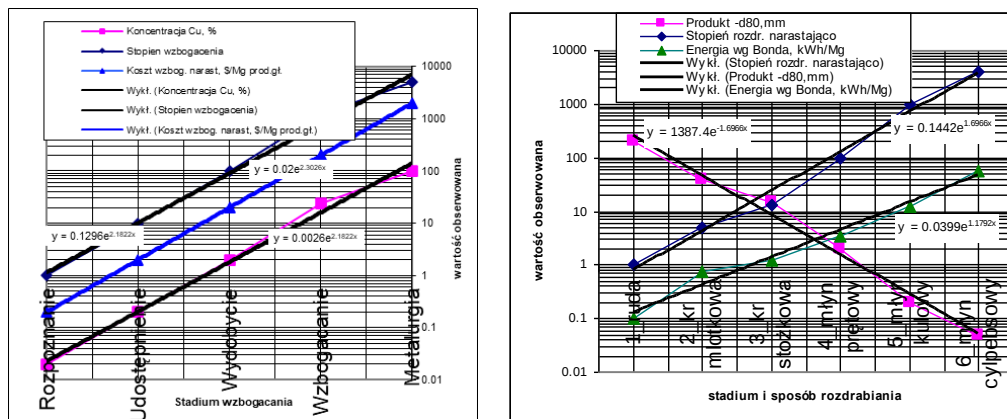
Rys. 8. Na lewo: fraktal technologii urabiania i odstawy skał, na prawo: modele operacji kruszenia skał w kruszarce

Fig. 8. Left: technology of the rocks extracting, right: models of crushing operation as the technological fractals

Formalnie reguła skalowania przedstawiona jest za pomocą równania

$$y = A r d_f, \quad (1)$$

gdzie r jest skalą podziału/szczegółowości, a d_f (*dimension factor*) – stała, charakterystyczna dla danego obiektu niezależnie od stopnia tej szczegółowości, A – amplituda funkcji, która w tym momencie nie jest tu istotna.



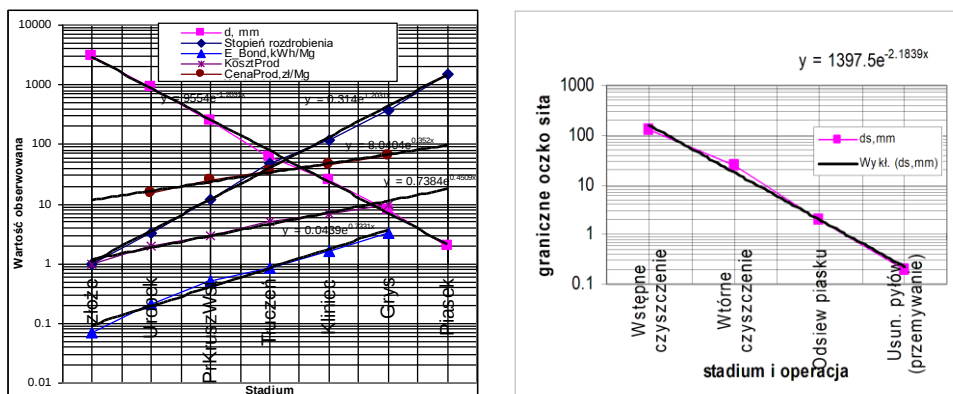
Rys. 9. Powtarzalność operacji jako cecha geotechnologii:
z lewej – koncentracja, stopień wzbogacenia i koszt produkcji Cu,
z prawej – efekt energochłonności rozdrabniania rud

Fig. 9. Repeatability as the property of geotechnology: at the left – Cu concentration, recovery, costs, on the right – size reduction and energy consumption in Cu ore comminution process

Naszą propozycją jest, by rozwój technologii (jej szczegółowość) przedstawić wzorem (2), jeśli zmienną $r = \exp(s)$ wyrazimy jako funkcję stadium procesu rozwoju technologii, gdzie s – liczba stadiów tego procesu. W takim razie równanie (1) będzie miało postać:

$$y = A \exp(s)^{d_f}. \quad (2)$$

Po lewej stronie równania może stać energochłonność skumulowana, koszt realizacji technologii, granice wymiarów ziaren wyznaczających jakość i zaawansowanie tej technologii – szczegółowość informacji zależy tylko od struktury obiektu, o czym decyduje zmienna r . Na rysunkach 9 i 10 podobieństwo efektu technologii charakteryzuje współczynnik kierunkowy równań; amplituda A funkcji związana jest z miarą wartości. Obrazy te to tylko wybrane przykłady analizy, z której można też wyprowadzić pewną hipotezę, że jeśli wartości rzędnych na rysunkach nie leżą dokładnie na prostej, to oznacza, że jest tu coś do poprawienia w produkcji.



Rys. 10. Powtarzalność operacji jako cecha technologii kruszyw: z lewej – granice, energochłonność, ceny, koszty w produkcji kruszyw; z prawej: granice jakościowe technologii
Fig. 10. Repeatability as the property of the aggregates technology: at the left – particle size limited, energy, product price, on the right – size reduction limits of aggregate quality

Fraktalne cechy technologii rozdrabniania i klasyfikacji reprezentują też funkcja (3), która jest odmianą funkcji (1):

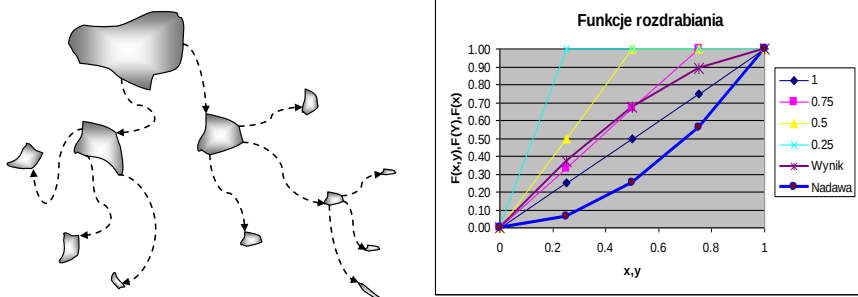
$$F(x, y) = z^b \dots, \quad (3)$$

gdzie $z = x/y$ jest względnym wymiarem, a y granicznym wymiarem ziaren operacji.

Na rysunku 11 przedstawiono model tej operacji kruszenia skał o wielkości y do wymiaru x . Sumując tę funkcję w granicach $0 - y_{\max}$, otrzymujemy potrzebny wynik całej n -stadiowej technologii operacji kruszenia w postaci:

$$F(x) = \int_0^x \int_0^y d[F(x, y)] d[F(y)], \quad x \leq y. \quad (4)$$

Na rysunku 11 pokazano przykładowy model kruszenia w kolejnych stadiach procesu i wynik prognozy składu ziarnowego – $F(x)$ linia czerwona, jeśli efekt kruszenia pojedynczej cząstki y daje wynik opisany funkcją $F(z) = z^b = 1$.



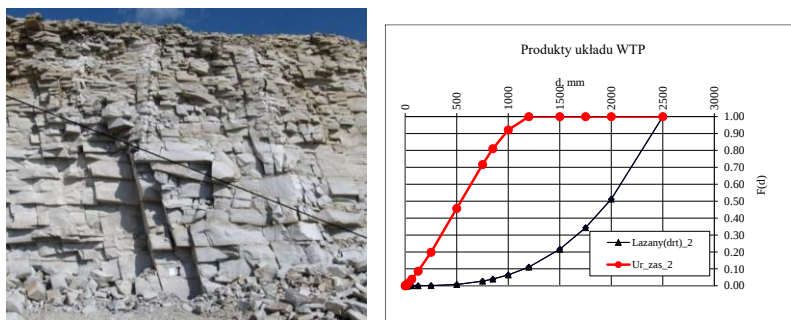
Rys. 11. Stadialność i powtarzalność operacji kruszenia jako cecha technologii.

Rozkład ziarn nadawy – linia niebieska, produktu – linia czerwona

Fig. 11. Repeatability of crushing process as the characteristic feature of crushing technology.

Size distributions of: feed – blue line, final product – red line

Kolejnym naszym wkładem do modelowania operacji rozdrabniania jest identyfikacja współczynnika $b = f(E, p)$ jako funkcji energochłonności kruszenia, z użyciem do tego celu wyników badań w aparacie dwuwahadłowym, gdzie funkcją $F(x, y) = (x, y)^{b_{GS}(E)}$ opisano rozkładem potęgowym [4, 5]. Na rysunku 12 przedstawiono przykład wykorzystania tej metody do prognozowania rozdrobienia urobku po odstrzale [27].



Rys. 12. Widok na ścianę wyrobiska i wynik urabiania MW w granicie

Fig. 12. A view on the face of granite working and result of blasting operation

W przypadku mniej odpowiedzialnych zadań używamy bardzo elastyczny i prosty model składu ziarnowego produktów rozdrabiania w kruszarkach szczękowych i stożkowych, będący syntezą procesu z rys. 11, wyrażoną funkcją zależną od pozornego stopnia rozdrobienia operacji [13], tj.

$$F(x) = 1 - \exp(-ar^b), \quad r = \frac{d}{e}, \quad e - \text{szerokość szczeliny.} \quad (5)$$

Parametrami a i b można dobrze dostroić charakterystyki uziarnienia dla oferowanych w sprzedaży kruszarek przemysłowych i później używać te modele do projektowania i optymalizacji parametrów systemu.

Podobnie można wyrazić efekt przesiewania ziaren wielkości x , na sicie o oczku y , który jednoznacznie wyraża się przez sprawność przesiewania [10, 14, 20, 25]:

$$s(z) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

lub

$$s(z) = 1 - z^{kt}, \quad z = x / y. \quad (7)$$

Równania pozwalają kontrolować wychód ziaren wielkości x w zależności od zmiennej y i stałych b , k lub λ i w ten sposób obliczać rozkłady uziarnienia w produktach operacji.

Już tak proste, jak wyżej modele dają wiarygodne wyniki obliczeń jeśli parametry są starannie dobrane. Ale dokładniejsze obliczenia wymagają bardziej zaawansowanych algorytmów, przy czym i tu nie obywa się bez pewnych uproszeń. Na przykład składanie operacji cząstkowych wiąże się z założeniami addytywności takiej operacji rachunkowej. Nie zawsze jest to bezpieczne założenie; w kruszeniu można to robić, ale w przesiewaniu już potrzebna większa ostrożność, co pokazujemy w naszych badaniach [24].

4. WYDAJNOŚĆ MASZYN I ZDOLNOŚĆ PRODUKCYJNA SYSTEMÓW

Powyższe wzory służą do kontroli składu ziarnowego, ale wydajności techniczne maszyn to już oddzielny temat, którego nie uniknie się przy wyborze maszyn dla zaprojektowanej technologii oraz do znalezienia tzw. wąskich gardeł w systemie, które determinują dopuszczalne obciążenie systemu w całości, czyli określają wydajność techniczną instalacji. Naszą propozycją jest, aby traktować każdy rodzaj maszyn przerobczych jako maszynę przepływową [1, 9, 18, 28, 31], gdzie wydajność przepływu zależy od prędkości i powierzchni przepływu, tj.

$$Q(d) = qP, \quad (8)$$

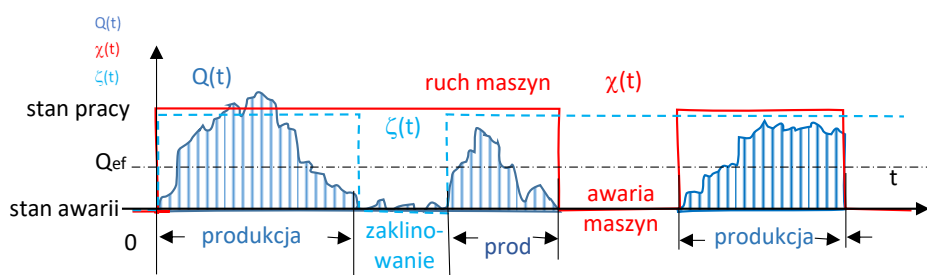
gdzie q jest ilością masy skalnej na jednostkę powierzchni, $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, a P powierzchnią otworu w m^2 .

Wydajność jednostkowa q na powierzchnię czynną sita lub powierzchnie szczeliny wypustowej kruszarek, fizycznie, jest prędkością przepływu zależną tu od oporów ośrodka. Ten opór może być na różny sposób wyrażony, np. zależny od wielkości i kształtu ziaren, wilgotności, kształtu otworu, podatności skał na kruszenie oraz parametry dynamiczne maszyn. Zagadnienie to było wielokrotnie przedstawiane w publikacjach konferencyjnych. Można tu jedynie dodać, że osiągnięcia na tym polu nie są imponujące i znalezienie jakiegoś uniwersalnego i pewnego modelu w oderwaniu od konkretnego rodzaju, a nawet typu maszyny, jest mało prawdopodobne.

Wydajność kruszarek lub środków transportu jest ograniczona wydajnością techniczną maszyn, ale wydajność sit, w zasadzie jest pojęciem umownym, gdyż przepustowość urządzenia praktycznie jest nieograniczona – jedynym ograniczeniem i kryterium oceny jest skuteczność przesiewania. Analiza komplikuje się, gdy chcemy obliczyć zdolność produkcyjną systemu w całości. Wydajność efektywna to wydajność techniczna pomniejszona o przerwy o charakterze losowym.

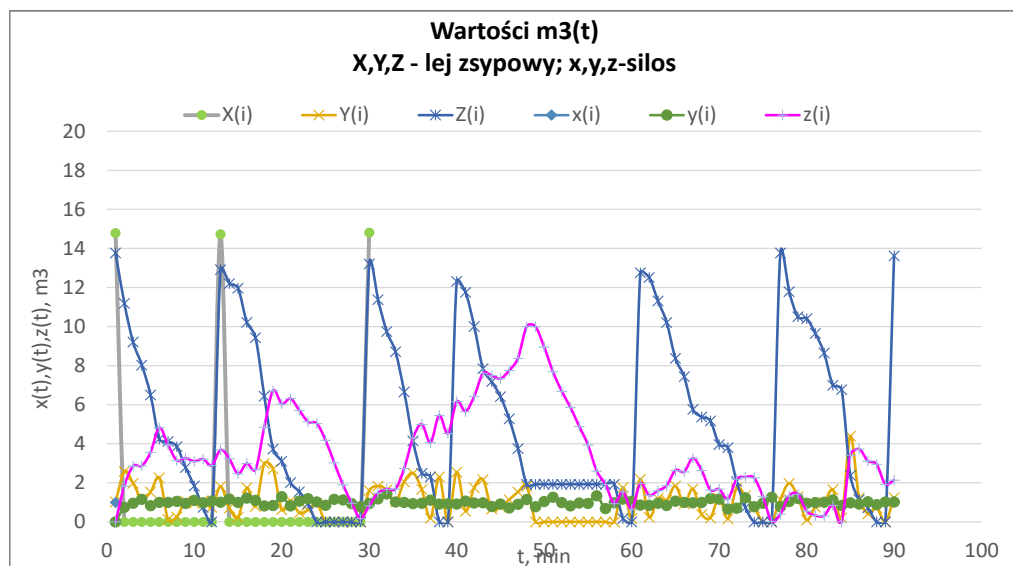
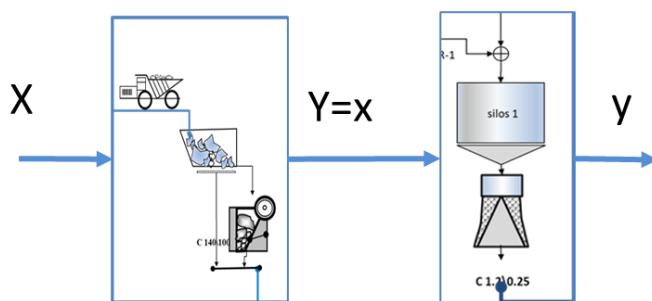
Oszacowanie prawdopodobieństwa zaistnienia takich przerw to zadanie niezwykle trudne, możliwe tylko wtedy, gdy mamy dostęp do statystyki takich przerw. Jak pokazały obliczenia [28, 31] przerwy, nawet przy bardzo niskiej awaryjności maszyn, mają spory udział sięgający 1/3 dyspozycyjnego czasu pracy.

Awarie maszyn i urządzeń w systemach to pojęcie szersze. Z jednej strony są to awarie maszyn, a z drugiej awarie technologiczne wymuszające przerwy w zasilaniu systemu, np. z powodu zaklinowań brył w kruszarkach wstępnych (rys. 13), albo przerw wymuszonych przepełnieniem zbiorników kolejnych stadiów (rys. 14) z powodu niedostoso-



Rys. 13. Splot procesów wydajności $Q(t)$, awarii maszyn $\chi(t)$ i zaklinowań kruszarki wstępnej $\zeta(t)$ jako wynik procesu produkcji
Fig. 13. Convolution of processes: capacity $Q(t)$, device breakdowns $\chi(t)$, chocked of the primary crusher $\zeta(t)$

Zbiorniki odgrywają wielką rolę w zarządzaniu przez ich wpływ na zdolność produkcyjną instalacji, planowanie procesu produkcyjnego oraz sposób zagospodarowania przestrzeni produkcyjnej. Cechą charakterystyczną układów wydobywania i przeróbki kopaliny jest obecność zbiorników dużej pojemności (rys. 2). W pracy [31] pokazano, że zbiorniki takie mają wartość głównie w przypadku planowania i organizacji pracy podsystemów. Ale interesujący jest też problem synchronizacji procesów operacji ze zbiornikami małej pojemności (rys. 14). Mało rozpoznany jest natomiast problem wpływu zbiorników końcowych na organizację pracy zakładu i ich udziału w kosztach inwestycyjnych.



Rys. 14. Przykład symulacji przepływów mas w zbiornikach o pojemności:
lejek 15 m³, silos 10 m³, gdy średnie $y < x$

Fig. 14. An example of flows simulation throughputs of the bins:
capacity primary bunker 15 m³, silos 10 m³, if mean values $y < x$

5. KONTROLA I OPTYMALIZACJA SYSTEMÓW

Produkcja kruszyw to zintegrowany system operacji wydobywania skał oraz przeróbki wg wymagań jakościowych rynku surowców i materiałów budowlanych. Optymalizacja, to metoda znajdowania najlepszego rozwiązania w świetle przyjętych kryteriów wyboru. Stosujemy ją niemal we wszystkich czynnościach życiowych i produkcyjnych, jeśli tylko jest możliwość wyboru najlepszego spośród dostępnych rozwiązań analizowanych problemów lub zadań. Kryteria zaś mogą być bardzo różne, np. czas wykonania zadania, maksymalizacja przychodu lub minimalizacja energii lub kosztu produkcji i temu podobne funkcje celu. Optymalizację można porównać do procesu ważenia, gdzie na jednej szali jest ilość, a na drugiej jakość – stan optymalny to równowaga dóbr, jakkolwiek by je nie mierzyć. Między ceną a jakością każdego dobra zawsze istnieje zależność dodatnia, ponieważ im większa jakość, tym większe nakłady trzeba ponieść na jej uzyskanie albo okupić to zmniejszeniem ilości produkcji. Zawsze jednak ma ona sens wtedy, gdy istnieje sprzężenie zwrotne między ilością i jakością.

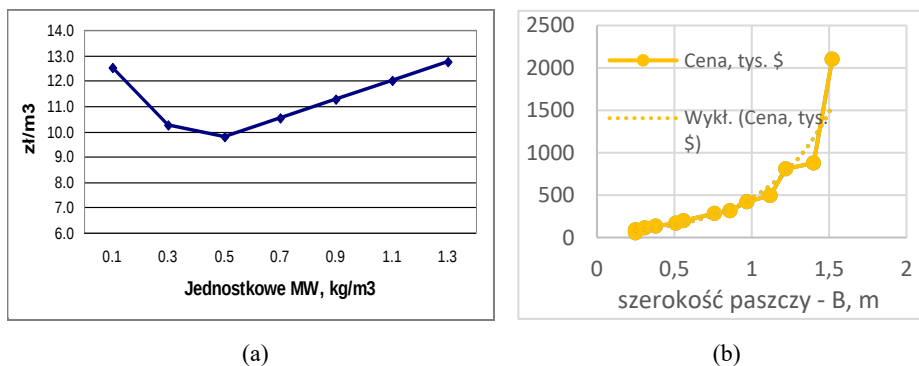
Inwestycje w przemyśle surowcowym są bardzo kapitałochłonne, a ich rentowność szacowana jest na kilka do kilkunastu procent. Są one analizowane pod kątem opłacalności już na bardzo wczesnym etapie rozwoju projektu inwestycyjnego. Na tym etapie rozważane są głównie czynniki zewnętrzne produkcji, takie jak rynek kruszyw, jakość złoża, jego dostępność, zasoby, cena pozyskania kapitału inwestycyjnego.

Pozytywna odpowiedź uzyskana w wyniku analizy rynku kruszyw i dostępności do zasobów surowca upoważnia inwestora do przejścia w kolejne etapy rozwoju projektu, tj. planowania, projektowania i budowy instalacji produkcyjnej, eksploatacji złoża i przeróbki kopaliny, a w końcu likwidacji zakładu i rekultywacji terenów poeksploatacyjnych. Na każdym z tym etapów istnieje wiele możliwości optymalizacji procesu inwestycyjnego i eksploatacyjnego.

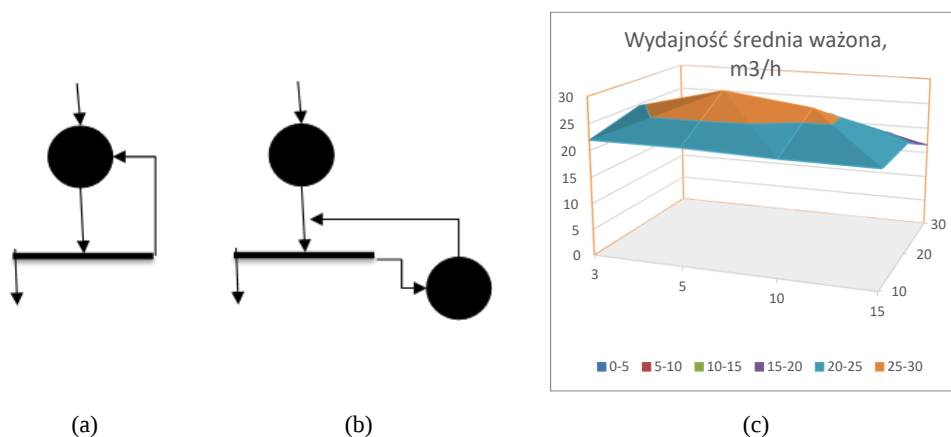
Są różne miary tej oceny, np. na etapie planowania istotne jest oszacowanie rentowności inwestycji, na etapie projektowania ważne jest ustalenie wydajności technicznej systemu aby dobrać odpowiednie do tego maszyny, na etapie operacyjnym będzie to kontrola i optymalizacja parametrów systemu pod kątem rynku kruszyw oraz kosztów produkcji.

Kryteria optymalizacji mogą tu być różne, np. jednostkowe koszty lub wartość produkcji, wydajność pewnych frakcji ziarnowych, ilość odpadów, energochłonność. W każdym przypadku istotne jest oszacowanie zdolności produkcyjnej instalacji, która może być uzyskana w konkretnych przedziale czasowym. Na rysunkach 15 i 16 pokazano dwa przykłady ważnych zagadnień doboru maszyn i optymalizacji produkcji. Pierwszy to zagadnienie dostosowania stopnia rozdrobienia nadawy do kruszarki wstępnej. W tym wypadku można obniżyć koszty kruszenia przez optymalizację intensywności urabiania górotworu MW albo przez dobór odpowiedniej wielkości kruszarki do stosowanej technologii urabiania. Zmiana wielkości maszyn pociąga za sobą wykładniczy wzrost ceny maszyny i jej kosztów inwestycyjnych i operacyjnych. Drugi przy-

kład to wybór liczby stadiów kruszenia końcowego lub optymalizacja parametrów tych stadiów, co pokazano na rys. 16 [13, 16].



Rys. 15. (a) Jednostkowe koszty produkcji urabiania MW – kruszenie wstępne jako funkcja energii MW przy ustalonej wielkości kruszarki wstępnej, (b) zależność ceny kruszarki wstępnej od jej wielkości mierzonej szerokością paszczy
Fig. 15. (a) Unitary production cost of the blasting and primary crushing system, for given size of the primary crusher, (b) dependance of the primary crusher size/gape on its price

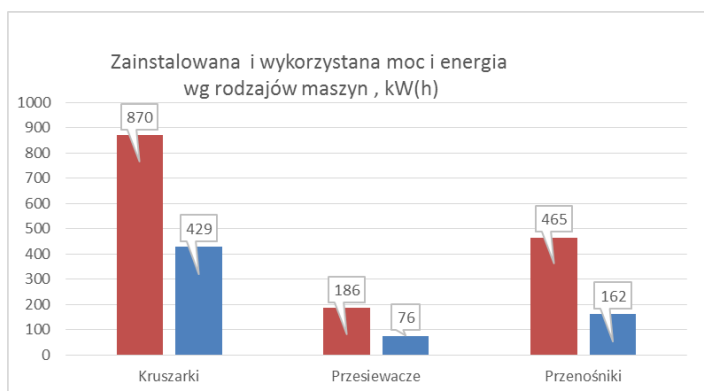


Rys. 16. (a), (b) Typowe struktury końcowych 3 i 4 stadiów rozdrabniania, (c) optymalne zakresy parametrów kruszarek wg kryterium preferencji produkcji
Fig 16. (a), (b) Typical structures of the ending 3 and 4 crushing circuits, c) optimization value of preference products vs size crushers settings of the 3 and 4 crushing stadium

Reasumując, optymalizacja jest nieodzowna na każdym etapie rozwoju projektu inwestycyjnego i jest to najbardziej interesujące i praktycznie ważne zagadnienie projektowania technologii i zarządzania produkcją mineralną.

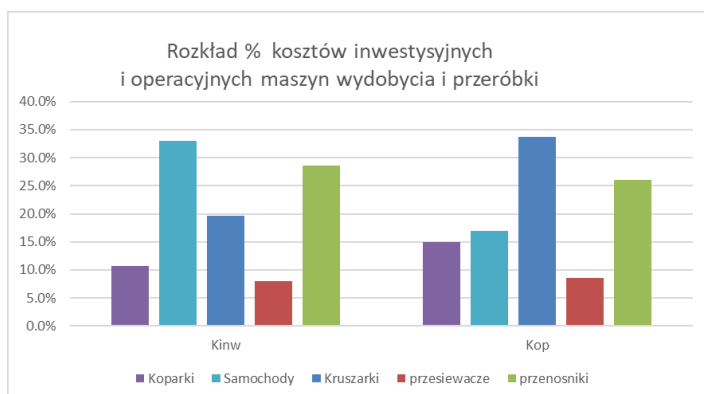
6. ENERGIA, KOSZTY, ŚRODOWISKO

Energia, to poważny składnik kosztów produkcji. Najbardziej energochłonne operację to kruszenie skał i transport wewnętrzny. Na rysunku 17 przedstawiono strukturę zainstalowanej i wykorzystanej mocy napędów elektrycznych w rzeczywistym zakładzie przeróbki skał [5]. Porównanie to pokazuje, że warto baczniej zwrócić uwagę na te sprawy już na etapie projektowania. Szczególnie dotyczy to przenośników taśmowych, gdzie istnieją rezerwy oszczędzania energii już na tym etapie.



Rys. 17. Porównanie mocy zainstalowanej i wykorzystanej według rodzaju maszyn w systemie-rzeczywistym

Fig. 17. Comparative picture of power motors installed and loaded (crushers, screens and conveyors) in real installation

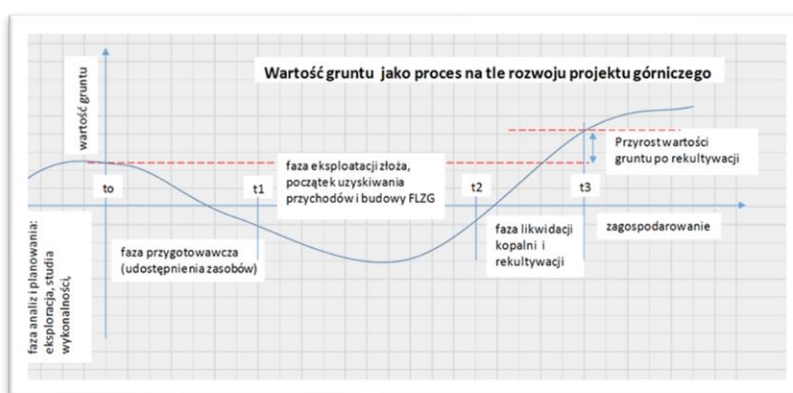


Rys. 18. Struktura i koszty inwestycyjne i operacyjne maszyn na przykładzie projektowanego systemu wydobywania i przeróbki skał

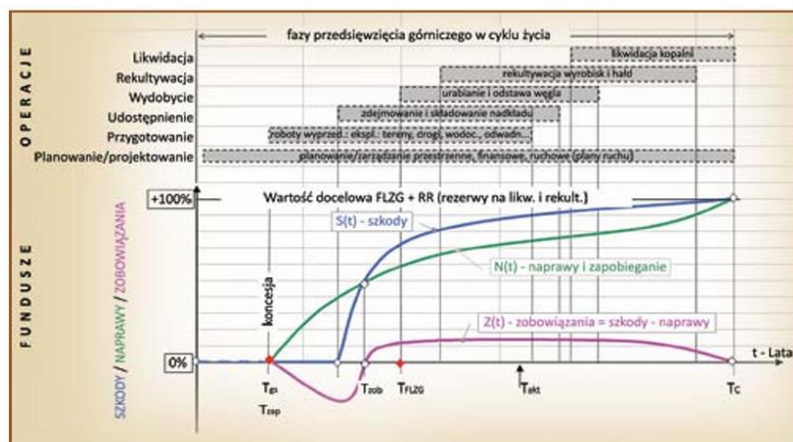
Fig. 18. Structure of investment and operational costs of the designed quarry system installation

Na rysunku 18 z kolei pokazano strukturę i wielkość kosztów inwestycyjnych i operacyjnych uzyskane na przykładzie obliczeń symulacyjnych średniej wielkości kopalni skał zwięzłych. Transport odgrywa tu równorzędną do kruszenia rolę w kosztach produkcji. W tym wypadku ważny jest etap projektowania zakładu, w szczególności sposób wykorzystania przestrzeni produkcyjnej [5, 17, 21].

Na zakończenie nie sposób pominąć rekultywacji przestrzeni poeksploatacyjnej kopalni. Koszty rekultywacji mogą być znaczne. Nasz wkład w rozpoznanie tego zagadnienia i metodologie rachunku ekonomicznego jest udokumentowany wieloma projektami i publikacjami [24, 26, 29]. Jest to oryginalne, systemowe ujęcie problemu w kontekście przyrodniczym, gospodarczym, prawnym i ekonomicznym.



(a)



(b)

Rys. 19. (a) Cel planowania i fazy rozwoju projektu inwestycyjnego oraz (b) procesy kształtowania się zabezpieczeń finansowych na rzecz realizacji tego celu
Fig. 19. The target of planning and phases of project development shaping financial security for the reclamation of post-mining land

Na rysunku 19a pokazano cel i pożądaný efekt rekultywacji w procesie planowania i rozwoju projektu inwestycyjnego, a na rys. 19b sposób kształtowania zabezpieczeń finansowych w kontekście realizacji docelowego przekształcenia terenu [32, 33]. Z kolei przykład ujęcia kosztu rekultywacji w rachunku ekonomicznym górniczego projektu inwestycyjnego podano na przykładzie tabeli 1 [15].

7. UWAGI I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedsięwzięcia inwestycyjne w przemyśle mineralnym są bardzo kapitałochłonne, a zastosowana technika jest kosztowna w eksploatacji z powodu oporu materii (skały zwięzłe), energochłonności procesów produkcyjnych (rozdrabianie, transport) i kosztów środowiskowych. Główne składniki kosztów to amortyzacja maszyn i utrzymanie produkcji. Zatem każda inwestycja w tym przemyśle wymaga pogłębionej analizy ekonomicznej już na etapie studium wykonalności przedsięwzięcia biznesowego.

Ta faza rozwoju projektu inwestycyjnego jest też odpowiednia dla poziomu kształcenia studentów o profilu geoinżynierskim w przedmiocie zarządzania produkcją. Składa się ona z kilku elementów, wśród których jest projektowanie technologii i dobór maszyn do jej realizacji oraz oszacowanie nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacji tych maszyn, włączając do tego rachunku koszt rekultywacji terenów poeksploatacyjnych.

Dostępność i wymiana informacji na ten temat pomiędzy dydaktyką i praktyką przemysłową jest ważna i konferencja „Kruszywa Mineralne” odgrywa tu znaczącą rolę. Pokazujemy to choćby przez tematykę i liczebność publikacji wymienionych w załączeniu do tego artykułu. Ich wspólną cechą jest monograficzny charakter wokół koncepcji fraktala technologicznego. Otwiera to pole do dalszej syntezy informacji i może być kierunkiem dla kolejnych prac związanych z przemysłem mineralnym w ogólności, a kruszywa w szczególności.

LITERATURA

- [1] *Dobór maszyn w układach przeróbki skał*, Mining Science, 2014, Vol. 21 (1), s. 139–150.
- [2] *Ekonomiczna ocena modernizacji układu kruszenia rudy w ZWR Lubin* (wsp. G. Paszkowska, M. Żrebiec), Mining Science, 2016, Vol. 23 (1), s. 107–114.
- [3] *Eksploatacja złoża w kontekście technologicznym i środowiskowym*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 6, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2023, s. 61–69.
- [4] *Energia w teorii i praktyce rozdrabiania*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2020, t. 4, s. 101–122.
- [5] *Energochłonność podstawowych operacji technologicznych w systemach przeróbki kruszyw*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2019, t. 3, s. 103–108.
- [6] *Kształt ziaren produktów rozdrabiania*, Kruszywa, 2014, nr 3.

- [7] *Metoda obliczania wydajności kruszarek*, [w:] *Kruszywa mineralne*, Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa PWr Nr 97, Seria Konferencje Nr 33, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2002. s. 135–145.
- [8] *Modelowanie i optymalizacja systemów procesów wydobywania i produkcji kruszyw łamanych* (wsp. S. Modrzejewski), *Górnictwo Odkrywkowe*, 2008, s. 73.
- [9] *Niezawodność i wydajność systemów przerobczych*, Surowce i Maszyny Budowlane, 2018.
- [10] *O dokładności analiz sitowych*, [w:] W. Głapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 1, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2017, s. 103–111.
- [11] *O fraktalnej naturze geotechnologii*, Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa PWr Nr 135, Seria Studia i Materiały Nr 42, Wrocław 2012, s. 179–193.
- [12] *O kształceniu w szkole wyższej na kierunku górnictwo i geologia*, [w:] *Problemy bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w polskim górnictwie. Kształcenie i doskonalenie zawodowe pracowników zakładów górniczych*, ZG SITG, Katowice 2005, s. 46–56.
- [13] *Obliczanie schematów technologicznych przeróbki skał*, Surowce i Maszyny Budowlane, 2014, nr 1, s. 52–56.
- [14] *Optymalizacja procesu przesiewania w przesiewaczach wielopokładowych*, (wsp. M. Baszczyńska), Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa PWr Nr 136, Seria Studia i Materiały Nr 43, Wrocław 2013, s. 99–108, także: *Powder & Bulk*, 1/2014.
- [15] *Optymalizacja systemów i procesów produkcyjnych*, BMP Maszyny i Surowce Budowlane, 2021.
- [16] *Optymalizacja układów przeróbki kruszyw z obiegiem zamkniętym nadziarna*, Surowce i Maszyny Budowlane, 2017, nr 1, s. 52–56.
- [17] *Oszacowanie struktury kosztów maszyn podstawowych*, BMP Kierunek Surowce, 2024, nr 1, s. 34–39.
- [18] *Planowanie zdolności produkcyjnej zakładu przeróbki surowców*, [w:] W. Głapa (red.) *Kruszywa mineralne*, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2018, t. 2, s. 117–131.
- [19] *Projektowanie i obliczanie schematów technologicznych przeróbki skał*, BMP Materiały i Maszyny Budowlane, cz. 1, 6/2013, cz.2, 1/2014.
- [20] *Sterowanie procesem przesiewania w przesiewaczach wielopokładowych*, *Mining Science, Mineral Aggregates*, vol. 23 (1), Wrocław 2016, s. 95–106.
- [21] *Struktura nakładów inwestycyjnych i kosztów operacyjnych maszyn podstawowych w projekcie instalacji przeróbki kruszyw*, [w:] W. Głapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 7, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2024, s. 149–158.
- [22] *Struktura produktów operacji geologiczno-górnich na przykładzie złoża LGOM*, *Konsulting Polski*, 2015, nr 5/6, s. 25–27.
- [23] *Studies on additive properties of some processing operations*, *Mining Science*, 2013, Vol. 20, s. 57–70.
- [24] *Szkody w środowisku, odszkodowania i zabezpieczenia roszczeń na terenach górnictwa odkrywkowego*, [w:] J. Małewski (red.), Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2007, ss. 184.
- [25] *Technologie i jakość przesiewania*, Surowce i Maszyny Budowlane, 2016, nr 2, s. 36–40.
- [26] *The concept of forecasting the reclamation cost in rock mining* (wsp. U. Kaźmierczak, P. Strzałkowski), *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 2019, vol. 35, nr 4, s. 163–176.
- [27] *Urabianie skał w kopalniach odkrywkowych jako problem optymalizacyjny* (wsp. P. Rink), Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa PWr Nr 134, Seria Studia i Materiały Nr 41, Wrocław 2012, s. 175–180.
- [28] *Wydajność maszyn w układach przeróbki skał*, *Powder & Bulk*, 2015, nr 5, s. 14–17.
- [29] *Zagospodarowanie wyrobisk. Technologiczne, przyrodnicze i gospodarcze uwarunkowania zagospodarowania wyrobisk poeksploatacyjnych surowców skalnych Dolnego Śląska*, [w:] J. Małewski (red.), Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 1999, s. 225.
- [30] *Zarządzanie produkcją kluczową technologią rozwoju przemysłu wydobywczego rud miedzi i surowców towarzyszących*, *Cuprum*, 2008, nr 1, s. 93–107.
- [31] *Zbiorniki wyrównawcze i awaryjne w systemach produkcyjnych*, [w:] W. Głapa (red.) *Kruszywa mineralne*, t. 5, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2022, s. 115–128.

- [32] *O zabezpieczeniu roszczeń i sposobie jego szacowania w górnictwie odkrywkowym. Węgiel brunatny*, 2012, nr 8, s. 26–31.
- [33] *Finansowe skutki zobowiązania rekultywacji w górnictwie skalnym* (wsp. U. Kaźmierczak, P. Strzałkowski), *Górnictwo Odkrywkowe*, 2015, nr 5, s. 9–13.

25 YEARS PRESENT IN THE ANNUAL CONFERENCES ON “MINERAL AGGREGATES”

The article is a kind of summary of the author’s activity in annual conferences “Kruszywa Mineralne” (“Mineral Aggregates”) organized by SITG and the Wrocław University of Science and Technology and devoted to the issues of theory and practice of the mineral aggregates industry. The problems of cooperation between this industry and the process of educating mining engineers and the role of this conference for didactics and practice were presented. The author’s contribution to the content of this conference is presented in the form of papers, which are listed here as elements of a certain system of more general knowledge in the field of production management in the aggregates industry.

Piotr MATUSIAK
Daniel KOWOL
Rafał BARON

Instytut Techniki Górniczej KOMAG w Gliwicach

H2GEO – INNOWACYJNE TECHNOLOGIE PRZETWARZANIA I KIERUNKI WYKORZYSTANIA ODPADÓW POGÓRNICZYCH

Działalność górnicza generuje znaczne ilości odpadów, które składowane na hałdach; prowadzą do degradacji środowiska, zanieczyszczenia wód oraz emisji toksycznych gazów. W obliczu tych zagrożeń kluczowe staje się wdrażanie metod rekultywacji i ponownego wykorzystania odpadów zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. Prowadzone od wielu lat w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG badania nad rozdziałem i odzyskiem odpadów kopalnianych przyczyniły się do rozpoczęcia w 2023 r. projektu H2GEO, współfinansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali. Celem projektu jest opracowanie technologii umożliwiającej przetwarzanie odpadów kopalnianych na kompozyty geopolimerowe oraz produkcję wodoru poprzez zgazowanie frakcji energetycznych. Wdrożenie rezultatów projektu na efektywne wykorzystanie historycznych zasobów odpadów i zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko. Realizacja projektu przyczyni się do rekultywacji zdegradowanych terenów pogórnich, poprawy jakości środowiska oraz rozwoju nowych branż technologicznych.

1. WSTĘP

Działalność górnicza i eksploatacja złóż surowców mineralnych, w tym węgla kamiennego, generują znaczne ilości odpadów, które muszą być składowane na hałdach, które zajmują rozległe tereny, często przekształcając je w nieużytki i prowadząc do degradacji środowiska naturalnego. Składowiska odpadów górniczych stanowią istotny problem ekologiczny i przestrzenny, ponieważ nie tylko ograniczają dostępność gruntów do innych celów, ale również mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi i funkcjonowania lokalnych ekosystemów.

Jednym z głównych problemów związanych z hałdami odpadów pochodzących z eksploatacji węgla kamiennego jest zanieczyszczenie wód gruntowych i powierzchniowych. Wskutek procesów wymywania, do środowiska przedostają się metale ciężkie, siarczany i chlorki, które mogą powodować długotrwałe skażenie zasobów wodnych.

Ponadto, odpady te często zawierają substancje łatwo utleniające się, jak węgiel i piryt, co może prowadzić do ich spontanicznego samozapłonu. W efekcie do atmosfery uwalniane są toksyczne gazy, w tym tlenki siarki, które przyczyniają się do pogorszenia jakości powietrza.

Skutki środowiskowe składowania odpadów górniczych są wielowymiarowe – od degradacji gleby i zmniejszenia bioróżnorodności po negatywny wpływ na zdrowie mieszkańców terenów sąsiadujących. Dodatkowo, obecność rozległych składowisk odpadów znacząco obniża walory krajobrazowe i może negatywnie wpływać na rozwój społeczno-gospodarczy regionów górniczych. W obliczu tych zagrożeń konieczne jest wdrażanie skutecznych metod rekultywacji terenów pogórnich obejmujących zarówno działania techniczne, jak i biologiczne.

W ramach dążeń do zrównoważonego rozwoju oraz ochrony środowiska, coraz większy nacisk kładzie się na efektywne zarządzanie zasobami i minimalizowanie wpływu działalności człowieka na przyrodę. W kontekście górnictwa, szczególnie w odniesieniu do odpadów górniczych, kluczowym zagadnieniem staje się wykorzystanie odpadów jako surowców wtórnych w ramach zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, tj. wykorzystywania zasobów w sposób maksymalnie efektywny dla ich ponownego wprowadzenia do obiegu.

Odzysk i ponowne wykorzystanie odpadów niesie ze sobą wiele korzyści. Po pierwsze zmniejszeniu ulega zapotrzebowanie na wydobycie nowych surowców naturalnych co ogranicza degradację środowiska związaną z ich wydobyciem. Kolejną zaletą przetwarzania odpadów zalegających składowiska jest stała redukcja zagrożeń środowiskowych. Wykorzystanie odpadów zamiast ich składowania umożliwia również zmniejszenie zajmowanej przez nie powierzchni, co z kolei umożliwia przywrócenie tych terenów do innych celów użytkowych, jak tereny rekreacyjne, rolnicze czy budowlane, a także poprawia walory krajobrazowe.

2. CEL PROJEKTU H2GEO

Duża liczba składowisk odpadów górniczych węgla kamiennego zajmujących znaczne obszary oraz ich negatywny wpływ na środowisko sprawiają, że niezbędne jest ich efektywne rekultywowanie. W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG od wielu lat prowadzone są prace, których celem jest rozdział i odzysk odpadów górniczych deponowanych na składowiskach [1–4]. Analiza stanu istniejącego wskazała na zasadność realizacji prac umożliwiających rozwój dostępnych i opracowanie nowych metod przetwarzania, odzysku i ponownego wykorzystania materiałów zalegających składowiska odpadów górniczych, w aspekcie wymagań GOZ i w sposób przyjazny dla środowiska [5–8].

W 2023 r. Instytut Techniki Górniczej wraz z partnerami krajowymi i międzynarodowymi rozpoczął realizację projektu dofinansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali (RFCS) – *New technology for hydrogen and geopolymer composites production*

from post-mining waste – Nowa technologia produkcji wodoru i kompozytów geopolimerowych z odpadów pogórnich [9]. Celem projektu o akronimie H2GEO jest opracowanie kompleksowej technologii zagospodarowania hałd pokopalnianych w myśl gospodarki obiegu zamkniętego.

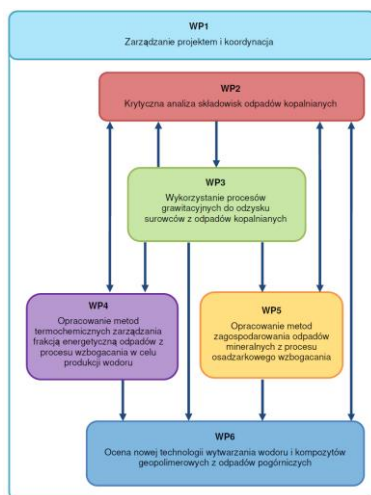
W skład konsorcjum projektowego wchodzi:

Instytut Techniki Górniczej KOMAG – Lider Konsorcjum, Główny Instytut Górnicztwa – Państwowy Instytut Badawczy, Institute of Construction and Architecture of SAS (Słowacja), Instytut Technologii Paliw i Energii, VSB – Technical University of Ostrava, Politechnika Wrocławska, Haldex S.A. – partner przemysłowy.

Projekt H2GEO zaprezentuje rozwiązanie umożliwiające wykorzystanie historycznych zasobów odpadów górniczych, promując recykling odpadów i identyfikując nowe możliwości rynkowe. Główną ideą projektu jest wykorzystanie wydzielonych frakcji mineralnych z dodatkiem popiołu lotnego oraz wykorzystaniem (utyлизacją) CO₂ do produkcji kompozytów geopolimerowych. Równie ważnym aspektem projektu jest określenie możliwości pozyskiwania wodoru ze zgazowania frakcji energetycznych. Wysoką jakość surowców do produkcji geopolimerów i wodoru zapewni zastosowanie innowacyjnego mobilnego separatora do przetwarzania odpadów kopalnianych.

3. ZAKRES PROJEKTU H2GEO

Projekt złożony jest z sześciu głównych pakietów roboczych, których układ i współzależność przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat współpracy w projekcie H2GEO
Fig. 1. The scheme of collaboration in the H2GEO project

W kolejnych punktach opisano cele szczegółowe każdego pakietu oraz przedstawiono najważniejsze informacje o wykonywanych i zaplanowanych pracach.

3.1. ZARZĄDZANIE PROJEKTEM I KOORDYNACJA (PAKIET 1)

Celem tego pakietu jest koordynacja i zarządzanie projektem H2GEO dla zapewnienia skutecznej komunikacji pomiędzy partnerami, realizacji kolejnych pakietów roboczych i terminowego dostarczania raportów technicznych i finansowych. Niezwykle istotnym aspektem jest rozpowszechnianie wyników projektu, które odbywa się licznymi formami rozpowszechniania w postaci strony internetowej projektu, publikacji i prezentacji oraz warsztatów.

3.2. KRYTYCZNA ANALIZA SKŁADOWISK ODPADÓW KOPALNIANYCH (PAKIET 2)

W ramach projektu dokonano inwentaryzacji czynnych i zrekultywowanych składowisk odpadów wydobywczych w wybranych krajach Europy, która pozwoliła na pozyskanie szczegółowych informacji dotyczących m.in. lokalizacji, wolumenu składowanych odpadów i ewentualnych stwierdzonych ryzyk środowiskowych. Pozyskane dane mogą stanowić cenne źródło informacji dla realizacji i po zakończeniu projektu, wspierając działania mające na celu zrównoważony rozwój społeczności lokalnych, ochronę środowiska oraz poprawę efektywności ekonomicznej poprzez odzysk surowców i ich przemysłowe wykorzystanie.



Rys. 2. Przykładowy widok składowiska odpadów górniczych [10]
Fig. 2. Example view of a mining waste dump [10]

Przeprowadzono szczegółowe analizy laboratoryjne prób materiałów zalegających składowiska (hałdy) dla określenia ich właściwości w aspekcie możliwości ich ponownego przemysłowego wykorzystania.

Ponadto opracowywana jest baza danych, której celem jest ciągła archiwizacja odpowiednich danych pomiarowych i obliczeniowych z projektu.

3.3. WYKORZYSTANIE PROCESÓW GRAWITACYJNYCH DO ODZYSKU SUROWCÓW Z ODPADÓW KOPALNIANYCH (PAKIET 3)

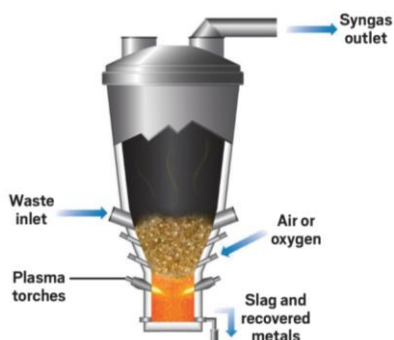
Zaplanowane rozwiązania wymagały potwierdzenia możliwości ich wprowadzenia, dlatego w trakcie projektu wykonano badania gęstościowego rozdziału odpadów w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie wpływu wybranych parametrów procesowych na skuteczność rozdziału odpadów oraz umożliwiły wstępny dobór rozwiązań konstrukcyjnych dla nowego urządzenia przemysłowego.

Aktualnie opracowywany jest projekt przemysłowego mobilnego systemu do rozdziału odpadów górniczych, którego zasada działania opiera się wykorzystaniu różnic w gęstościach poszczególnych ziaren odpadów, a ich rozdział następuje w pulsującym ośrodku wodnym. Opracowana jednostka będzie wyposażona w innowacyjny system sterowania, który umożliwi skuteczną separację odpadów i pozyskiwanie wysokojakościowych produktów umożliwiających ich wykorzystanie dla dalszego przetwarzania.

3.4. OPRACOWANIE METOD TERMOCHEMICZNYCH ZARZĄDZANIA FRAKCJĄ ENERGETYCZNĄ ODPADÓW W CELU PRODUKCJI WODORU (PAKIET 4)

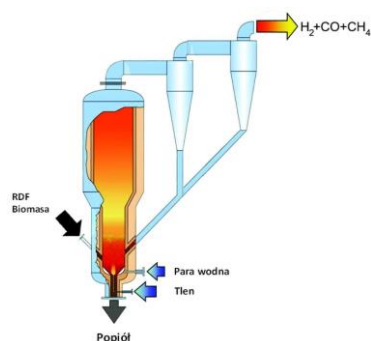
Jednym z głównych celów tego projektu jest opracowanie i optymalizacja metody umożliwiającej produkcję wodoru o wysokiej wartości z frakcji zawierających węgiel pozyskanych w procesie wzbogacania odpadów kopalnianych.

Produkcja wodoru wymaga wcześniejszego zgazowania materiału węglonośnego w celu pozyskania gazu syntezowego, tzw. syngazu, złożonego z wodoru i tlenku węgla. Proces zgazowania frakcji węglonośnych jest testowany przy użyciu dwóch metod: zgazowania plazmowego metodą VSB oraz zgazowania w reaktorze fluidalnym.



Rys. 3. Schemat reaktora do zgazowania plazmowego [11]

Fig. 3. Diagram of the plasma gasification reactor [11]



Rys. 4. Schemat reaktora zgazowania ze złożem fluidalnym [12]

Fig. 4. Diagram of gasification reactor with a fluidized bed [12]

3.5. OPRACOWANIE METOD ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW MINERALNYCH Z PROCESU OSADZARKOWEGO WZBOGACANIA (PAKIET 5)

Głównym kierunkiem prac badawczych w zakresie wykorzystania wydzielonych frakcji mineralnych jest opracowanie nowej technologii produkcji geopolimerów, które dzięki swoim właściwościom mechanicznym i odporności na działanie czynników atmosferycznych, mogą znaleźć zastosowanie w budownictwie i inżynierii lądowej, zastępując tradycyjne materiały cementowe.



Rys. 5. Przykład kostek geopolimerowych [13]

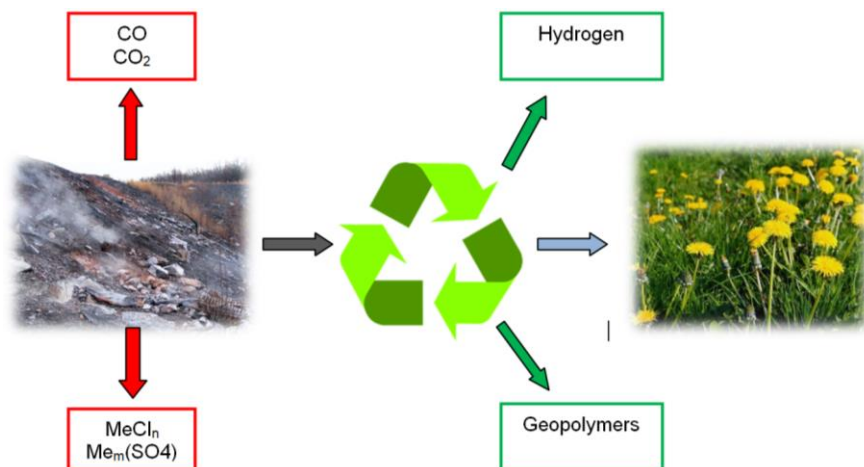
Fig. 5. An example of geopolymer cubes [13]

Na podstawie określonych właściwości produktów wzbogacania zostaną wskazane także inne kierunki zagospodarowania odpadów wydobywczych. Przeanalizowane zostaną możliwości ich wykorzystania do produkcji materiałów budowlanych i drogowych, w inżynierii środowiska i górnictwie, rolnictwie i rekultywacji gruntów. Przewidziano również opracowanie technologii rekultywacji gleby po zakończeniu zagospodarowania składowiska, przy wykorzystaniu do tego celu bioodpadów.

3.6. OCENA NOWEJ TECHNOLOGII WYTWARZANIA WODORU I KOMPOZYTÓW GEOPOLIMEROWYCH Z ODPADÓW POGÓRNICZYCH (PAKIET 6)

Wyniki prac uzyskane w trakcie realizacji projektu zostaną wykorzystane dla osiągnięcia najważniejszego celu – opracowania koncepcji pełnego łańcucha technologicznego do produkcji wodoru i geopolimerów z przetwarzanych z hałd odpadów górniczych na skalę komercyjną. Opracowany zostanie schemat technologii, podstawowe parametry technologiczne, opis obiektów i urządzeń, charakterystyka produktów energetycznych i surowców mineralnych, ogólny bilans masowy i energetyczny dla proponowanej koncepcji technologicznej.

Określone zostaną ekonomiczne, ekologiczne, społeczne i prawne aspekty opracowanej technologii przetwarzania hałd w zakresie wytwarzania kompozytów geopolimerowych i wodoru z odpadów górniczych.



Rys. 6. Wpływ rozwiązań technologicznych w projekcie H2GEO
 Fig. 6. Effect of technological solutions in the H2GEO project

4. PODSUMOWANIE

Opracowanie w ramach projektu H2GEO i wdrożenie kompleksowej technologii przetwarzania odpadów zalegających w składowiskach kopalnianych powinno spowodować intensyfikację działań w zakresie rekultywacji zdegradowanych terenów pogórnich, co ma kluczowe znaczenie dla poprawy jakości środowiska naturalnego oraz odzyskiwania cennych zasobów. Zastosowanie nowoczesnych metod technologicznych pozwoli na skuteczne wykorzystanie odpadów kopalnianych, które dotychczas stanowiły obciążenie dla środowiska, przekształcając je w użyteczne materiały. Opracowanie efektywnych procesów przetwarzania tych odpadów, jak produkcja geopolimerów i wodoru, nie tylko przyczyni się do zmniejszenia ilości odpadów, ale także zapewni wykorzystanie alternatywnych surowców, zmniejszając tym samym presję na zasoby naturalne.

Dodatkowo, wdrożenie technologii zgodnych z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym umożliwi ponowne wykorzystanie materiałów odpadowych, co jest zgodne z globalnym trendem zrównoważonego rozwoju. Dzięki temu procesy przemysłowe staną się bardziej ekologiczne, a konieczność eksploatacji nowych zasobów naturalnych zostanie zminimalizowana. Opracowanie metod przetwarzania odpadów w ramach projektu H2GEO będzie miało także wpływ na rozwój nowych branż, jak produkcja energii z wodoru czy przemysł geopolimerów, co otworzy nowe możliwości rynkowe i technologiczne.

Konsekwentnie prowadzona rekultywacja składowisk kopalnianych, dzięki innowacyjnym rozwiązaniom, pozwala na systematyczną redukcję zagrożeń środowi-

skowych związanych z niekontrolowanym składowaniem odpadów. Zrehabilitowane tereny będą mogły zostać ponownie zagospodarowane, co przyczyni się do poprawy jakości życia w tych obszarach, umożliwiając ich wykorzystanie do celów rolniczych, leśnych, a także jako przestrzeń dla inwestycji przemysłowych lub rekreacyjnych. Długofalowo projekt H2GEO ma zatem na celu nie tylko poprawę stanu środowiska, ale także przekształcenie zdegradowanych terenów w przestrzeń o wartości użytkowej i ekologicznej, co będzie miało pozytywny wpływ na rozwój regionów pogórnich.

LITERATURA

- [1] KOWOL D., MATUSIAK P., *Use of a jig beneficiation process for obtaining mineral raw materials*, IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, 2019, Vol. 545.
- [2] KOWOL D., MATUSIAK P., ŁAGÓDKA M., *Badania laboratoryjne skuteczności osadzarkowego wzbogacania odpadów powęglowych w klasach ziarnowych 35–3 mm oraz 35–0 mm*, Maszyny Górnicze, 2017, nr 2, 3–15.
- [3] MATUSIAK P., KOWOL D., *Zastosowanie inteligentnych rozwiązań w procesach produkcji kruszyw mineralnych*, [w:] W. Glapa (red.), *Kruszywa mineralne*, t. 2, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2023, 133–142.
- [4] MATUSIAK P., KOWOL D., *Technologia odzysku koncentratu węglowego z odpadów pogórnich przez wdrożenia urządzeń typu KOMAG*, Maszyny Górnicze, 2017, nr 2, 42–52.
- [5] GALOS K., SZLUGAJ J., *Wastes from mining industry and from hard coal processing as materials for production of mineral aggregates*, Cuprum, 2012, No. 4 (65), 79–93.
- [6] MABROUM S., MOUKANNA S., EL MACHI A., TAHA Y., BENZAAZOUA M., HAKKOU R., *Mine wastes based geopolymers: A critical review*, Cleaner Engineering and Technology, 2020, Vol. 1, 100014.
- [7] MIDILLI A., KUCUK H., TOPAL M., AKBULUT U., DINCER I., *A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities*, International Journal of Hydrogen Energy, 2021, Vol. 46, Issue 50, 25385–25412.
- [8] ZÁSTĚROVÁ P., MARSCHALKO M., NIEMIEC D., DURĐÁK J., BULKOR., VLČEK J., *Analysis of Possibilities of Reclamation Waste Dumps after Coal Mining*, Procedia Earth and Planetary Science, 2015, Vol. 15, pp. 656–662.
- [9] MATUSIAK P., KOWOL D., *Nowa technologia wytwarzania wodoru i kompozytów geopolimerowych z odpadów pogórnich. KOMEKO 2023*, Konferencja Naukowo-Techniczna Przemysł Przyjazny dla Środowiska, Gliwice 2023, 68–79.
- [10] <https://www.slaskibiznes.pl/wiadomosci,raport-nik-czy-haldy-stanowia-zagrozenie,wia5-1-1240-1.html> [dostęp: 7.03.2025].
- [11] <https://www.nucoal.pl/> [dostęp: 7.03.2025].
- [12] <https://cen.acs.org/articles/94/i15/Air-Products-retreats-wasteenergy.html> [dostęp: 7.03.2025].
- [13] <https://housing.com/news/geopolymer-concrete/> [dostęp: 7.03.2025].

H2GEO project has received funding from the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under GRANT AGREEMENT No. 101112386.

Praca naukowa opublikowana w ramach projektu międzynarodowego współfinansowanego ze środków programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pn. „PMW” w latach 2023–2026; umowa nr 5676/FBWiS/2023/2024/2.



**Co-funded by
the European Union**



H2GEO – INNOVATIVE PROCESSING TECHNOLOGIES AND DIRECTIONS FOR THE UTILIZATION OF POST-MINING WASTE

Mining activities generate significant amounts of waste, which, when stored in heaps, lead to environmental degradation, water contamination, and the emission of toxic gases. In light of these threats, the implementation of reclamation methods and the reuse of waste in accordance with the principles of a circular economy has become crucial. Research conducted for many years at the KOMAG Institute of Mining Technology on the separation and recovery of mining waste contributed to the launch of the H2GEO project in 2023, co-financed by the Research Fund for Coal and Steel. The aim of the project is to develop a technology that enables the processing of mining waste into geopolymer composites and the production of hydrogen through the gasification of energy fractions. The implementation of the project results will allow for the effective utilization of historical waste resources and the reduction of their negative environmental impact. The project's realization will contribute to the reclamation of degraded post-mining areas, the improvement of environmental quality, and the development of new technological sectors.

Przemysław MOCZKO¹
Adam BAJCAR²
Marcin BARANOWSKI³
Marek CAŁA⁴
Przemysław SZULC⁵
Jędrzej WIĘCKOWSKI¹
Tomasz ZAWADZKI³

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny

² Poltegor-Institut – Instytut Górnictwa Odkrywkowego

³ Kopalnie Odkrywkowe Surowców Drogowych S.A. w Niemodlinie

⁴ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

⁵ Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny

WYKORZYSTANIE TERENÓW POGÓRNICZYCH NA POTRZEBY MAGAZYNOWANIA ENERGII

Magazynowanie energii odgrywa ważną rolę w procesie transformacji energetycznej. Niedostateczna dostępność lub brak skutecznych rozwiązań w tym zakresie jest barierą dla rozwoju zeroemisyjnych systemów energetycznych. W perspektywie średnio- i długoterminowej znaczna część energii zużywanej w Europie będzie pochodzić z energii elektrycznej wytwarzanej z niestabilnych źródeł odnawialnych. Z tego względu niezbędne jest wielokrotne zwiększenie potencjału magazynowania energii w systemie elektroenergetycznym. Jedną z możliwości jest wykorzystanie terenów pokopalnianych na magazyny energii. W pracy przedstawione zostały alternatywne metody magazynowania energii, możliwe do wykorzystania właśnie w takich lokalizacjach.

1. WSTĘP

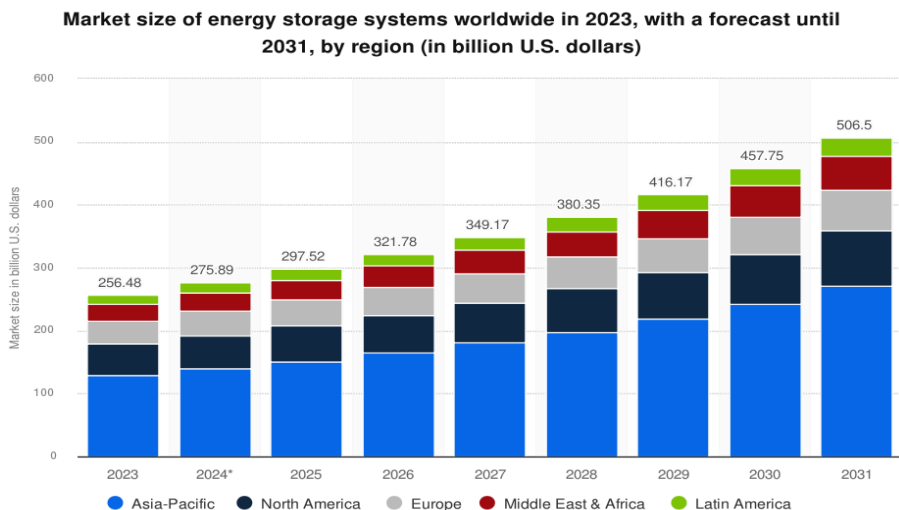
W dobie trwającej transformacji energetycznej kluczowe jest poszukiwanie sprawnych i ekologicznych sposobów magazynowania energii. Brak skutecznych rozwiązań w tym zakresie może nie tylko utrudniać ale i blokować transformację energetyczną. Wystarczy przypomnieć sytuację, jaka miała miejsce w Niemczech w 2016 r., kiedy nadwyżka energii w wysokości 12 GW wynikająca z wyjątkowo słonecznego i wietrznego dnia kosztowała 21 mln € za zaledwie jeden dzień. W ostatnim czasie w sezonie letnim, również w Polsce obserwowane jest zjawisko odłączania źródeł energii odnawialnej, ze względu na nadpodaż energii i brak możliwości jej zmagazynowania. Maga-

zynowanie energii staje się więc jednym z kluczowych obszarów rozwoju systemów elektroenergetycznych, których ostatecznym celem jest osiągnięcie neutralności do 2050 roku.

Rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) wymaga znacznie bardziej elastycznych systemów energetycznych niż istniejące, aby ustabilizować nierównomierną produkcję energii i popyt oraz zapewnić bezpieczeństwo dostaw. Zgodnie z badaniem Komisji Europejskiej [1] – „Odpowiednie wdrożenie technologii magazynowania energii ma pierwszorzędne znaczenie dla przejścia na system energetyczny, który w dużym stopniu opiera się na zmiennych technologiach OZE”.

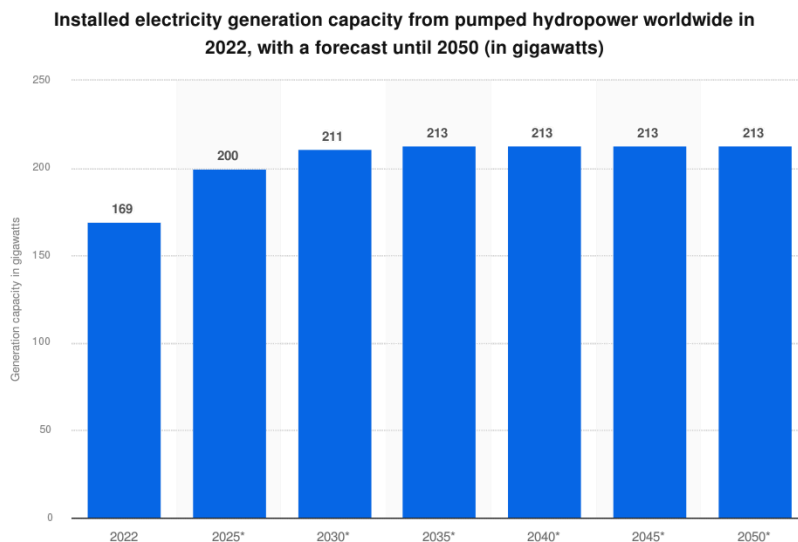
Mając na uwadze te potrzeby, konieczne jest rozwijanie istniejących, jak i nowych technologii magazynowania energii. Oczekuje się, że do 2050 r. globalne zapotrzebowanie na moc magazynowania energii wzrośnie do ok. 600 GW [2], ze względu na utratę dostaw energii z elektrowni węglowych i gazowych oraz rosnący udział odnawialnych, mniej stabilnych źródeł energii, a także ze względu na powiększające się zapotrzebowanie energetyczne wynikające z potrzeb chłodzenia/klimatyzowania, digitalizację, przechowywanie danych i sztuczną inteligencję.

Z dostępnych danych wynika, że rynek magazynów energii dla rynku europejskiego wzrośnie do poziomu 65,43 bln \$ w 2031 r. z poziomu 35,72 bln \$ w 2023 r. (rys. 1). W tym źródle znajdują się też dane dotyczące zainstalowanej mocy wytwórczej energii pochodzącej z elektrowni szczytowo-pompowych. Z dostępnych informacji wynika, że w 2022 r. wynosiła ona 169 GW i wzrośnie do poziomu 213 GW w 2035 r. (rys. 2) i nie będzie już rosła [4]. Spowodowane to jest głównie tym, że większość ekonomicznie opłacalnych lokalizacji została już wykorzystana.



Rys. 1. Prognoza wielkości rynku magazynowania energii [3]

Fig. 1. Energy Storage Market Size Forecast [3]



Rys. 2. Prognoza zwiększania mocy elektrowni wodnych

Fig. 2. Forecast of the electricity generation capacity from hydroelectric power plants

Analiza stanu obecnego i przewidywań rozwoju rynku magazynowania energii wskazują jednoznacznie na potrzebę poszukiwania nowych rozwiązań w tym zakresie lub rozwijania istniejących, w celu sprostania przyszłym potrzebom systemów elektroenergetycznych [5].

2. OBECNIE STOSOWANE ROZWIĄZANIA MAGAZYNOWANIA ENERGII

Obecne i dojrzałe technologie opierają się przede wszystkim na magazynowaniu hydroelektrycznym (PHS), którego szacowany globalny udział w magazynowaniu energii wynosi ok. 98%, dając ponad 180 GW zainstalowanej mocy światowej [6]. Jak wspomniano, prognoza globalnej mocy magazynowania energii ma wzrosnąć o ponad 50% w ciągu najbliższych pięciu lat [7]. Zgodnie z tą prognozą technologia PHS będzie miała największy w tym udział, jednak możliwość dalszego rozwoju jest ograniczona. Z tego względu na popularności zyskują inne technologie magazynowania. Obecnie notowany jest duży wzrost instalacji wykorzystujących technologie chemiczne w postaci akumulatorów. W tym zakresie klasyczna technologia kwasowych akumulatorów została wyparta przez technologię Li-Ion. Do jej zalet można zaliczyć: dużą gęstość energii, elastyczność w zakresie pojemności, niskie koszty utrzymania, a wśród głównych wad: potrzebę monitorowania temperatury, ograniczone zasoby litu i kobaltu,

utrata sprawności i wymagający recykling. Magazyny chemiczne uzyskują moce maksymalne do kilkuset MW i wartość ta rośnie.

Pozostałe, obecnie stosowane technologie magazynowania energii mają bardzo mały udział w rynku. Można tu wymienić technologie bazujące na energii kinetycznej wirujących mas (FES) z udziałem ok. 0,4%, czy magazyny gromadzące energię sprężonego powietrza (CAES) z udziałem ok. 0,3 [8].

Obecnie prowadzone są intensywne prace nad wykorzystaniem wodoru do celów magazynowania energii. Pełen cykl magazynowania w tym przypadku wykorzystuje dwie technologie: produkcja wodoru w procesie elektrolizy, przy wykorzystaniu energii elektrycznej (Power-to-Gas P2G) – ładowanie magazynu i następnie wykorzystanie ogniw paliwowych zasilanych zmagazynowanym wodorem do produkcji energii elektrycznej – rozładowanie magazynu. Do zalet tego rozwiązania należy zaliczyć m.in. dużą gęstość energii oraz neutralność samego wodoru dla środowiska (zwłaszcza, w przypadku zastosowania elektrolizy). Istotną słabością tej technologii jest jednak jej niska sprawność całkowita, dochodząca do ok. 45%. Technologia ta może jednak być stosowana w dużej skali, porównywalnej z technologią PHS.

Technologia grawitacyjnego magazynowania energii jest również szeroko rozwijana, głównie na etapie instalacji doświadczalnych. Zasada działania polega na gromadzeniu energii potencjalnej poprzez przemieszczanie w pionie masy, a następnie jej zamiana w energię elektryczną podczas przemieszczania tej masy w dół.

Z powyższego przeglądu stanu wiedzy i techniki wynika, że rozwój alternatywnych metod magazynowania energii lub rozwijanie istniejących, np. magazynów grawitacyjnych (GES) lub szczytowo pompowych (PHS), jest wyzwaniem, które należy podjąć, w celu odpowiedzi na potrzeby transformacji energetycznej w skali lokalnej i globalnej. Dotyczy to zarówno opracowania nowych, jak również rozwoju istniejących technologii i wykorzystanie ich w sprzyjających do tego celu nowych lokalizacjach.

W artykule przedstawiono koncepcje wykorzystania wyeksploatowanych kopalni odkrywkowych jako potencjalne miejsca na magazyny energii. Opisana koncepcja jest rozwijana w ramach europejskich programów badawczo rozwojowych CETPartnership Joint Call 2023 i Coal and Steel.

3. MAGAZYNY ENERGII NA TERENACH POGÓRNICZYCH

Proces eksploatacji złóż powoduje nieuniknione przekształcanie terenu na obszarze wydobywania kopalin. Zmiany terenu na cele wydobywcze wymagają po wyeksploatowaniu przeprowadzenia procesu rekultywacji, celem zabezpieczenia obszaru przed dalszą jego degradacją. Szczególnie ważny jest ten proces w kopalniach odkrywkowych. Rekultywacja może polegać na przywróceniu terenu do stanu pierwotnego przez zasypianie wyrobiska, jego częściowe wyplącenie i zalanie wodą najczęściej pochodzącą z wcześniej pompowanych wód gruntowych.

Autorzy artykułu proponują kierunkową rekultywację terenów pogórnich. Zakłada ona dwa warianty opisane poniżej warianty:

- 1) przekształcanie kopalni odkrywkowej w małej lub średniej wielkości szczytowo-pompowej magazyn energii,
- 2) przekształcenie kopalni w grawitacyjny magazyn energii.

3.1. WYSOKOSPRAWNE MAGAZYNY SZCZYTOWO-POMPOWE MAŁEJ I ŚREDNIEJ WIELKOŚCI

Dominującym sposobem magazynowania dużej ilości mocy i energii jest wykorzystanie technologii szczytowo-pompowej. Jednak obecny stan techniki preferuje budowę właśnie większych obiektów, ze względu na oczekiwaną opłacalność inwestycji. Jak wspomniano, technologia PHS wymaga dużych nakładów inwestycyjnych, które przy małej skali instalacji mogą uniemożliwić uzyskanie oczekiwanej stopy zwrotu. Autorzy artykułu dostrzegli jednak możliwość budowy tanich i wysokosprawnych szczytowo-pompowych magazynów energii wykorzystując sprzyjające warunki geotechniczne i hydrologiczne, występujące często na terenach pogórnich. Na takich terenach zazwyczaj istnieje „naturalny” zbiornik dolny magazynu, co istotnie zmniejsza koszt budowy. Natomiast zbiornik górny możliwy jest do wykonania w dogodnej lokalizacji wokół kopalni. Takie wykorzystanie terenów pogórnich wymaga jednak indywidualnego podejścia do każdej potencjalnej lokalizacji. Autorzy artykułu widzą potrzebę opracowania narzędzia do oceny potencjału wykorzystania danej lokalizacji dla małej lub średniej wielkości elektrowni szczytowo-pompowej jako magazynu energii. Efektem jego działania będzie określenie czy dana lokalizacja, z punktu widzenia możliwości magazynowania energii oraz opłacalności ekonomicznej, może zostać wykorzystana do przekształcenia w magazyn energii.

Drugim ważnym aspektem takich działań jest opracowanie typoszeregu wysokosprawnych zespołów szczytowo-pompowych PAT (pompa jako turbina). Pozwoli to na obniżenie kosztów inwestycyjnych i jednocześnie zapewni niskie koszty eksploatacji, przy wysokich sprawnościach w obu stanach pracy pompowej i turbinowej.

Obserwowany jest wzrost zainteresowania magazynowaniem energii PHS na mniejszą skalę, które można zainstalować nawet w budynkach. W Froyennes (Belgia) mały system PHS jest budowany w centrum innowacji Negundo. Składa się on z górnego zbiornika o pojemności 1500 m³ i dolnego 625 m³, przy dostępnej różnicy poziomów od 6 do 10 m. System jest wyposażony w jednostopniową pompę odśrodkową o mocy 10,5 kW, zapewniającą sprawność hydrauliczną 83% w trybie pompowym i 73% w turbinowym.

Inne podejście do wykorzystania magazynów PHS na małą skalę przedstawiono w publikacji [9] – dwie lokalizacje w Val de Bagnes w kantonie Valais w Szwajcarii o mocy hydraulicznej ok. 5 i 10 MW. Przybliżony koszt inwestycji wynosi ok. 2 €/W,

co jest podobne do PHS na dużą skalę. Istnieją jednak wyzwania, które należy pokonać, aby skutecznie wykorzystać technologię PHS na małą i średnią skalę. Najbardziej racjonalną konstrukcją, biorąc pod uwagę aspekty ekonomiczne, którą można zastosować w przypadku PHS na małą i średnią skalę, jest wykorzystanie pompy w pracy odwracalnej jako turbiny – PAT (pompa jako turbina). Z punktu widzenia ekonomicznego pompy pracujące jako turbiny, w zakresie 1–500 kW, mogą pozwolić na okresy zwrotu kapitału – 2 lata lub krócej, znacznie korzystniej niż w przypadku konwencjonalnej turbiny. Jeśli chodzi o konserwację, istnieje wiele zalet w porównaniu z unikatowymi turbinami wykonywanymi na zamówienie, które są projektowane dla konkretnych lokalizacji PHS ze względu na wymagania i warunki hydrologiczne oraz topologiczne.

W ramach programu CETPartnership Joint Call 2023 obecnie realizowany jest międzynarodowy projekt – „*Pumped HYDROelectric Storage in post MINEd areas to support regional net-zero emission energy systems development*” o akronimie HYDROMINE, skupiający się na takich celach, jak:

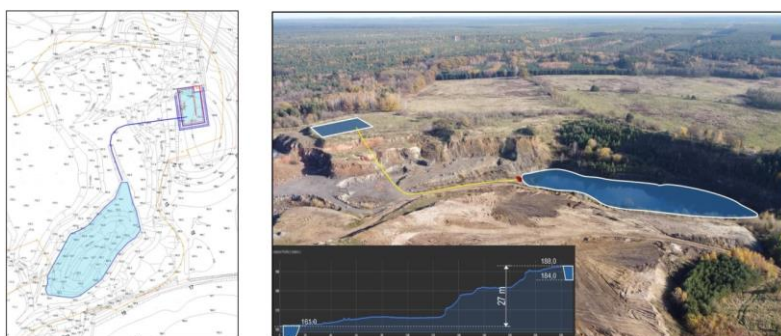
- Zbadanie europejskiego potencjału terenów pogórnich w zakresie magazynowania energii PHS i utworzenie bazy danych tych zasobów;
- Opracowanie wydajnej i opłacalnej technologii magazynowania energii wodnej szczytowo-pompowej na małą i średnią skalę, którą można zainstalować na terenach pogórnich oraz w innych dogodnych lokalizacjach;
- Przeprowadzenie analizy porównawczej i ocena tej technologii poprzez opracowanie i przetestowanie demonstratora PHS na małą skalę;
- Opracowanie kompleksowego narzędzia oceny potencjału terenów pogórnich oraz w innych dogodnych lokalizacji dla opracowanej technologii PHS na małą i średnią skalę.

Wizje rozwijanej technologii szczytowo-pompowej dedykowanej dla terenów pogórnich przedstawiono na rys. 3.

W ramach prowadzonych prac badawczo-rozwojowych powstanie demonstrator opisywanej technologii. Zostanie on zbudowany i przetestowany na terenie Kopalni Odkrywkowej Surowców Drogowych S.A. w Niemodlinie. W tym celu zostanie zbudowany kompletny układ magazynu szczytowo-pompowego, o mocy kilkudziesięciu kW. Jako dolny zbiornik zostanie wykorzystany istniejący w wyrobisku rezerwuuar o pojemności kilkuset tysięcy metrów sześciennych wody. Na potrzeby projektu zostanie zbudowany górny zbiornik o objętości ok. 15 tys. m³. W demonstratorze zostanie wykorzystany i przebadany dedykowany i opracowany przez autorów wysokosprawny zespół PAT. Zbiorniki górny i dolny będą połączone rurociągiem wykonanym z materiałów pochodzących w dużej części z recyklingu, co pozwoli na zmniejszenie negatywnego oddziaływania śladu węglowego dla takiej inwestycji. Na rysunku 4 przedstawiono lokalizację demonstratora. Zaznaczono na nim lokalizację obydwu zbiorników oraz planowany przebieg rurociągu łączącego zbiorniki.



Rys. 3. Wizualizacja wodnego magazynu energii na terenie kopalni odkrywkowej
Fig. 3. Visualisation of PHS storage application in the open pit mine



Rys. 4. Lokalizacja i wizualizacja demonstratora wodnego magazynu energii w KOSD Niemodlin S.A.
Fig. 4. Location and visualization of the PHS Demonstrator in the KOSD mine

Projekt HYDROMINE realizowany jest przez międzynarodowe konsorcjum naukowo-przemysłowe złożone z partnerów: Politechnika Wrocławska – Lider Konsorcjum, Technical University of Crete, Poltegor-Institut, Brown Coal Research Institute, j. s.c., KOSD Niemodlin S.A., University of Petrosani, Technische Universität Chemnitz, Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU.

3.2. GRAWITACYJNE MAGAZYNY ENERGII NA TERENACH POGÓRNICZYCH

Jedną z alternatywnych metod magazynowania energii, jest wykorzystanie siły grawitacji i zgromadzonej dzięki niej energii potencjalnej mas zmieniających swoje położenie w pionie. Technologia grawitacyjnego magazynowania energii (GES) jest obecnie rozwijana w postaci instalacji eksperymentalnych i pilotażowych. Głównie dotyczy

to rozwiązań bazujących na ruchu pionowym mas przy wykorzystaniu dźwigów, specjalistycznych konstrukcji wsporczych, czy też infrastruktury szybów górniczych (rys. 5).

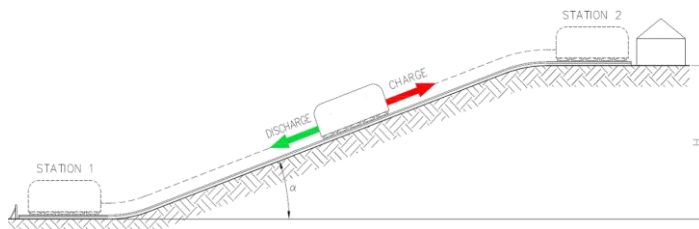


Rys. 5. Koncepty i pilotażowe projekty grawitacyjnych magazynów energii (GES)

– Energy Vault, Graviticity, Heindl's Gravity Storage
 Fig. 5. Gravity Energy Storage (GES) Concepts and pilot projects
 – Energy Vault, Graviticity, Heindl's Gravity Storage

Autorzy artykułu, podobnie jak w przypadku technologii PHS, widzą możliwość zastosowania tej technologii na terenach pogórnich, wykorzystując potencjał ukształtowania tych terenów. Propozycja wykracza poza stan techniki, wprowadzając innowacje w zakresie synergii wynikającej z wykorzystania magazynowania grawitacyjnego na terenach pogórnich, gdzie istnieje już podstawowa infrastruktura geotechniczna, a po drugie, energetyczna. Na świecie nie ma takich technologii magazynowania grawitacyjnego energii, stosowanych na terenach pogórnich, a proponowana duża skala takich jest również innowacyjna. Proponowana technologia częściowo wykorzystuje doświadczenia zdobyte już w ramach zakończonych badań i projektów pilotażowych. Są one częściową adaptacją znanych rozwiązań technicznych (akumulacja energii potencjalnej i jej konwersja za pomocą układów silnik/generator, przemiennik. Ideę tego rozwiązania pokazano na rys. 6. Ładowanie magazynu będzie polegało na

przemieszczaniu masy po szynach do górnej stacji 2, przy użyciu napędu elektromechanicznego zasilanego energią elektryczną. Odzyskiwanie energii będzie się odbywać poprzez ten sam napęd w trakcie kontrolowanego ruchu masy po szynach w kierunku dolnej stacji 1.



Rys. 6. Schemat działania grawitacyjnego magazynu energii RM-GES

Fig. 6. The idea of operation of the RM-GES gravity energy storage

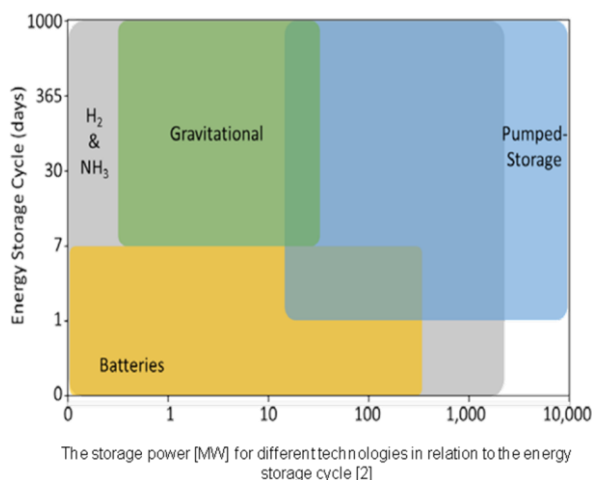
Przewidywana skala wielkości magazynów w tej technologii może być różna. Przykładowo, można uzyskać około 160 MW mocy z obszaru o powierzchni około 0,3 km², przy masie magazynu 3×4000 ton i różnicy poziomów 150 m. Wymagana powierzchnia terenu do magazynowania energii grawitacyjnej wynosi mniej niż 0,3 km². Wygenerowana moc ponad 160 MW i energia ok. 40 MWh z jednej lokalizacji, pozwala pozytywnie oceniać proponowaną technologię na obecnym etapie jej rozwoju. Możliwe też jest zastosowanie infrastruktury przekaźnikowej do magazynowania energii przy wykorzystaniu dostępnego w kopalni materiału (np. piasek, żwir itp.). W tym przypadku przekaźnik długości 1200 m o nachyleniu 14° i wydajności 15 000 t/godz. może uzyskać maksymalną moc elektryczną 10 MW i zmagazynować 120 MWh energii, a wymagana ilość materiału przez 12 godzin pracy wynosi 180 tys. ton.

W celu rozwoju tej technologii autorzy artykułu realizują projekt badawczo-rozwojowy w ramach europejskiego programu RFCS (Research Found for Coal and Steel) – „Gravitational Energy Storage in the Post-Mine Areas”, którego liderem jest Politechnika Wrocławska. Projekt pozwoli na opracowanie technologii grawitacyjnego magazynowania energii dedykowanej terenom pogórnym, zbadanie jej potencjału w Europie i demonstrację na małoskalowej instalacji w kopalni PGE GiEK Oddział KWB Turów.

4. PODSUMOWANIE

Potrzeba zwiększania mocy i pojemności magazynów energii jest obecnie jednym z kluczowych działań umożliwiających wykorzystanie większego udziału generacji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Obecna pojemność magazynów energii będzie musiała zostać powiększona kilkukrotnie, żeby sprostać celom neutralności

klimatycznej do 2050 r. Z tego względu zasadne jest poszukiwanie nowych i rozwijanie istniejących technologii magazynowania energii. Obecnie dominująca technologia szczytowo-pompowa PHS (rys. 7) posiada swoje ograniczenia i jej dalszy rozwój będzie mocno ograniczony. Zgodnie z dostępnymi danymi, rozwój ten zatrzyma się w latach trzydziestych (rys. 2).



Rys. 7. Udział i skala dostępnych lub rozwijających się technologii magazynowania energii
Fig. 7. Share and scale of available or developing energy storage technologies

Negatywnym skutkiem transformacji energetycznej może być degradacja społeczeństwa i obszarów obecnie wykorzystywanych do produkcji energii, jak węglowe kopalnie odkrywkowe i elektrownie konwencjonalne. Działania zmierzające do ponownego wykorzystania terenów pogórnich, na potrzeby magazynowania energii elektrycznej, będą więc częściowo minimalizowały to negatywne zjawisko i wpływały pozytywnie na społeczeństwo.

Zaproponowano dwie koncepcje bazujące na małej i średniej skali szczytowo-pompowych magazynach energii oraz koncepcję bazującą na grawitacyjnym sposobie magazynowania. Skala proponowanych rozwiązań to małej i średniej wielkości magazyny o mocy od kilkuset kilowatów do kilkudziesięciu megawatów. Mniejsza skala dotycząca technologii PHS, pozwoli na zlokalizowanie takich magazynów szczytowo-pompowych w wielu dogodnych, dotychczas nie rozważanych do tego celu terenach pogórnich. Wymaga to opracowania tanich, wysoko sprawnych i ekologicznych rozwiązań technicznych, które pozwolą na uzasadnione ekonomicznie zastosowanie proponowanej technologii.

Podobnie w przypadku grawitacyjnych magazynów energii, wykorzystanie korzystnego ukształtowania terenów pogórnich jest rozwiązaniem obniżającym koszty inwestycyjne budowy takich instalacji. Wstępna ocena obu proponowanych rozwiązań

daje pozytywne perspektywy ich rozwoju. Realizacja przedstawionych w artykule projektów badawczo-rozwojowych w europejskich programach CETPartnership i RFCS pozwoli na szczegółową ocenę i opracowanie obu proponowanych technologii magazynowania energii.

FINANSOWANIE

This research was funded by the CETPartnership, under the Joint Call 2023. The CETPartnership's research projects are co-funded by the European Commission (Grant Agreement No. 101069750) and the national funding organizations listed on the CETPartnership website.

Funded by the European Union under the Research Fund for Coal and Steel, Project: 101157790-GrEnMine-RFCS-2023.

LITERATURA

- [1] ANDREY C., BARBERI P., NUFFEL L., et al., *Study on energy storage – Contribution to the security of the electricity supply in Europe*, European Commission, Directorate-General for Energy, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/077257>
- [2] *Energy Storage Targets 2030 and 2050 Ensuring Europe's Energy Security in a Renewable Energy System*, European Association for Storage of Energy, 2022.
- [3] www.statista.com
- [4] ANEKE M., WANG M., *Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review*, Applied Energy, 2016, Vol. 179, 350–377, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
- [5] YANG T., MA CH., PEREZ-DIAZ J., PATELLI E., LIU CH., BI X., LIAN J., XU B., *Identifying the functional form and operation rules of energy storage pump for a hydro-wind-photovoltaic hybrid power system*, Energy Conversion and Management 2023, vol. 296. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117700>
- [6] REHMANA S., AL-HADHRAMIA LM., ALAM MM., *Pumped hydro energy storage system: A technological review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2015, Vol. 44, 586–598.
- [7] *How rapidly will the global electricity storage market grow by 2026?*, IEA, Paris 2021, <https://www.iea.org/articles/how-rapidly-will-the-global-electricity-storage-market-grow-by-2026>
- [8] MCILWAINE N. et al. *A state-of-the-art techno-economic review of distributed and embedded energy storage for energy systems*, Energy, 2021, 229, 120461.
- [9] PACOT O., MARTIGNONI S., SMATI L., DENIS V., MÜNCH-ALLIGNÉ C., *Case studies of small pumped storage*, LHB, 2022, DOI: 10.1080/27678490.2022.2101392.

USE OF POST-MINING AREAS FOR ENERGY STORAGE

Energy storage plays an important role in the energy transition process. Insufficient availability or lack of effective solutions in this area is a barrier to the development of zero-emission energy systems. In the medium to long term, a significant proportion of the energy consumed in Europe will come from electricity produced from intermittent renewable sources. For this reason, it is necessary to increase the energy storage potential in the power system many times over. One of the possibilities is to use post-mining areas for energy storage. The paper presents alternative methods of energy storage, which can be used in such locations.

Daniel SARAMAK
Agnieszka SARAMAK

AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

ANALIZA ENERGOCHŁONNOŚCI ROZDRABNIANIA METODĄ BONDA DLA PRODUKTÓW ROZDRABNIANIA WAPIENIA W WYSOKOCIŚNIENIOWEJ PRASIE WALCOWEJ

Artykuł dotyczy oceny wybranych efektów technologicznych i energetycznych produktów rozdrabniania wapienia w prasie walcowej. Ocena została dokonana w oparciu o uzyskane stopnie rozdrobnienia produktów oraz otrzymane wartości indeksu pracy Bonda. Badania przeprowadzono w laboratoryjnej prasie walcowej przy zmiennych wartościach ciśnienia roboczego oraz wilgotności materiału. Wyznaczone zostały modele matematyczne dla indeksu pracy Bonda oraz wybranych efektów technologicznych mierzonych stopniami rozdrobnienia oraz zawartościami ziaren drobnych w produkcie kruszenia, w zależności od ciśnienia w prasie i wilgotności materiału. W opracowaniu modeli wykorzystano metody regresji wielorakiej.

1. WSTĘP

Wysokociśnieniowe prasy walcowe (HPGR) pod względem energetycznym są bardzo efektywną technologią stosowaną w rozdrabnianiu surowców mineralnych, począwszy od mielenia klinkieru cementowego [2] i produkcji mączek mineralnych, aż po rozdrabnianie rud metali. W przeróbczych układach technologicznych prasy walcowe są często stosowane jako zamiennik kruszarek na drugim i trzecim stopniu rozdrabniania oraz młynów bębnowych domielających produkty kruszenia [1]. Jednymi z najistotniejszych i bezpośrednich korzyści z zastosowania pras HPGR w przeróbce surowców są uzyskiwane oszczędności energetyczne, co zostało potwierdzone wynikami licznych badań i przemysłowymi wdrożeniami [5].

Produkty rozdrabniania w prasach walcowych generalnie wykazują łatwiejszą mielność w operacjach mielenia w młynach, co wynika z niższej wartości wskaźnika pracy Bonda W_i – uzyskiwanego dla tych produktów [4].

Na efektywność pracy pras walcowych wpływa szereg parametrów operacyjnych samego urządzenia (np. ciśnienie operacyjne, prędkość obrotowa rolek, szczelina robocza), warunki prowadzenia procesu (np. rozdrabnianie w prasie w układzie otwar-

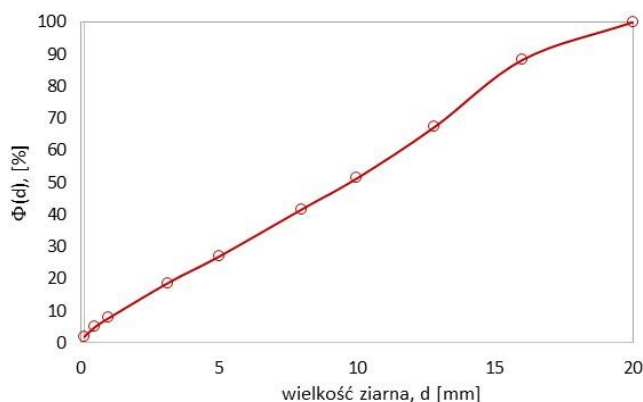
tym lub zamkniętym, odsiewanie lub nie z nadawy ziaren najdrobniejszych) oraz sama charakterystyka materiału (skład ziarnowy, wychody ziaren drobnych lub grubych, kształt ziaren, wilgotność materiału). W związku z powyższym uzyskanie pożądanych korzyści energetycznych lub technologicznych wynikających z aplikacji prasy walcowej do konkretnego układu przeróbki surowców zasadniczo wymaga przeprowadzenia analiz, testów wstępnych oraz odpowiedniego doboru parametrów operacyjnych prasy w zależności od charakterystyki rozdrabnianego materiału.

Należy też podkreślić, że prasy walcowe nie mogą być traktowane jako urządzenia uniwersalne, gdyż nie w każdym układzie rozdrabnianie ich zastosowanie może przynieść odpowiednio wysokie korzyści. Wynika to jednak często z nieodpowiedniego dostosowania urządzenia do specyfiki układu technologicznego.

Celem artykułu jest ocena uzyskiwanych wartości wskaźnika pracy Bonda W_i dla produktów rozdrabniania HPGR przy różnym ciśnieniu operacyjnym w prasie oraz różnej wilgotności materiału. Ocenie poddane zostały także wskaźniki technologiczne zdefiniowane jako stopnie rozdrobnienia.

2. PROGRAM BADAWCZY

Program badań obejmował testy w laboratoryjnej prasie walcowej w Katedrze Inżynierii Środowiska na Wydziale Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami AGH. Materiałem do badań był wapień uprzednio rozdrobniony w kruszarce szczękowej do maksymalnej wielkości ziarna 20 mm. Laboratoryjna prasa wykorzystana do testów posiada walce o okładzinach gładkich o średnicy 300 mm oraz szerokości 100 mm. Maksymalna siła nacisku do uzyskania, $F = 200$ kN, co odpowiada ciśnieniu F_{sp} wynoszącym ponad 6 N/mm².



Rys. 1. Skład ziarnowy nadawy do testów w prasie HPGR

Fig. 1. Particle size distribution of the feed material for HPGR tests



Rys. 2. Laboratoryjna prasa walcowa HPGR
Fig. 2. Laboratory HPGR press

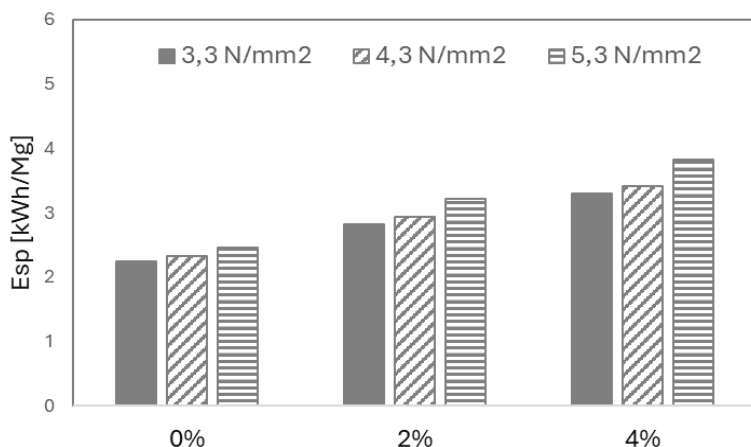
Program badań w HPGR obejmował 9 pojedynczych testów kruszenia przy 3 różnych poziomach siły nacisku F i 3 poziomach wilgotności materiału M . Oryginalna siła F została przeliczona na ciśnienie F_{sp} , którego wartości wyniosły: 3,3; 4,3 i 5,3 N/mm². Przeanalizowano poziomy wilgotności: 0,2 i 4%. Dla każdego produktu rozdrabniania HPGR wyznaczono wartość wskaźnika energochłonności Bonda W_i oraz obliczono stopień rozdrobnienia S20 oraz S50 i wychód ziaren poniżej 100 μ m. Wartość wskaźnika Bonda wyznaczono za pomocą wzoru (1).

$$W_i = \frac{16}{G^{0,82}} \cdot 1,1 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Mg}} \right]. \quad (1)$$

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. OCENA EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH

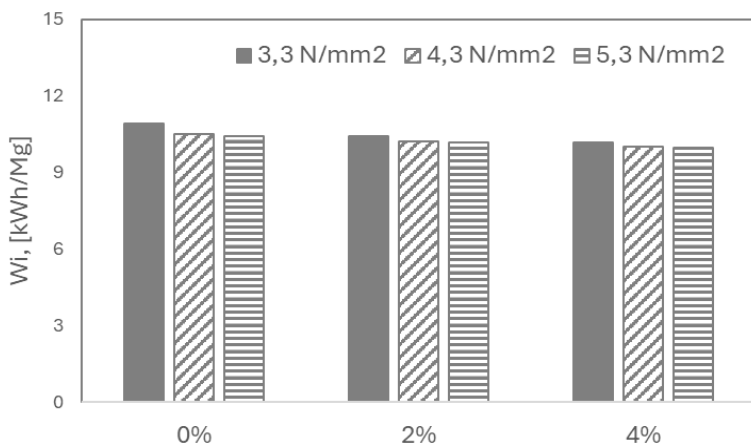
Na rysunku 3 przedstawiono jednostkową energochłonność dla prasy walcowej zarejestrowaną dla każdego testu.



Rys. 3. Energochłonność HPGR dla każdego testu
 Fig. 3. Specific Energy consumption in HPGR for individual test

Analizując wyniki przedstawione na rys. 3, można zauważyć, że jednostkowe zużycie energii w prasie walcowej jest ściśle związane z wartością ciśnienia F_{sp} , co jest logiczne. Okazuje się także, że wilgotność materiału wpływa proporcjonalnie na energochłonność procesu, w następujący sposób – im bardziej wilgotny materiał, tym wyższe jednostkowe zużycie energii w prasie.

Zasadniczym celem artykułu było wyznaczenie wartości wskaźników pracy Bonda dla wszystkich produktów rozdrabniania w prasie walcowej. W tym celu wykonano analizę energochłonności według procedury opracowanej przez Bonda [3] i obliczono poszczególne wartości korzystając ze wzoru (1). Wyniki przedstawione są na rys. 4.



Rys. 4. Wartości wskaźników pracy Bonda dla produktów HPGR
 Fig. 4. Values of Bond working indices for HPGR products

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości ciśnienia operacyjnego a HPGR wartość indeksu pracy Bonda obniża się (rys. 4). Na redukcję wskaźnika W_i wpływ ma też wilgotność materiału, i ta zależność jest odwrotna, tzn. wraz ze wzrostem wilgotności wartość wskaźnika Bonda maleje. Ogólnie można stwierdzić, że redukcja wskaźnika pracy Bonda wynosiła średnio 5%, w zależności od warunków prowadzenia procesu. Tak niska wartość znajduje w pewnym stopniu odzwierciedlenie w literaturze, gdyż obniżka wartości wskaźnika pracy Bonda W_i dla produktów rozdrabniania HPGR jest generalnie większa dla twardszych materiałów.

3.2. OCENA EFEKTÓW TECHNOLOGICZNYCH

W kolejnym etapie badań dokonano oceny efektów technologicznych uzyskanych dla produktów rozdrabniania HPGR. Oceny tej dokonano poprzez analizę 20- i 50-procentowego stopnia rozdrobnienia oraz wychód ziaren poniżej 100 μm . Stopnie rozdrobnienia zostały obliczone według wzoru (2).

$$S_x = \frac{D_x}{d_x}, \quad (2)$$

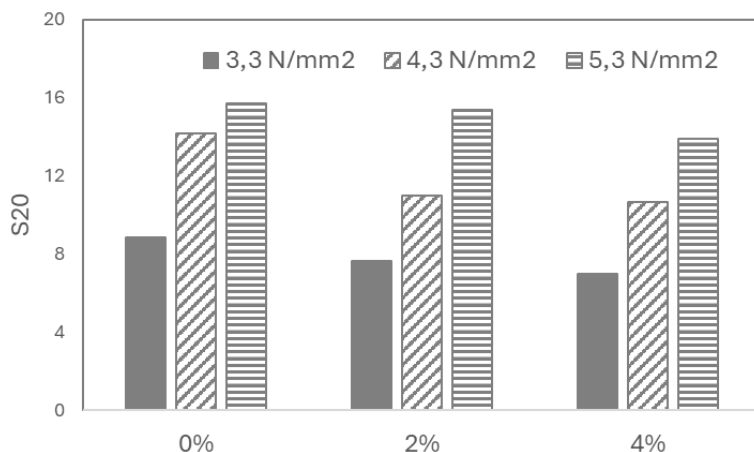
gdzie:

S_x – stopień rozdrobnienia,

D_x – ziarno charakterystyczne nadawy,

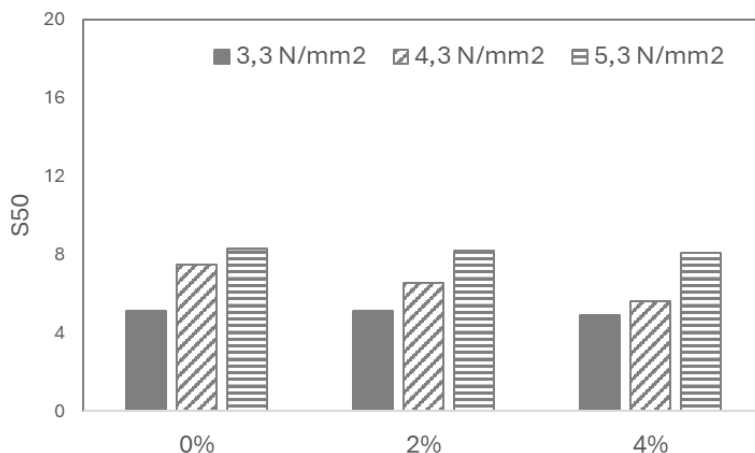
d_x – ziarno charakterystyczne produktu.

W badaniach przyjęto poziom x wynoszący 20 i 50%. Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane stopnie rozdrobnienia dla S20, a na rys. 6 dla S50.



Rys. 5. Wartości 20% stopni rozdrobnienia (S20) dla produktów HPGR

Fig. 5. Values of 20% crushing ratios (S20) for HPGR products



Rys. 6. Wartości 50% stopni rozdrobnienia (S50) dla produktów HPGR
 Fig. 6. Values of 50% crushing ratios (S50) for HPGR products

Analizując rys. 5 i 6, można zauważyć, że kluczowym czynnikiem wpływającym na poziom rozdrobnienia materiału w HPGR jest ciśnienie operacyjne. Dla 20% stopnia rozdrobnienia uzyskiwano wartości S20 między 8 a prawie 16 dla próbek suchych, natomiast dla próbek o wilgotności 4% analogiczne wartości wynosiły pomiędzy 7 dla F_{sp} wynoszącego 3,3 oraz 14 dla $F_{sp} = 5,3 \text{ N/mm}^2$.

Jak widać, wilgotność materiału powodowała nieznaczne obniżenie wartości S20. W przypadku średniego stopnia rozdrobnienia S50, wartości zmieniały się średnio między 5 i 8, a wilgotność materiału miała prawie niezauważalny wpływ na zmienność S50.

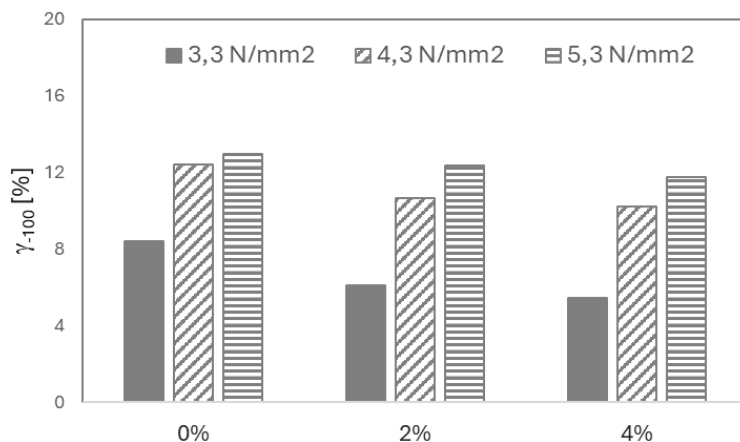
W przypadku wychodów ziaren najdrobniejszych w produktach rozdrabniania HPGR zarówno ciśnienie operacyjne, jak i wilgotność materiału wykazywały pewien wpływ, natomiast, jak można przypuszczać, większe znaczenie miała tutaj wartość F_{sp} . Zdecydowany przyrost w wychodzie tych ziaren (średnio od 32 do 46%) można zaobserwować dla wzrostu ciśnienia operacyjnego z 3,3 do 4,3 N/mm^2 , a dalszy wzrost ciśnienia, czyli do 5,3 N/mm^2 spowodował już o wiele mniejszy przyrost – od ok. 5 do 14%.

Dla uzyskanych wyników testów zostały opracowane modele pracy HPGR określające zależności między analizowanymi wielkościami z uwzględnieniem ciśnienia w prasie i wilgotności nadawy. Modele te opracowano w oparciu o metody regresji wielorakiej.

Model dotyczący energochłonności przedstawiono za pomocą wzoru (3).

$$W_i = 11,3 - 0,16 \cdot F_{sp} - 0,14 \cdot M. \quad (3)$$

Ze wzoru wynika, że zmiana wartości F_{sp} o jednostkę, czyli o 1 N/mm^2 spowoduje obniżenie się wskaźnika pracy Bonda o 0,16 kWh/Mg , natomiast zmiana wilgotności o jednostkę – o 1% spowoduje spadek W_i o 0,14 kWh/Mg . Zatem oba czynniki mają odwrotnie proporcjonalny wpływ na wskaźnik Bonda. Współczynnik determinacji modelu jest wysoki i wynosi $R^2 = 0,902$.



Rys. 7. Wychód ziaren poniżej 100 μm w produktach HPGR
Fig. 7. Yield of particles below 100 μm in HPGR products

4. MODELE PRACY HPGR

We wzorach (4) i (5) przedstawiono modele dla 20 i 50% stopnia rozdrobnienia.

$$S_{20} = -2,73 + 3,58 F_{sp} - 0,6 M, \quad (4)$$

$$S_{50} = 0,10 + 1,59 F_{sp} - 0,19 M. \quad (5)$$

Ciśnienie operacyjne ma wprost proporcjonalny wpływ na uzyskiwane stopnie rozdrobnienia, natomiast wilgotność wykazuje wpływ odwrotnie proporcjonalny. Wzrost ciśnienia w prasie o jednostkę powoduje wyższy teoretyczny wzrost wartości stopnia rozdrobnienia 20% niż 50%. Oba modele bardzo dobrze opisują rzeczywistość, gdyż ich współczynniki determinacji wynoszą odpowiednio 95,3% i 92,8%.

W przypadku modelowania wychodu najdrobniejszych ziaren w produktach rozdrabniania HPGR, odpowiedni model przedstawia wzór (6).

$$\gamma_{-100} = -30,85 + 17,03 \cdot F_{sp} - 0,54 \cdot M. \quad (6)$$

Zdecydowanie wyższy wpływ na wychód ziaren najdrobniejszych ma ciśnienie F^{sp} niż wilgotność materiału. Współczynnik determinacji modelu wynosi 85,5% i chociaż jest na wysokim poziomie, to wśród wszystkich wyznaczonych modeli jest najniższy i jako jedyny poniżej 90%.

Sprawdzono także powiązania między poszczególnych zmiennych zależnych z wyznaczonych modeli. W tym celu wykorzystano współczynnik korelacji liniowej r -Pearsona i sprawdzono jego istotność statystyczną dla przyjętego poziomu ufności 95%. Najwyższe wartości współczynników korelacji uzyskano pomiędzy wychodem najdrobniejszych ziaren a stopniami rozdrobnienia S_{20} i S_{50} . Wynosiły one odpowiednio

96,3% oraz 90,8%. Widać silną korelację zwłaszcza między wychodem ziaren najdrobniejszych a S20, co oznacza, że przy wysokiej wartości 20% stopnia rozdrobnienia można się spodziewać także wysokiego wychodu ziaren najdrobniejszych w produkcie. Z kolei wskaźnik energochłonności pracy Bonda W_i wykazuje bardzo wysoką ujemną korelację z energochłonnością prasy walcowej, $r = -0,914$.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki uzyskanych badań pokazują, że zarówno ciśnienie HPGR i wilgotność materiału wpływają na uzyskane wyniki technologiczne i energetyczne, chociaż wpływ ten jest zróżnicowany. Dla przykładu wskaźniki pracy Bonda zmniejszały się wraz ze wzrostem ciśnienia i wilgotności, z kolei dla wychodu ziaren najdrobniejszych, ciśnienie miało większy wpływ w porównaniu z wilgotnością.

Modele dla S_x pokazały natomiast, że F_{sp} miał dodatni wpływ na intensywność rozdrabniania, przy czym najkorzystniejsze wyniki modelowania osiągnięto dla S20. Praktyczna implementacja tych modeli może być pomocna w osiąganiu lepszych wyników technologicznych, jak wyższa wydajność pracy, lepszy poziom rozdrabniania nadawy oraz efektywny energetycznie przebieg procesu.

LITERATURA

- [1] ABOUZEID A.Z., FUERSTENAU D.W., *Grinding of mineral mixtures in high-pressure grinding rolls*, International Journal of Mineral Processing, 2009, 93 (1), 59–65.
- [2] AYDOGAN N.M., ERGUN L., BENZER H., *High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry*, Minerals Engineering, 2006, 19 (2), 130–139.
- [3] BOND F.C. *Crushing and grinding calculations*. Part I. Brit. Chem. Eng. 1961, 6(6), 378–385; Part II, ibid. 1961, 6 (8), 543–548.
- [4] MORRELL S., *Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits*, Minerals Engineering, 2009, 22, 544–549.
- [5] NUMBI B.P., ZHANG J., XIA X., *Optimal energy management for a jaw crushing process in deep mines*, Energy, 2014, 68 (C), 337–348.

ANALYSIS OF GRINDING ENERGY CONSUMPTION BY MEANS OF BOND METHOD FOR LIMESTONE GRINDING PRODUCTS IN HPGR ROLLER PRESS

The article concerns the evaluation of selected technological and energetic effects of limestone crushing in HPGR device. The analysis was carried out based on the obtained values of crushing ratios S20 and S50, and calculated values of the Bond work index. The tests were carried out in a laboratory HPGR press at variable values of operational pressure and the material moisture. Mathematical models, with two independent variables – pressure and material moisture – were determined both for the Bond work index and for selected technological effects such as crushing ratios and yield of finest particles in specific crushing products. Multiple regression method was used in the development of the models.

Dagmara SOLATYCKA¹

Żaklina KONOPACKA²

¹ Okręgowy Urząd Górniczy we Wrocławiu

² Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

MODELOWANIE WYPADKÓW PRZY PRACY

Artykuł omawia i porównuje różne modele wypadków przy pracy, które służą analizie przyczyn zdarzeń i projektowaniu skutecznych działań prewencyjnych. Przedstawiono również praktyczne przykłady analizy wypadków przy pracy w odkrywkowych zakładach górniczych z zastosowaniem przywołanych metod.

1. WSTĘP

Praca jest procesem fizyczno-umysłowym człowieka prowadzącym do wytworzenie dóbr materialnych i kulturowych. Od zarania dziejów stanowi ona nieodłączną część życia, pozwalając człowiekowi nie tylko zaspokajać własne potrzeby, ale i powoduje rozwój osobowy. Dobrze wykonana praca, oprócz produktu, daje satysfakcję, poczucie własnej wartości, mobilizując nas do dalszego doskonalenia się. Fakt ten podkreślali wielcy tego świata, np. Albert Einstein wielokrotnie nadmieniał w swoich listach do przyjaciół i wypowiedziach, że praca naukowa była dla niego sposobem na odnalezienie sensu życia [1].

Niestety z każdą pracą wiąże się zagrożenie wypadkowe. Szczególnie w przemyśle wydobywczym jest to bardzo problematyczne zagadnienie, gdyż z górnictwa nie można wyeliminować całkowicie wypadków przy pracy (co wiąże się choćby z zagrożeniami naturalnymi).

Zrozumienie przyczyn, mechanizmów oraz konsekwencji tych wypadków jest kluczowe dla tworzenia skutecznych strategii prewencji i minimalizacji ryzyka. W tym kontekście coraz większe znaczenie zyskuje modelowanie wypadków przy pracy, które umożliwia analizę danych, identyfikację wzorców i prognozowanie potencjalnych zagrożeń.

2. ZASADY KWALIFIKACJI WYPADKÓW PRZY PRACY

Za wypadek przy pracy uważa się nagle zdarzenie wywołane przyczyną zewnętrzną, powodujące uraz lub śmierć, które nastąpiło w związku z pracą [10]:

- podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika zwykłych czynności lub poleceń przełożonych,
- podczas lub w związku z wykonywaniem przez pracownika czynności na rzecz pracodawcy, nawet bez polecenia,
- w czasie pozostawiania pracownika w dyspozycji pracodawcy w drodze między siedzibą pracodawcy a miejscem wykonywania obowiązku wynikającego ze stosunku pracy.

Poniżej rozwinięto pojęcia określone w definicji, aby lepiej zrozumieć ich znaczenie w kontekście kwalifikowania zdarzeń jako wypadków przy pracy.

- Pojęcie „nagłości” – oznacza, że zdarzenie, które doprowadziło do wypadku, miało charakter nagły, to znaczy wystąpiło w krótkim, wyraźnie ograniczonym czasie, tj. nie przekraczającym jednej dniówki roboczej. W praktyce jest to sytuacja, która trwa maksymalnie kilka minut, a jej skutki są bezpośrednio widoczne. Przykładami mogą być: upadek z wysokości, przecięcie ręki narzędziem czy porażenie prądem. Nagłość odróżnia wypadek od sytuacji, w których dolegliwości zdrowotne wynikają z długotrwałego narażenia na szkodliwe czynniki, np. chorób zawodowych.
- Przyczyna zewnętrzna – to element lub okoliczność spoza organizmu pracownika, która wywołała uraz lub śmierć; może to być działanie fizyczne, chemiczne, biologiczne lub psychiczne.
- Uraz – jest to uszkodzenie tkanek ciała lub narządów człowieka wskutek działania czynnika zewnętrznego.
- Związek z pracą – może zachodzić zarówno wówczas, gdy do urazu dojdzie podczas wykonywania pracy, jak i podczas pozostawiania tylko w dyspozycji pracodawcy, na rzecz którego miała być świadczona praca (np. oczekiwanie na polecenia: na terenie zakładu lub w innym, wyznaczonym przez pracodawcę miejscu).

Wypadki można sklasyfikować na różne sposoby. Najczęściej dzieli się je ze względu na stopień ciężkości jako: śmiertelne, ciężkie i tzw. lekkie (wypadki powodujące czasową niezdolność do pracy) oraz ze względu na liczbę poszkodowanych: indywidualne i zbiorowe.

Wypadek śmiertelny to taki, w wyniku którego u poszkodowanemu stwierdzono nieodwracalne ustanie funkcji życiowych, na skutek zahamowania reakcji biologicznych w komórkach organizmu, które nastąpiło w okresie nie przekraczającym 6 miesięcy od dnia zaistnienia zdarzenia [10].

Za wypadek ciężki uznaje się ciężkie uszkodzenie tkanek ciała i narządów człowieka, naruszenie podstawowych funkcji organizmu, nieuleczalna lub zagrażająca życiu choroba, choroba psychiczna, całkowita lub częściowa niezdolność do pracy, a także

trwałe zeszpecenie lub zniekształcenie ciała [10]. Pozostałe wypadki, których skutki nie zostały powyżej wymienione, zalicza się do tzw. wypadków lekkich.

Wypadki indywidualne to takie, w wyniku których obrażeń doznaje tylko jedna osoba. Jeśli temu samemu zdarzeniu wypadkowemu uległo co najmniej 2 osoby, mamy do czynienia z wypadkiem zbiorowym.

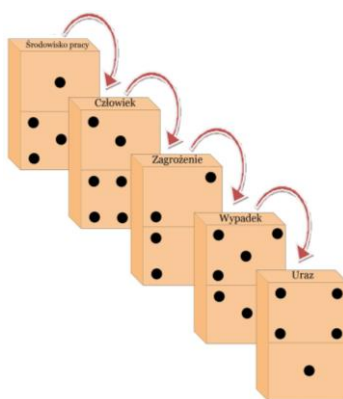
Tak sklasyfikowane wypadki pozwalają na wnikliwą ich analizę. Wyciągnięte wnioski posłużą do oceny ryzyka zawodowego, pokażą, które obszary (działalność górnicza, zasoby ludzkie) wymagają poświęcenia większej uwagi, w którym kierunku powinna podążać profilaktyka wypadkowa.

3. MODELE WYPADKÓW PRZY PRACY

Modelowanie wypadków przy pracy służy zarówno do przedstawiania sekwencji zdarzeń wypadkowych, ale również pozwalają przewidzieć możliwe zachowania ludzkie, badać wypadki, określać ich przyczyny, stworzyć statystyki wypadkowe. W praktyce stosuje się różne modele. Ich budowa zależna jest od celu jaki sobie postawimy.

3.1. MODEL HEINRICHA – MODEL DOMINA

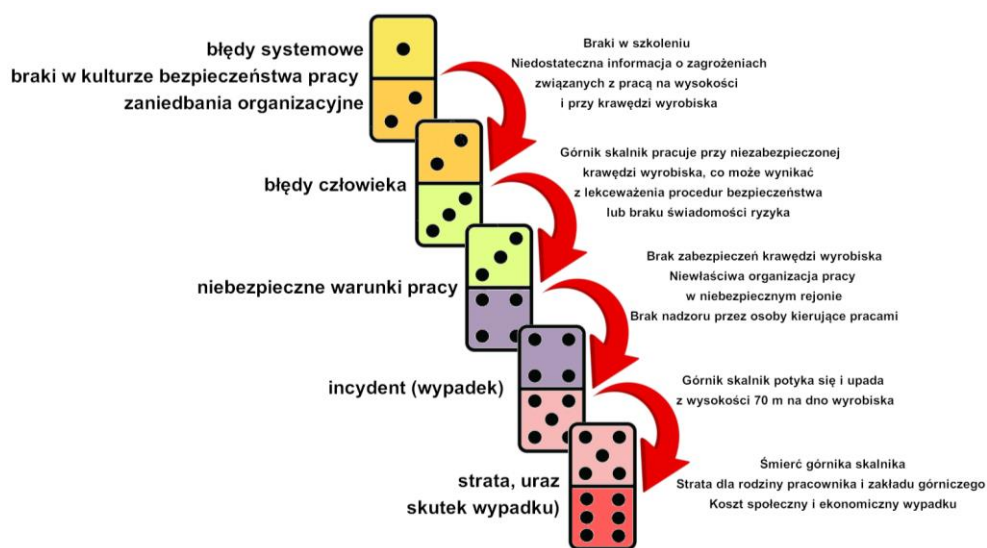
Jest to klasyczny przyczynowo-skutkowy model wypadku. Zakłada, że zdarzenie A powoduje zdarzenie B, następnie B jest przyczyną C, skutkiem C jest D i tak kolejnego, aż dojdziemy do wypadku. Nazywa się go modelem domina (rys. 1). Pierwszy raz przedstawił go Heinrich w 1931 r., wyróżniając pięć podstawowych elementów, które w symbolizują przyczyny prowadzące do wypadku. Każdy z nich reprezentuje jedno z ogniw łańcucha zdarzeń.



Rys. 1. Model wypadku wg Heinricha (opracowanie na podstawie [3])

Fig. 1. Heinrich accident model (study based on [3])

1. Środowisko pracy. Heinrich wskazał, że wpływ środowiska społecznego ma ogromne znaczenie na podatność na wypadki – uważał, że niektóre osoby są bardziej narażone na podejmowanie ryzykownych zachowań z tytułu tego wpływu. Oczywiście jest to uzależnione od cech osobowościowych i charakteru pracownika.
2. Błędy i zaniedbania człowieka. Na tym etapie wypadek wynika z niewłaściwego działania człowieka, np. nieprzestrzegania zasad bezpieczeństwa, niedbałości, nieuwagi lub braku odpowiednich kwalifikacji. To czynnik, który Heinrich uznał za główną przyczynę większości wypadków (według jego badań prawie 90% wypadków wynikało z ludzkich błędów).
3. Zagrożenia. Ta kostka domina symbolizuje czynniki środowiskowe, takie jak niewłaściwe narzędzia, brak osłon ochronnych, zły stan maszyn czy niewystarczające procedury bezpieczeństwa – w odniesieniu do górnictwa mówilibyśmy o zagrożeniach technologicznych, naturalnych oraz organizacyjnych. Niebezpieczne warunki pracy mogą zwiększać ryzyko wypadków, zwłaszcza jeśli łączą się z błędami ludzkimi.
4. Zdarzenie wypadkowe. Jest to faktyczny moment wystąpienia wypadku.
5. Uraz. Ostatnia kostka oznacza konsekwencje wypadku, jak uszkodzenie ciała, rozstrój zdrowia, kalectwo czy śmierć. Aczkolwiek w kontekście miejsca pracy może to być również szkoda materialna, np. uszkodzenie sprzętu.



Rys. 2. Analiza wypadku przy pracy w zakładzie górniczym wg modelu Heinricha
Fig. 2. Analysis of a mining occupational accident according to the Heinrich model

Jako przykład przedstawiono analizę wypadku przy pracy w odkrywkowym zakładzie górniczym według modelu Heinricha (rys. 2). Wypadkowi uległ górnik skalnik,

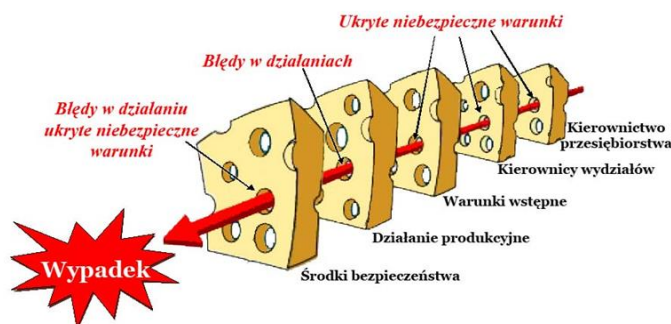
który pracował przy niezabezpieczonej krawędzi wyrobiska, następnie potknął się i upadł z wysokości 70 m na dno wyrobiska ponosząc śmierć. Środowisko pracy reprezentowane jest tu przez zespół środków organizacyjnych (system i organizację pracy oraz kulturę bezpieczeństwa). Błędy na tym poziomie to brak lub niewłaściwe szkolenia oraz informacje o zagrożeniach w pracy. Kolejny klocek „błędy człowieka” to brak świadomości pracownika o istniejącym ryzyku lub lekceważenie tego ryzyka i procedur bezpieczeństwa. Kostkę „zagrożenia” reprezentują niebezpieczne warunki pracy, tj. brak środków ochrony zbiorowej i indywidualnej przy pracach na wysokości realizowanych w obrębie krawędzi głębokiego wyrobiska, niewłaściwa organizacja pracy oraz brak nadzoru osób kierujących pracownikami. Zdarzeniem wypadkowym jest potknięcie się górnika skalnika i jego upadek z wysokości. Skutkami wypadku są nie tylko śmierć poszkodowanego, lecz także strata dla najbliższych oraz zakładu górniczego oraz poniesione koszty społeczne i ekonomiczne tego wypadku.

Zgodnie z teorią Heinricha, aby przerwać łańcuch zdarzeń i zapobiec wypadkowi, wystarczy usunąć jeden z elementów domina. Zaletą tego modelu jest prostota i przejrzystość – natomiast wadami są:

- brak informacji w jaki sposób wypadek zaistniał,
- zbyt duże obarczanie winą pracowników za wypadki,
- pomijanie znaczenia czynników systemowych, takich jak kultura organizacyjna czy niewystarczające zarządzanie bezpieczeństwem.

3.2. MODEL WG REASONA – MODEL SERA SZWAJCARSKIEGO

Ten model zakłada, że do wypadku dochodzi, ponieważ na różnych poziomach decyzyjnych powstają ukryte niebezpieczne warunki oraz błędy w działaniach i jeśli zdołają się one pokryć, dochodzi do wypadku (rys. 3). Model Reasona zwany jest modelem sera szwajcarskiego, gdyż poszczególne jego elementy są przedstawione w formie warstw sera, gdzie dziury w plastrach symbolizują luki w systemie bezpieczeństwa.



Rys. 3. Model wypadku wg Reasona (opracowanie na podstawie [4])

Fig. 3. Reason accident model (study based on [4])

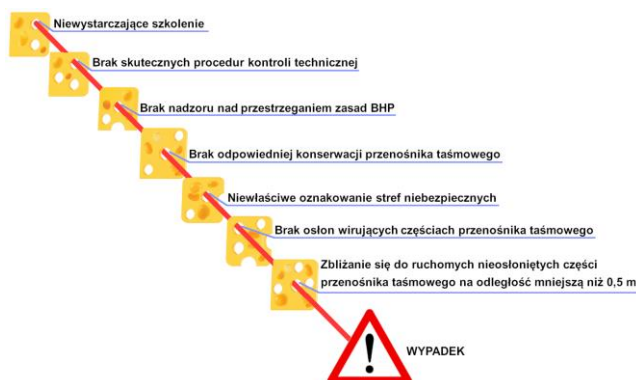
W każdym zakładzie pracy istnieją różne „warstwy obronne” (plastry sera), które mają na celu zapobieganie wypadkom. Mogą to być np. procedury bezpieczeństwa, szkolenia, systemy zarządzania ryzykiem, technologie ochronne czy działania kontrolne. Dziury w plastrach symbolizują błędy, uchybienia lub słabe punkty w danej „warstwie obronnej” – mogą to być:

- błędy ludzkie, np. nieuwaga, nieprzestrzeganie procedur, brak kompetencji,
- czynniki organizacyjne, np. brak lub niedostateczne szkolenie, zła komunikacja,
- czynniki techniczne, np. awarie, niewłaściwy dobór maszyn.

Wypadek ma miejsce, gdy „dziury” w różnych warstwach obronnych układają się w linię prostej, umożliwiając przejście zdarzenia przez wszystkie warstwy. Oznacza to, że żadna z warstw nie zdołała zatrzymać błędu i przerwać łańcucha zdarzeń prowadzących do wypadku.

Na rysunku 4 przedstawiono przykład analizy wypadku przy pracy operatora przenośnika taśmowego wg modelu Reasona. Ukryte niebezpieczne warunki to: niewystarczające szkolenie, brak skutecznych procedur kontroli technicznej i brak nadzoru nad przestrzeganiem zasad bezpieczeństwa i higieny pracy. „Dziury” w warstwach obronnych działań produkcyjnych to brak odpowiedniej konserwacji maszyny. Błędy na poziomie środków bezpieczeństwa stanowią: niewłaściwe oznakowanie stref niebezpiecznych, brak osłon wirujących części przenośnika taśmowego oraz zbliżanie się do ruchomych nieosłoniętych części przenośnika na odległość mniejszą niż 0,5 m. W rezultacie zdarzenie przechodzi przez wszystkie warstwy obronne, prowadząc do wypadku przy pracy.

W modelu tym podkreśla się rolę organizacji i systemu w zapobieganiu wypadkom. Wskazuje się, że działania prewencyjne na różnych poziomach i identyfikacja słabych punktów w procesach pracy są kluczowe w kwestii zachowania bezpieczeństwa. Wadą tego modelu jest trudność zastosowania go w bardzo dynamicznym środowisku pracy.



Rys. 4. Analiza wypadku przy pracy operatora przenośnika taśmowego wg modelu Reasona

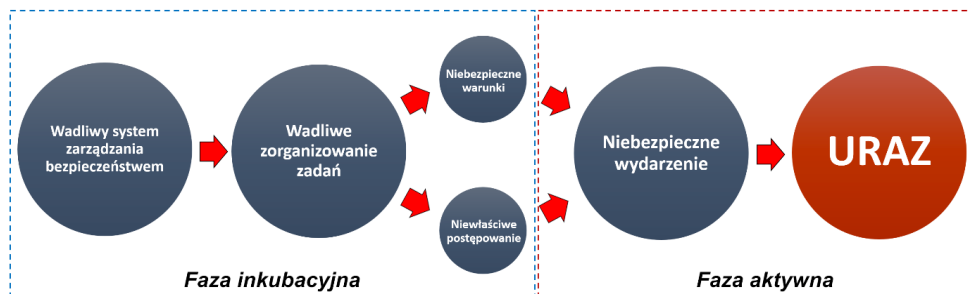
Fig. 4. Analysis of an occupational accident of a belt conveyor operator according to the Reason model

3.3. MODEL TOL

Model TOL (Techniczny, Organizacyjny, Ludzki) powstał na podstawie praktycznych doświadczeń w zarządzaniu bezpieczeństwem pracy. Kładzie się w nim nacisk na kompleksowe podejście do identyfikacji i eliminacji czynników ryzyka. Model ten analizuje trzy grupy czynników:

- technicznych – odnoszących się do wszelkich aspektów związanych z infrastrukturą, maszynami, narzędziami oraz stosowanymi technologiami, np. awarie maszyn, wady fizyczne,
- organizacyjnych – obejmujące błędy w zarządzaniu, procedurach i kulturze bezpieczeństwa w organizacji, np. brak lub niewłaściwe szkolenia, brak odpowiednich procedur bezpieczeństwa lub ich nieprzestrzeganie (w tym odpowiedniego nadzoru nad przestrzeganiem zasad bhp), niewłaściwy podział obowiązków i kompetencji w zespole,
- ludzkich – błędy, zaniedbania lub zachowania pracowników, które mogą prowadzić do wypadków, np. rutyna, niekompetentność, zmęczenie fizyczne, wrodzone zdolności.

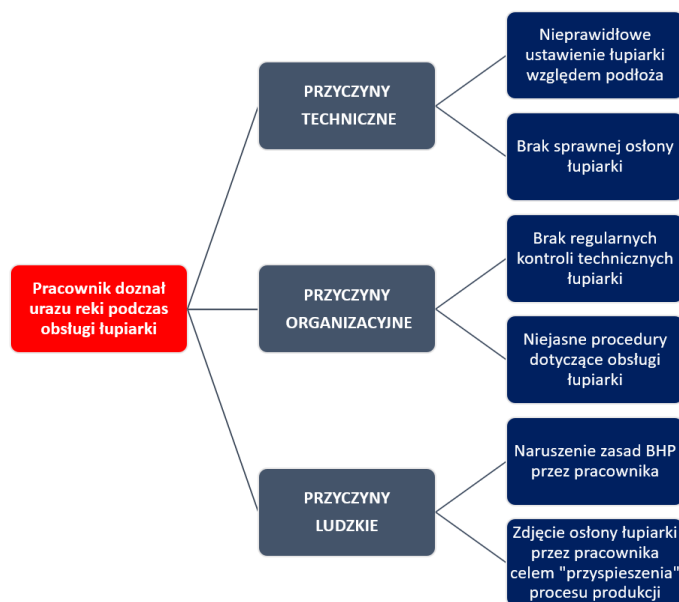
Cały wypadek z kolei można podzielić na dwie fazy (rys. 5). Fazę inkubacyjną, gdzie powstają przyczyny wypadków, oraz fazę aktywną – wypadek. Dokładna analiza pierwszej fazy pozwoli zaprojektować odpowiednie działania profilaktyczne.



Rys. 5. Fazy sytuacji wypadkowej w modelu TOL
(opracowanie na podstawie [4])

Fig. 5. Accident situation phases in the TOL model
(study based on [4])

Na rysunku 6 przedstawiono przykład analizy wypadku przy pracy operatora łuparki wg modelu TOL. Przyczynami wypadku są wszelkie braki i nieprawidłowości, które przyczyniły się pośrednio i bezpośrednio do powstania zdarzenia, związane z czynnikami technicznymi (materialnymi), organizacyjnymi (organizacją stanowiska pracy oraz ogólna organizacja pracy w zakładzie górniczym) oraz ludzkimi (w tym nieprawidłowym zachowaniem pracownika).



Rys. 6. Przykład analizy wypadku przy pracy operatora łuparki według modelu TOL

Fig. 6. Example of a splitting machine operator accident analysis according to the TOL model

Zaletami modelu TOL są łatwość zastosowania oraz kompleksowość (analiza wypadków w trzech kluczowych obszarach, co pozwala na pełniejsze zrozumienie ich przyczyn).

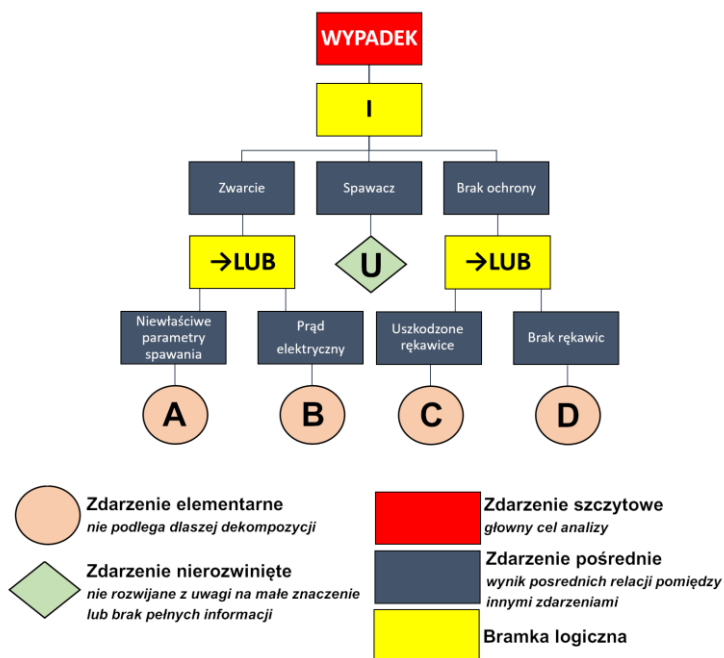
3.4. FTA – DRZEWO NIEZDATNOŚCI

Model drzewa niezdatności (ang. Fault Tree Analysis) wykorzystuje elementy logiczne, tzw. bramki logiczne. Bramki te łączą różne zdarzenia w sposób logiczny i pokazują, jak wpływają one na zdarzenie szczytowe [7].

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe drzewo niezdatności. Elementami (bramkami) logicznymi są:

- „I” – zdarzenie szczytowe wystąpi, jeśli wystąpią wszystkie zdarzenia poniżej tej bramki,
- „LUB” – zdarzenie szczytowe wystąpi, jeśli wystąpi co najmniej jedno zdarzenie poniżej.

Zdarzenia elementarne, których nie rozwijamy i nie rozpatrujemy, są zaznaczone w kółeczku. Błąd człowieka („zdarzenie nierozwinięte”) jest rozpatrywany, aczkolwiek nie został rozpisany na czynniki z uwagi na małe znaczenie lub brak pełnych informacji. Do wypadku dojdzie, jeśli np. spawacz popełni błąd, nie zadziałają środki ochronne i w sieci elektrycznej powstanie zwarcie.



Rys. 7. Model drzewa niezdatności (opracowanie na podstawie [2])

Fig. 7. Fault-tree model (study based on [2])

Model drzewa niezdatności pozwala przeanalizować wypadki w sposób logiczny i uporządkowany, umożliwia określenie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia szczytowego oraz pomaga określić, które czynniki mają największy wpływ na wystąpienie wypadku. Jego niewątpliwą zaletą jest elastyczność, co pozwala na zastosowanie go w różnych branżach i typach zdarzeń niepożądanych.

Model zakłada logiczną strukturę zdarzeń, co nie zawsze odzwierciedla rzeczywiste, nieliniowe interakcje w systemach. Wymagana jest również znajomość danych wejściowych, co również może stwarzać problemy w sytuacji, gdy ich nie znamy. Stąd dla skomplikowanych systemów drzewo niezdatności może nie być właściwym narzędziem w profilaktyce wypadkowej.

3.5. MODEL EUROSTAT

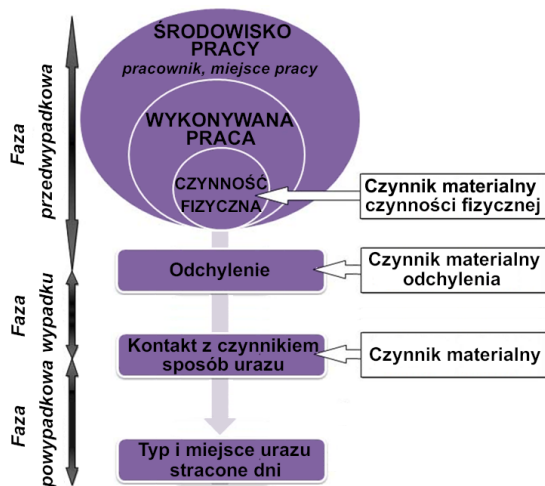
Model według Eurostat (ang. ESAW – European Statistics on Accidents at Work) został przyjęty w Unii Europejskiej jako ustandaryzowany model wypadków, które rejestruje się w celach statystycznych. W tym przypadku za wypadek przy pracy uznaje się nagle zdarzenie związane z pracą, którego wynikiem jest uraz fizyczny lub psychiczny, gdzie:

- „nagłości” należy rozumieć jako pojedyncze zdarzenie lub seria zdarzeń, które występują w krótkim czasie,
- „powiązanie z pracą” oznacza, że wypadek musi mieć związek z wykonywaną pracą lub środowiskiem pracy,
- „uraz” oznacza uraz fizyczny lub psychiczny.

W metodologii ESAW wypadki przy pracy rozróżnia się również z uwagi na ich ciężkość jako:

- śmiertelne – takie, które prowadzą do zgonu poszkodowanego w ciągu 1 roku od zaistnienia wypadku
- nie powodujące śmierci, czasem zwane jako „poważne wypadki przy pracy” – definiowane jako takie, które powodują co najmniej 4 pełne dni kalendarzowe nieobecności w pracy [12].

Na rysunku 8 przedstawiono graficznie model wypadku przy pracy wg Eurostatu. Widzimy, że na czynność fizyczną duże znaczenie ma wykonywana praca oraz środowisko pracy. Odchylenie jest łącznikiem między fazą przedwypadkową, a fazą wypadkową, gdzie rozpatrujemy w jaki sposób doszło do urazu. W fazie powypadkowej analizujemy m.in. typ urazu i jego umiejscowienie.



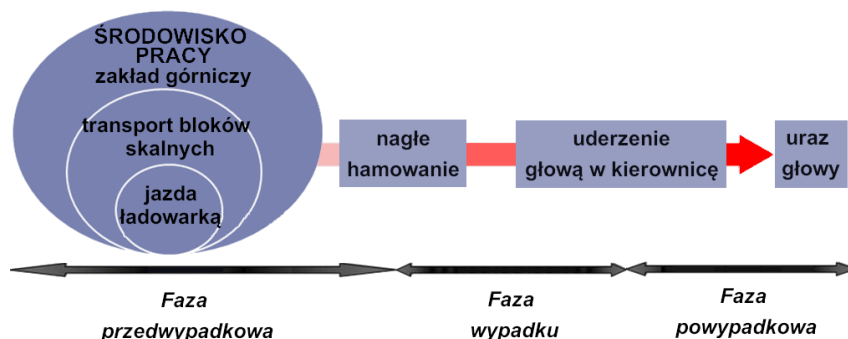
Rys. 8. Model wg Eurostatu (opracowanie na podstawie [5, 11])

Fig. 8. Eurostat model (study based on [5, 11])

Jako przykład przedstawiono analizę wypadku przy pracy według modelu Eurostatu (rys. 9):

- Zdarzenie: Operator ładowarki doznał urazu głowy w wyniku uderzenia nią o kierownicę podczas nagłego hamowania, w czasie jazdy maszyną na terenie zakładu górniczego;

- Środowisko pracy: zakład górniczy;
- Wykonywana czynność: transport bloków skalnych;
- Czynniki materialny czynności fizycznej: jazda ładowarką;
- Czynniki materialny odchylenia: nagłe hamowanie;
- Czynniki materialny: uderzenie głową w kierownicę;
- Typ urazu: uraz głowy.



Rys. 9. Analiza wypadku przy pracy w zakładzie górniczym wg modelu Eurostatu
Fig. 9. Analysis of a mining occupational accident according to the Eurostat model

Zaletami modelu Eurostat są standaryzacja, szczegółowość oraz dopasowanie do różnych branż przemysłu. Dane są gromadzone są w wielu wymiarach, co pozwala na precyzyjną identyfikację kluczowych czynników ryzyka oraz analizę przyczyn i skutków wypadków przy pracy.

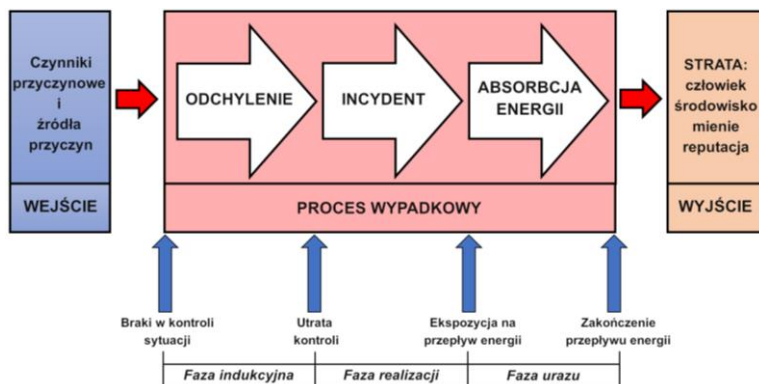
3.6. MODEL OARU

W modelu OARU (ang. Occupational Accident Research Unit) wypadek dzielimy na trzy fazy: inicjacyjną, realizacji i urazu (rys. 10). Między każdą z nich wyróżnia się stany przejściowe od:

- stanu normalnego do braku kontroli w sytuacji,
- braku do utraty kontroli,
- utraty kontroli do absorpcji energii,
- absorpcji energii do zakończenia jej pochłaniania.

Odchyleniem będzie wydarzenie powodujące wypadek. Między 2, a 3 stanem przejściowym, mamy do czynienia ze źródłem czynnika niebezpiecznego oraz samym czynnikiem. Zaś absorpcja energii oznacza miejsce i sposób powstania urazu.

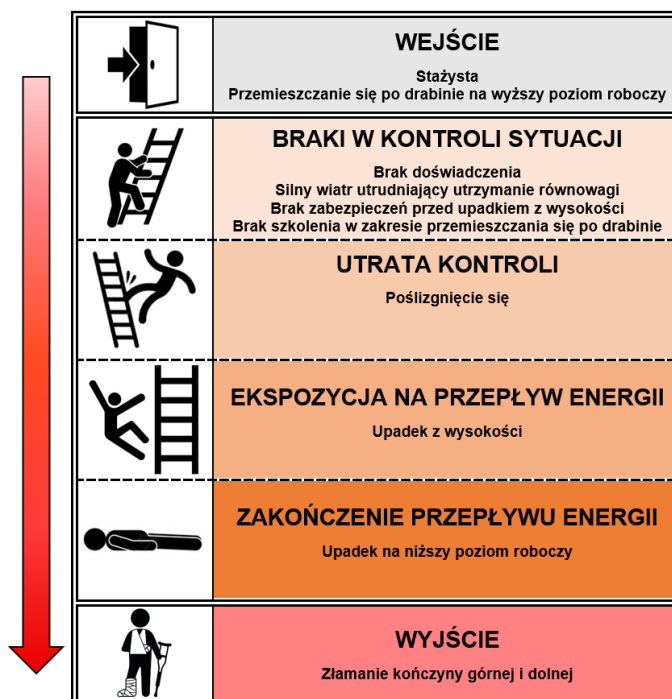
Model procesowy OARU jest o tyle przydatny, że jego analiza dla zdarzenia wypadkowego, dostarcza wszelkich niezbędnych informacji potrzebnych do uzupełnienia statystycznej karty wypadku.



Rys. 10. Model wypadku OARU (opracowanie na podstawie [6, 8, 9])

Fig. 10. OARU accident model (study based on [6, 8, 9])

Na rysunku 11 przedstawiono analizę wypadku przy pracy wg modelu OARU. Nieodświadczonego pracownika (stażysta) przemieszczał się po drabinie z niższego na wyższy poziom roboczy. Pracownikowi nie udzielono instruktażu w zakresie pieszego poruszania



Rys. 11. Analiza wypadku przy pracy w zakładzie górniczym wg modelu OARU

Fig. 11. Analysis of a mining occupational accident according to the OATU model

się pomiędzy poziomami. Drabina, po której wchodził poszkodowany nie była odpowiednio zabezpieczona, a sam pracownik nie używał żadnych środków ochrony indywidualnej przed upadkiem z wysokości. Z uwagi na silny wiatr stażysta miał problem z utrzymaniem równowagi. Poszkodowany potknąwszy się, źle rozłożył ciężar ciała i spadł na niższy poziom roboczy. W wyniku tego zderzenia złamał kończyny dolne i górne. Analizując to zdarzenie można mieć pewne trudności w rozróżnieniu poszczególnych stanów przejściowych, niemniej jednak koncepcja przepływu energii jest tu bardzo mocno widoczna, co pomaga wyciągnąć wnioski na przyszłość i zaplanować działania naprawcze lub eliminujące zagrożenie.

Model wypadku ORARU jest użytecznym narzędziem do analizy przyczyn i okoliczności wypadków przy pracy dzięki swojej strukturze uwzględniającej czynniki ludzkie, środowiskowe i techniczne. Pozwala to na dogłębne zrozumienie mechanizmów prowadzących do wypadków oraz na wdrożenie skutecznej profilaktyki.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiono różnorodne modele wypadków przy pracy, które pozwalają analizować przyczyny tych zdarzeń, identyfikować ich mechanizmy oraz projektować skuteczne strategie prewencyjne. Każdy z opisanych modeli oferuje unikatowe podejście, dostosowane do określonych kontekstów i potrzeb.

- Model Heinricha skupia się na znaczeniu sekwencji przyczyn prowadzących do wypadku, sugerując, że eliminacja jednego elementu z łańcucha zdarzeń może zapobiec wypadkowi. W modelu tym nacisk kładzie się na błędy ludzkie i warunki pracy jako kluczowe czynniki ryzyka.
- Model Reasona koncentruje się na lukach w systemach zabezpieczeń, które prowadzą do sytuacji wypadkowych.
- Model TOL uwzględnia trzy filary bezpieczeństwa: technikę, organizację i logistykę, zwracając uwagę na ich równowagę w kontekście wpływu na bezpieczeństwo pracy.
- Model drzewa niezdatności analizuje potencjalne scenariusze awarii prowadzących do wypadków. Struktura drzewa logicznego pozwala szczegółowo identyfikować przyczyny wypadków w sposób hierarchiczny.
- Model Eurostat pozwala na ustandaryzowane raportowanie szczegółowych informacji o wypadkach przy pracy na poziomie Unii Europejskiej.
- Model ORARU jest typowym modelem procesowym, dzieląc zdarzenie wypadkowe na trzy fazy: inicjacyjną, realizacji i urazu, pomiędzy którymi występują cztery stany przejściowe. Model ten dzięki swojej prostocie i intuicyjności może być zastosowany w wielu branżach przemysłowych.

Każdy z opisanych modeli dostarcza cennych narzędzi do badania wypadków przy pracy, a ich zastosowanie zależy od specyfiki zakładu oraz celów badania. Wspólnym

ich celem jest dążenie do identyfikacji zagrożeń oraz projektowania profilaktyki wypadkowej.

LITERATURA

- [1] RYCERZ A., *Albert Einstein*, Wydawnictwo Ingram, 2019.
- [2] PĘCZEK D., *Analiza kosztów wypadków przy pracy w O/ZG Rudna*, praca dyplomowa, Wydz. Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii PWr, Wrocław 2007.
- [3] HEINRICH H.W., *Industrial accident prevention: A scientific approach*, McGraw-Hill book Company, Inc., 1931.
- [4] PIETRZAK L., *Modelowanie wypadków przy pracy. Część 1. Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka*, 2002, nr 4, 3–6.
- [5] PIETRZAK L., *Modelowanie wypadków przy pracy. Część 2. Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka*, 2002, nr 5, 6–9.
- [6] PIETRZAK L., *Modelowanie wypadków przy pracy*, Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka, 2003, nr 10, 23–26.
- [7] CHYBOWSKI L., *Analiza drzewa niezdatności – wprowadzenie do metody*, Industrial Monitor – produkcja i utrzymanie ruchu, Industrial Solutions Group, 2017, nr 2.
- [8] SZOSTAK M., *Modelowanie rozwoju sytuacji wypadkowej w budownictwie, Raport serii PRE nr 8/2017*, Praca doktorska, Wydz. Budownictwa Lądowego i Wodnego PWr, Wrocław 2017.
- [9] KJELLEN U., *Prevention of accidents through experience feedback*, Taylor & Francis, London 2000.
- [10] Ustawa z dnia 30 października 2002 r. o ubezpieczeniu społecznym z tytułu wypadków przy pracy i chorób zawodowych (t.j. DzU.2024.1243).
- [11] <https://ciop.pl/> [dostęp: 8.09.2024].
- [12] <https://ec.europa.eu/> [dostęp: 8.09.2024].

MODELLING OF OCCUPATIONAL ACCIDENTS

The article discusses and compares different models of occupational accidents to analyses the causes of incidents and design effective preventive measures. The article also presents practical examples of the analysis of accidents at work occurring in open-pit mining using the discussed methods.

Agata STEMPOWSKA¹

Tomasz GAWENDA¹

Mikołaj OSTROWSKI²

Izabela POLNIASZEK²

Dariusz FOSZCZ¹

¹ AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie

KRUSZYWO LEKKIE ROZJAŚNIONE Z PRODUKTÓW UBOCZNYCH KLASYFIKACJI SUROWCÓW KAOLINOWYCH DO OGRANICZANIA MIEJSKICH PLAM CIEPŁA

Obszary miejskie mają zazwyczaj znacznie wyższą temperaturę, tzw. Urban Heat Island (UHI) niż otaczające je obszary nieurbanizowane. Zabudowa powierzchni w miastach wpływa nie tylko na tworzeniu miejskich plam ciepła, lecz także na zmniejszanie się naturalnych możliwości retencyjnych. Niska retencja nie zapewnia skutecznych możliwości reagowania na występujący lokalnie deficyt wody oraz nie ogranicza skutków nadmiaru wód w okresach wezbrań. Celem pracy było otrzymanie kruszyw rozjaśnionych o uziarnieniu 2–8 mm z frakcji odpadowych ilasto-piaszczystych powstałych w wyniku wzbogacania glin biało wypalających się, które również modyfikowano dodatkami. Takie kruszywa mogą znaleźć zastosowanie na przykład na dachach budynków (cool roofs). Szczególną uwagę zwrócono na mikrostrukturę kruszywa, ponieważ ideą badań było otrzymanie materiału o odpowiedniej porowatości w skali mezo. Taki rodzaj porowatości uzyskano poprzez odpowiedni proces spiekania. Przeprowadzono również szczegółowe analizy mikroskopowe w celu oceny struktury wytworzonych materiałów. Uzyskano materiały rozjaśnione o wysokiej nasiąkliwości powyżej 30% oraz niskiej gęstości pozornej 1,5 g/cm³ oraz nasypowej 0,9 g/cm³.

1. WPROWADZENIE

Wzrost urbanizacji, zmiana klimatu i niedobór wody to obecne wyzwania środowiskowe w wielu miastach na całym świecie [1]. Efekt miejskiej wyspy ciepła (UHI) jest jedną z głównych konsekwencji zmieniającego się klimatu w miastach. Przypisuje się go wyższym temperaturom w dzielnicach miejskich w porównaniu z otaczającymi je obszarami podmiejskimi lub wiejskimi. Zjawisko to jest głównie związane z dużym zagęszczeniem budynków i struktur miejskich o niskich współczynnikach albedo, co powoduje, że budynki pochłaniają więcej promieniowania słonecznego [2]. Zastoso-

wanie materiałów pochłaniających ciepło, redukcja terenów porośniętych roślinnością lub zielenią i produkcja ciepła antropogenicznego spowodowały, że potencjał UHI znacznie wzrósł w obszarach metropolitalnych [3–5]. Jednym z możliwych rozwiązań poprawy skutków wzrostu urbanizacji jest wprowadzenie zielonej infrastruktury do środowisk miasta. Wdrożenie zielonej infrastruktury jest bardzo interesujące, ponieważ jest to najskuteczniejsze narzędzie adaptacji do zmian klimatu [6, 7]. Mechanizmy działania zielonych i chłodnych dachów są odmienne. Zielony dach zwiększa tempo parowania w obszarach miejskich poprzez dodanie gleby i roślin na dachy i przekierowanie dostępnej energii na ciepło utajone. Natomiast chłodny dach zwiększa odbicie przychoźącego promieniowania słonecznego w obszarach miejskich poprzez zwiększenie albedo powierzchni dachów [7]. Autorzy poprzez zastosowanie odpowiedniego materiału podjęli próbę połączenia tych mechanizmów, skupiając się w rozważaniach bardziej na dachach zielonych.

Zielony dach to wielowarstwowa struktura inżynieryjna, której zewnętrzna warstwa składa się z roślinności. Zielone dachy są zazwyczaj klasyfikowane do dwóch typów, mianowicie dachy ekstensywne – głębokość <150 mm i intensywne, głębokość ≥ 150 mm [8, 9]. Mogą one zapewniać wygodę i zwiększoną wartość estetyczną, ograniczyć odpływ wód opadowych i potencjalnie poprawić ich jakość [10], złagodzić skutki UHI [11, 12]. Ciekawym rozwiązaniem jest zastosowanie kruszyw lekkich, jako podłoże dla zielonych dachów w celu złagodzenia efektu miejskiej wyspy ciepła [13, 14]. Kształt i rodzaj kruszyw stosowanych w drenażu zielonego dachu i warstwy substratu znacząco wpływają na efektywność energetyczną i odprowadzanie wody [15–17]. Ze względu na większą ilość porów wewnętrznych w lekkim kruszywie, absorpcja wilgoci jest szybsza niż w przypadku zwykłego kruszywa. Zatem jednym z najważniejszych wskaźników dla materiałów na zielone dachy jest zdolność zatrzymywania wody przez materiały podłoża.

Ekstensywne zielone dachy są rzadziej konserwowane i mają płytsze warstwy kruszywa, dlatego uprawa różnych rodzajów roślin i gatunków jest w dużym stopniu zależna od podłoża i warstw drenażowych [18, 19]. Jako substraty na zielone dach wykorzystywane są często kruszywa lekkie, jak: keramzyt, LECA, Lytag, perlit – pozyskiwane lub wytwarzane z surowców naturalnych. Wyczerpywanie się zasobów kopalin najwyższej czystości przy rosnących równocześnie wymaganiach odbiorców powoduje konieczność wykorzystania uboższych źródeł surowców, co wiąże się z koniecznością stosowania coraz bardziej zaawansowanych technologii przeróbki. Dodatkową presję stanowią wciąż zaostrzane normy środowiskowe, których skutkiem jest poszukiwanie metod nie obciążających środowiska naturalnego. Rozwój wytwarzania sztucznych lekkich materiałów, jak lekkie kruszywo, może zminimalizować zużycie zasobów naturalnych.

Uzyskane modyfikacje mogą przynieść korzyści i nowe wyzwania dla projektantów z wielu powodów, np. redukcja masy, poprawione właściwości akustyczne czy termiczne, zdolności drenujące czy filtracyjne [20–22]. Autorzy podjęli już próby wytwarzania

kruszywo lekkich z materiałów odpadowych, takich jak glinki powstałe po płukaniu kruszywa [23] oraz mieszanki glin i pyłów betonowych [24]. W tej pracy pokazali kruszywo wytworzone z odpadów powstałych po wzbogacaniu kaolinu z różnymi dodatkami. Ideą było uzyskanie mezo-porowatego tworzywa o podwyższonej białości i refleksyjności, które mogłoby odbijać nadmiar promieniowania słonecznego (wysokie albedo) i jednocześnie stabilizować zmiany temperatury poprzez zatrzymywanie wody.

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. PRZYGOTOWANIE SUROWCÓW

Kaolin poprocesowy. Do badań nad wytworzeniem kruszywo lekkich rozjaśnionych wykorzystano surowiec kaolinowy, będący odpadem w postaci wylewu z procesu klasyfikacji hydrocyklonu. Nadawą była glina ze złoża „Janina” firmy Ekoceramika Sp. z o.o. (Bolesławiec), którą wzbogacono w hydrocyklonach. Gлина Janina jest jasno wypalającą się gliną o charakterze kaolinitowo-illitowym, plastyczną, z niską zawartością tlenków barwiących. Wzbogacony kaolin znajduje zazwyczaj zastosowanie w przemyśle ceramiki szlachetnej. Dużą jednak część procesu wzbogacania stanowi gęstwa poprodukcyjna zawierająca głównie kwarc i resztki kaolinu/illitu, nie znajdująca bezpośredniego zastosowania. Założeniem było uzyskanie odpowiedniej gęstości oraz uziarnienia przelewu, jako produktu o optymalnych parametrach wykorzystywanego do produkcji ceramiki. Natomiast wylew hydrocyklonu stanowił produkt uboczny, został on nazwany „kaolin wylew”. Wobec tego autorzy pracy postanowili wykorzystać wylew hydrocyklonu, jako pełnowartościowy materiał do produkcji kruszywo o szczególnych właściwościach i przeznaczeniu na zielone dachy.

Wylew z hydrocyklonu charakteryzował się zróżnicowaną gęstością ($1,41\text{--}2,31\text{ g/cm}^3$) ze względu na pracę hydrocyklonów przy różnych parametrach. Pobrana uśredniona i wysuszona próbka do badań o masie 10 kg posiadała: gęstość $1,82\text{ g/cm}^3$, uziarnienie $0\text{--}0,1\text{ mm}$, przy czym $P_{20} = 0,063\text{ mm}$ a $P_{80} = 0,315\text{ mm}$. Skład tlenkowy podano w tabeli 1. Materiał ten stanowił główną bazę do wytworzenia kruszywo.

Tabela 1. Uśredniony skład tlenkowy wylewu z hydrocyklonu
Table 1. Averaged oxide composition of the hydrocyclone spillway

Kaolin wylew [% wag]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Inne
	83,41	11,7	0,12	0,19	0,42	0,44	0,42	3,3

Granodioryt separowany. Badaniom poddano piaski granodiorytowe $0\text{--}1\text{ mm}$, odpad po przeróbce mechanicznej kruszywa łamanego. Granodioryty jako skały zawierają w swojej strukturze minerały ciemne, jak pirokseny, amfibole i biotyt, które będą po-

wodowały zabarwianie się kruszyw podczas spiekania. Dlatego zdecydowano się na dodatkowe wzbogacanie magnetyczne tego surowca. Frakcja niemagnetyczna to głównie skalenie potasowe, plagioklasy i kwarc. Skalenie sodowo-wapniowe tworzą roztwór stały, nazywany plagioklazami, pomiędzy skrajnymi członami, tj. albitem i anortytem. Również w znaczący sposób przyczyniają się do obniżenia temperatury spiekania różnych tworzyw mineralnych. Surowce skaleniowe są zasobne w alkalia ($K_2O + Na_2O$), związane głównie w formie glinokrzemianów, tj. skaleni potasowych (ortoklaz, mikroklin, sanidyn, adular) i sodowo-wapniowych. Z technologicznego punktu widzenia zastosowanie plagioklazów jako topników, to ważne są jedynie człony zasobne w albit, charakteryzujące się niską temperaturą topienia. Uśrednione składy tlenkowe materiału z granodiorytu przedstawiono w tabeli 2. Ponadto w tym procesie uzyskano wysokie zawartości kwarcu, który ma korzystne właściwości powierzchniowego odbijania światła i słabe właściwości akumulujące ciepło, co czyni go bardzo dobrym materiałem do uzyskania tzw. chłodnych warstw dachu [25, 26]. Wyseparowane ze skały minerały ciemne nie stanowią odpadu, ponieważ po odpowiednim przetworzeniu zostaną użyte jako substraty odżywiające rośliny. Autorzy prowadzą dodatkowe badania w tym zakresie.

Tabela 2. Uśredniony skład tlenkowy granodiorytu separowanego
Table 2. Averaged oxide composition of separated granodiorite

Granodioryt separowany [% wag]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Inne
	79,53	10,75	0,58	0,26	0,65	3,76	3,46	0,89

Topniki mineralne układu Na + K + Li. Ideą przeprowadzonego eksperymentu było wytworzenie kruszyw białych porowatych na drodze spiekania. Ze względów ekonomiczno-energetycznych celem było uzyskanie jak najniższej możliwej temperatury topienia. Z wcześniejszych badań wynikało, że do obniżenia temperatury można zastosować zestawy topników mineralnych tworzących eutektyki (Li-Na-K), zachowujące jednocześnie białą barwę tworzywa. Do tego celu zastosowano surowce występujące w przyrodzie i dostępne handlowo, zawierające w miarę „czyste” minerały alkaliczne. Skład topienia układu: spodumen – skaień potasowy – skaień sodowy przy udziałach odpowiednio 40/30/30 % [27]. Skład chemiczny zestawu mineralnego przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Analiza tlenkowa układu topników
Table 3. Oxide analysis of the flux system

Układ topników [% wag]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	Inne
	67,1	19,09	0,49	0,50	0,11	0,44	4,12	4,06	2,44	1,65

2.2. PRZYGOTOWANIE GRANULATÓW

Przygotowano zestawy mineralne do otrzymania granulatu, proporcje dobrano tak, aby w jak najszybszym czasie i z niewielkim udziałem wody otrzymać stabilny granulat, który po wysuszeniu utrzymuje swój kształt. Przeprowadzono wiele prób granulacji różnych składów kruszywa, jednakże w artykule przedstawiono najkorzystniejsze zestawy mineralne. Wodę do zestawów dodawano w takiej ilości aby uzyskać stabilny granulat. Ze względu na plastyczność surowców ilości wody zmieniały się. Składy kruszyw przedstawiono w tabeli 4, zawartość poszczególnych tlenków pokazano w tabeli 5. Oszacowano też przybliżoną zawartość kwarcu w każdej z próbek.

Tabela 4. Składy przygotowanych zestawów na kruszywa
Table 4. Composition of prepared sets for aggregates

Nazwa próbki	Zestaw mineralny	Masa surowców [g]	Ilość wody w stosunku do suchej masy	
			[g]	[% wag]
Kruszywo 1	kaolin wylew	2000	831	29
Kruszywo 2	kaolin wylew, granodioryt separowany	1000 1000	1513	38
Kruszywo 3	kaolin wylew, zestaw topników	1500 500	1013	33

Tabela 5. Składy tlenkowe (w tym zawartość kwarcu) w przygotowanych zestawach na kruszywa
Table 5. Oxide compositions (including quartz content) in prepared aggregate sets

Próbka [% wag]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	Kwarc
Kruszywo 1	83,41	11,70	0,12	0,19	0,42	0,44	0,42	–	~65
Kruszywo 2	81,48	11,25	0,36	0,23	0,55	2,10	1,95	–	~55
Kruszywo 3	79,10	10,35	0,19	0,27	0,43	1,35	1,35	0,61	~49

Granulowanie materiału. Granulacja dynamiczna, odbywa się w dynamicznym granulatorze przeciwbieżnym MDL-03V (IdeaPro, Nowa Sól) o zmiennej prędkości obrotowej bębna i mieszadła o przeciwnych kierunkach obrotów. Maszyna umożliwia przetwarzanie różnych rodzajów konsystencji w wybrane formy granulatu. Mieszanie i granulacja odbywa się w jednym urządzeniu i zapewnia najwyższe standardy w zakresie jakości produktu, zużycia energii i wydajności na jednostkę objętości urządzenia technologicznego. Surowce uzyskują spoistość w bardzo krótkim czasie – kilkudziesięciu sekund, a ponieważ jest to system z zamkniętą komorą, powstawanie pyłu jest ograniczone do minimum. Proces homogenizacji surowców trwał około 1 min. przy obrotach misy 110 obr/min i obrotach mieszadła 1200 obr/min. Proces granulacji został przeprowadzo-

ny w czasie około 2 min, przy parametrach pracy granulatora: misa 70 obr/min oraz mieszadło 120 obr/min. Powstały materiał przesiano na sitach uzyskując odpowiednie frakcje i pozostawiono do wysuszenia.

2.3. METODY BADAWCZE

Spiekanie. Aby utrwalić kształt granulatu zastosowano proces spiekania. Temperaturę procesu wyznaczono stosując badania w mikroskopie wysokotemperaturowym, które należą do standardowych badań właściwości termicznych materiałów. Pomiary przeprowadzono w mikroskopie wysokotemperaturowym Hesse-Instruments EM301 (Osterode am Harz, Germany) wzrost temperatury wynosił 80°C/min do 650°C oraz 10°C/min od temperatury 650°C do 1500°C. Próbkę do testów pobrano z materiału surowego uformowanego w walec o wymiarach 5 mm wysokości i 3 mm średnicy. Po ustaleniu temperatur procesowych wypiekanie przeprowadzono w piecu elektrycznym komorowym typu FCF 12SHM firmy Czylok (Jastrzębie-Zdrój), maksymalna temperatura pracy do 1220°C, komora robocza o pojemności 8 dm³, atmosfera utleniająca.

Analiza obrazowa. Obserwacje stereoskopowe prowadzono za pomocą mikroskopu stereoskopowego firmy NIKON model SMZ 1000. Mikroskop stereoskopowy wyposażony jest w głowicę binokularną umożliwiającą obserwacje w zakresie powiększeń od 0,8× do 8× oraz obiektywy Plan i Plan Apo. Mikroskop posiada podwójny mechanizm ogniskujący mikro/makro. Obserwacje mikroskopem stereoskopowym i polaryzacyjnym przeprowadzono na preparatach mikroskopowych wykonanych poprzez zatopienie materiału ziarnistego w żywicy epoksydowej z dodatkiem utwardzacza, a następnie proces szlifowania i polerowania automatycznie polerko-szlifierką firmy Struers. Powierzchnię ziaren obserwowano mikroskopem cyfrowym Keyence, VHX-7000N, Japan.

Analizę SEM przeprowadzono mikroskopem elektronowym firmy Thermo Scientific, model Quattro S z możliwością analizy (bezwzorcowej) spektroskopii dyspersji energii (EDS) – analiza składu pierwiastkowego. Obrazowanie mikrostruktury wykonano w warunkach wysokiej próżni z użyciem detektora ETD z obrazowaniem elektronami wtórnie rozproszonymi SE – secondary electrons. Analizę EDS przeprowadzono z zastosowaniem detektora nowej generacji firmy EDAX w formie analiz punktowych.

Badania wytrzymałościowe. Badania zostały wykonane na aparaturze firmy Erweka TAR II, (Frankfurt, Germany). Wynikiem badania jest procentowy ubytek masy próbki o uziarnieniu <2 mm. Czas badania wynosił 10 min, prędkość zbiornika 20 obr/min. Badano wąską frakcję materiału 4–6,3 mm.

Testy wytrzymałości statycznej zbadano z wykorzystaniem aparatury firmy ERWEKA TBH 125 TD (Frankfurt, Germany). Zakres pomiarowy wynosi 10–500 N, minimalna średnica ziarna 2 mm. Pomiary zostały wykonane przy stałej prędkości nacisku. Badana była wąska frakcja materiału 4–6,3 mm.

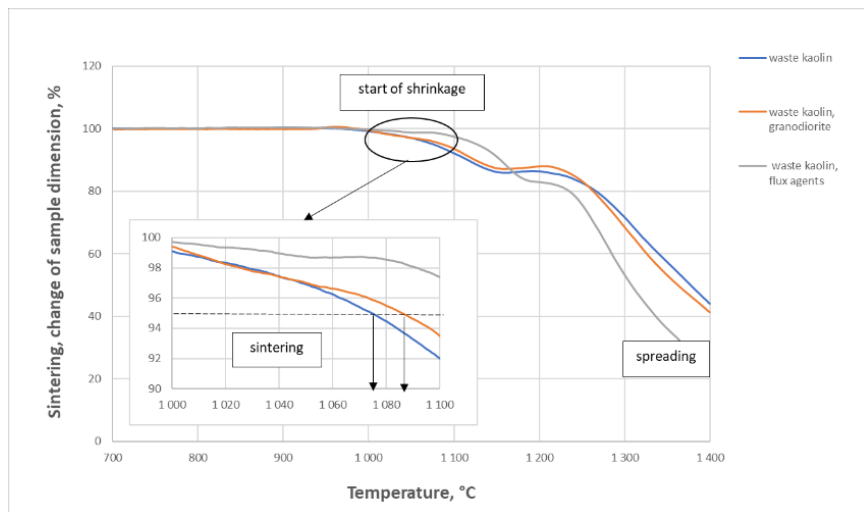
3. WYNIKI I DYSKUSJA

3.1. UZYSKANIE SPIEKU

Ogólnie spiekanie jest procesem złożonym z trzech etapów:

- I, faza wstępna spiekania – obserwowana, gdy temperatura materiału wynosi ok. 0,25 temperatury topnienia, w etapie tym nie obserwuje się skurczu,
- II, faza pośrednia, zachodzi, gdy temperatura materiału wynosi 0,25–0,75 temperatury topnienia, zauważalny jest początek zmian wymiarów próbki,
- III, faza końcowa, koniec fazy zagęszczania, przekształcenie porów otwartych w zamknięte i ich zanik, przy postępującym ciągle rozroście ziaren.

W celu wyznaczenia temperatur procesu wykonano badania mikroskopem wysoko-temperaturowym. Na podstawie ciągłej obserwacji próbki i rejestrowania zmian jej wymiarów w funkcji temperatury, możliwe jest wyznaczenie początkowej temperatury spiekania [28, 29]. Po podgrzaniu do odpowiedniej temperatury, poniżej temperatury topnienia, zbiór stykających się ze sobą ziaren wiąże się ze sobą, tworząc polikryształ. Na rysunku 1 przedstawiono zmiany geometrii próbek w całym zakresie pomiaru, czyli od 700 do 1500°C. Pierwsze efekty zaobserwowano w temperaturze nieco powyżej 1000°C, szczególnie dotyczy to próbek 1 i 2. Próbką z układem topnikowym niestety nie przyniosła oczekiwanych rezultatów. Intensywne działanie tych eutektyków obserwuje się w temperaturze ok. 1170°C, co można zauważyć przez znaczne zmniejszenie się wymiarów próbki 3 (ok. 85%). Dopiero w takiej temperaturze tworzy się duża ilość fazy ciekłej. Taki układ mineralny byłby bardzo korzystny dla uzyskania



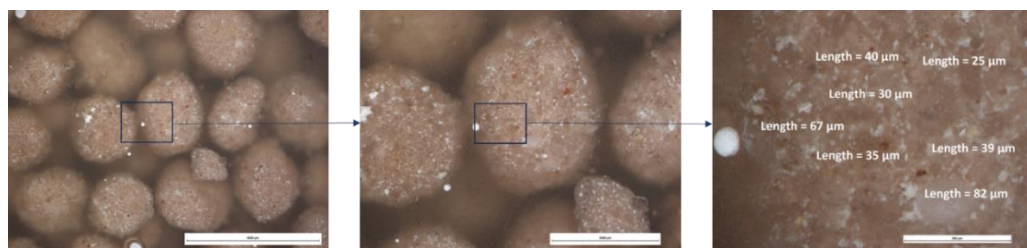
Rys. 1. Krzywe spiekalności kruszyw
Fig. 1. Aggregate sintering curves

kruszyw spieczonych typu porcelanowego o wysokiej wytrzymałości i bardzo niskiej nasiąkliwości. Zamiarem autorów było jednak otrzymanie spieku porowatego. Za rozpoczęcie procesu spiekania można uznać temperatury 1075°C w przypadku próbki 1 oraz 1087°C dla próbki 2. Zatem temperaturę procesową dobrano 1100°C. Trzeba wziąć pod uwagę, że w przypadku kruszyw komercyjnych (keramzyt) temperatury wypału wynoszą co najmniej 1200°C.

W całym zakresie spiekalności nie zaobserwowano pęcznienia próbek. Kruszywa na bazie kaolinu są barwy kremowej, jedynie kruszywo zawierające granodioryt jest nieco ciemniejsze, na skutek niewielkiej ilości obecnych minerałów łuszczykowych oraz z grupy piroksenów i amfiboli. Kruszywo to ma bardziej różnorodny kształt oraz rozmiar. Materiał aglomeruje w większe ziarna tworząc grudki. Kruszywa po spieczeniu wykazują kształt kulisty, przy czym kruszywo z topnikami odznacza się największym stopniem obtoczenia oraz najbardziej zwartą i zbitą strukturą. Pod względem strukturalno-teksturalnym kruszywa wykazują różnice, które kształtowane są przez zastosowany dodatek.

3.2. ANALIZA OBRAZOWA I STRUKTURALNA

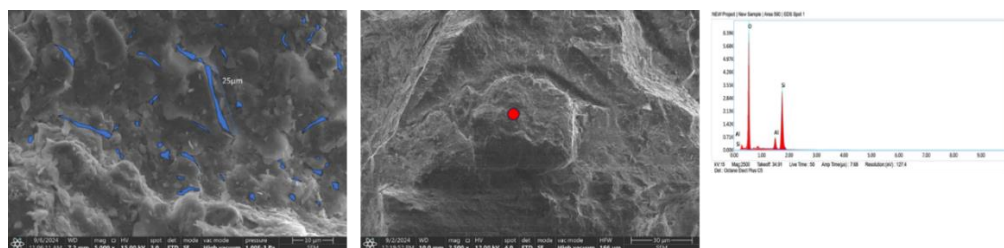
Porowatość ma kluczowe znaczenie, jeśli chodzi o pochłanianie wody. Istotny jest jednak rodzaj tej porowatości, okazuje się bowiem, że zwiększenie liczby krętych ścieżek przepuszczania wody przez warstwę substratu powoduje wydłużenie czasu retencji i zmniejszenie przepuszczalności wody systemów zielonych dachów [30]. Czyli ważny jest sposób ułożenia kanalików w strukturze kruszywa, a także ich wielkość. Duże pory będą powodowały szybki drenaż wody, natomiast rozwinięta porowatość kapilarna o wymiarze około 0,5–10 µm pozwoli na jej zatrzymanie. W otrzymanym kruszywie zaobserwowano makro i mezopory oraz kanaliki transportowe. Przeprowadzone analizy miały na celu ocenę strukturalno-teksturalną wytworzonych kruszyw oraz składu pierwiastkowego metodą SEM EDS. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 2–7. Kruszywo 1 wykazuje zdecydowanie bardziej porowatą strukturę



Rys. 2. Ogólny widok kruszywa „kaolin wylew” oraz jego struktura wraz z wymiarowanymi pustkami Mikroskop stereoskopowy
Fig. 2. General view of the ‘kaolin waste’ aggregate and its structure with dimensioned voids Stereoscopic microscope

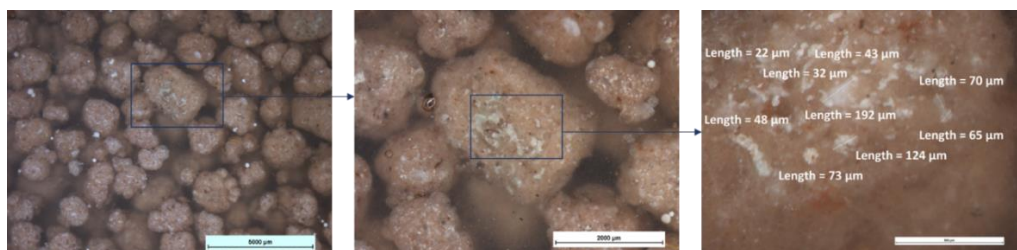
w porównaniu do kruszywa 3. W obrazowaniu mikroskopowym zidentyfikowano pustki, średnio wielkości do 0,040 mm, największe do 0,100 mm (rys. 2). Istotną cechą kruszywa 1, odróżniającą od innych kruszyw jest obecność największych ilości mikroporów wielkości do 0,005 mm (rys. 3). Na podstawie obserwacji mikroskopowych można ocenić, że w tej próbce występuje zarówno porowatość sferyczna, jak i kanalikowa w rozmiarze mikro i mezo.

Kruszywo 2 spośród wszystkich kruszyw na bazie kaolinu wykazuje największą porowatość i najmniejszy stopień zwięzłości. W obrazowaniu kruszywa 2 zaobserwowano liczne pustki o zmiennej wielkości od najmniejszych – około 0,020 mm, po większe, stanowiące szereg połączonych przestrzeni tworzących puste obszary wielkości do 0,2 mm (rys. 4). W obserwacjach mikroskopowych zidentyfikowano również pojedyncze ziarna mineralne zarówno skaleni, jak i mik (łyśczyki głównie muskowit, rzadziej biotyt) oraz kwarc. Minerale te pochodzą głównie z zastosowanego granodiorytu w procesie wytwarzania kruszyw. Potwierdziły to również obserwacje SEM (rys. 5) oraz analiza pierwiastkowa EDS. Dodatkowo, w obrazowaniu SEM zaobserwowano mikrospeknięcia wielkości około 0,001 mm.



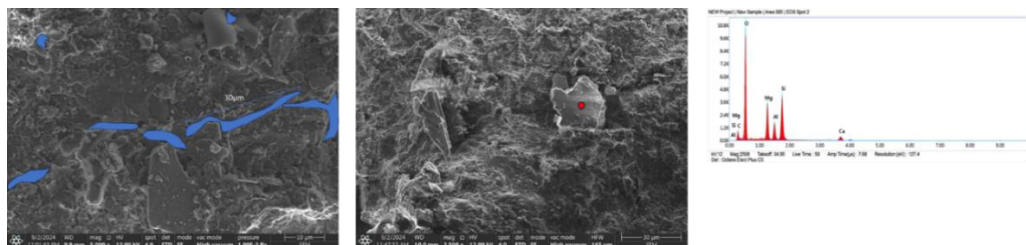
Rys. 3. Mikrostruktura ziarna kruszywa na bazie kaolinu z zaznaczoną porowatością, wraz z analizą pierwiastkową SEM-EDS w punkcie

Fig. 3. Microstructure of kaolin-based aggregate grains with marked porosity, together with SEM-EDS elemental analysis



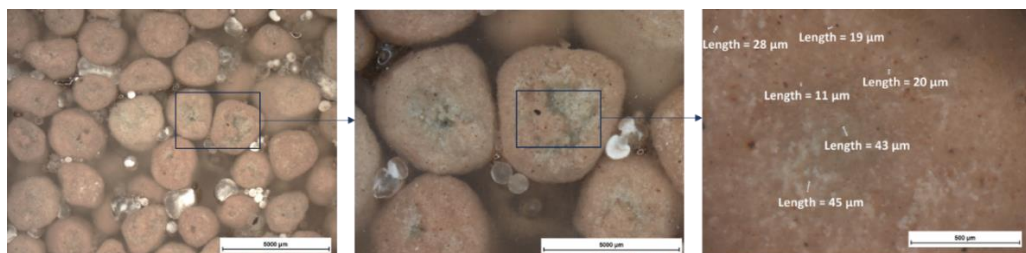
Rys 4. Ogólny widok kruszywa „kaolin, granodioryt” oraz jego struktura wraz z wymiarowanymi pustkami. Mikroskop stereoskopowy

Fig. 4. General view of the aggregate ‘kaolin, granodiorite’ and its structure with dimensioned voids. Stereoscopic microscope



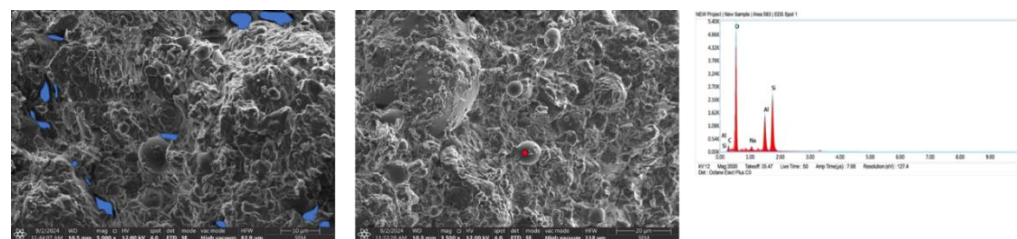
Rys. 5. Mikrostruktura ziarna kruszywa z granodioritem z zaznaczonymi mikroszczelinami (widoczne tabliczkowe kryształy skaleni oraz blaszki mik) wraz z analizą pierwiastkową SEM-EDS w punkcie

Fig. 5. Microstructure of granodiorite aggregate grains with marked microcracks (visible tabular feldspar crystals and micaceous lamellae) together with elemental SEM-EDS analysis



Rys. 6. Ogólny widok kruszywa „kaolin topniki” oraz jego struktura wraz z wymiarowanymi pustkami Mikroskop stereoskopowy

Fig. 6. General view of the aggregate ‘kaolin, fluxes’ and its structure with dimensioned voids Stereoscopic microscope



Rys. 7. Mikrostruktura ziarna kruszywa z topnikami z zaznaczonymi mikroszczelinami (widoczne sferoidalne ziarna topników) wraz z analizą pierwiastkową SEM-EDS w punkcie

Fig. 7. Microstructure of aggregate grains with fluxes with marked microcracks (visible spheroidal flux grains) together with elemental SEM-EDS analysis

W obrazowaniu stereoskopowym kruszywa 3 zidentyfikowano pustki maksymalnej wielkości $\sim 0,050$ mm (rys. 6), przy czym przeważają mikoprzestrzenie wielkości średnio $0,020$ mm. Pustki zlokalizowane są głównie wewnątrz ziarn. Analiza SEM potwierdziła obecność topnika w kruszywa 3 w postaci niemalże sferoidalnych ziaren

o gładkiej powierzchni wielkości do $\sim 0,015$ mm (rys. 7). Na rysunku 7 przedstawiono wyniki analizy SEM-EDS kruszywa 3. Próbką ta charakteryzuje się najmniej rozwiniętą porowatością, właściwie nie znaleziono mikropęknięć o strukturze kanalikowej.

3.3. GĘSTOŚĆ POZORNA I NASYPOWA, JAMISTOŚĆ

Procesy rekrystalizacji zachodzące już w czasie nagrzewania materiału do temperatury spiekania w zasadzie nie mają już bezpośredniego wpływu na zmiany gęstości spieków. Zanik porów i rozrost ziaren w czasie spiekania materiałów porowatych są procesami przebiegającymi równolegle i wzajemnie oddziaływującymi na siebie. Gęstość ma bezpośredni związek z porowatością otwartą. Proces spiekania prowadzono, tak aby uzyskać możliwie trwałą spiek i jednocześnie nie zamknąć porowatości otwartej granul. Parametry uzyskanego kruszywa są bardzo podobne. Gęstość pozorną kruszyw (tab. 6) jest mało zróżnicowana pomiędzy poszczególnymi próbkami o wartości od 1,54 do 1,59 g/cm³. Gęstości pozorne otrzymanych kruszyw nie są wyższe niż stanowi norma EN 13055:2016 Lightweight aggregates, natomiast zdecydowanie daleko im do typowych kruszyw lekkich, np. keramzytu $\sim 0,5$ g/cm³. Gęstość nasypowa wszystkich badanych kruszyw w frakcji 4–6,3 mm jest także podobna, spełnia wyżej wymienioną normę i wynosi 0,9 g/cm³.

Tabela 6. Zestawienie parametrów fizycznych kruszyw o uziarnieniu 4–6,3 mm
Table 6. Summary of physical properties of aggregates with grain size 4–6.3 mm

Próbka	Gęstość pozorną [g/cm ³]	Gęstość nasypowa [g/cm ³]	Jamistość [%]
Kruszywo 1	1,59	0,91	54,23
Kruszywo 2	1,54	0,90	52,98
Kruszywo 3	1,58	0,91	55,19

Sumę pustek pomiędzy kulistymi ziarnami można określić jako jamistość. Jamistość jest to udział fazy ciekłej (wody) w przestrzeni międzyziarnowej próbki o znanej objętości i masie. Sposób badania jamistości polega na zważeniu masy suchej mieszczącego się w pojemniku o znanej pojemności, następnie zalaniu wodą destylowaną do poziomu znanej pojemności (całe kruszywo jest zakryte wodą) i zważeniu kruszywa z wodą. Jamistość to procentowa zawartość przestrzeni międzyziarnowych odpowiadająca masie wody, która zajmuje przestrzeń pomiędzy ziarnami, wyrażona procentowo. Parametr ten jest niezwykle ważny. Materiał o dużej jamistości utrzymuje prawidłowy poziom wilgoci, składników odżywczych i powietrza oraz prawidłową strukturę cząstek wymaganą

do długotrwałego zrównoważonego wzrostu roślin. Wytworzone kruszywa mają kulisty kształt i ich jamistość wynosi około 52–55%. Jest to wartość porównywalna z granulowanymi kruszywami lekkimi dostępnymi komercyjnie.

3.4. WYTRZYMAŁOŚĆ KRUSZYWA NA ŚCIERALNOŚĆ I MIAŻDŻENIE

Lekkie kruszywa przewidziane na zielone dachy nie przenoszą dużych obciążeń, nie ma zatem potrzeby, żeby charakteryzowały się wysokimi właściwościami na miażdżenie. Powinny jednak charakteryzować się wytrzymałością na ścieranie. Po pierwsze jest to kwestia transportu i wbudowania w zielony dach (eliminacja zapylenia procesowego). Drugim powodem jest powstawanie frakcji pyłastej podczas eksploatacji zielonego dachu, która osiada na dnie warstwy i może zakłócać odprowadzanie nadmiarowej wody oraz aerację podłoża, a także oblepiać korzenie rozwijających się roślin i uniemożliwiać prawidłowy ich wzrost. W tabeli 7 i 8 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na miażdżenie i ścieralności granul. Każda próba miażdżenia obejmowała 30 pomiarów granul frakcji 4–6,3 mm. Do prób wytrzymałości na ścieranie pobierano 10 ziaren, czas pomiaru wynosił 10 minut z prędkością obrotową maszyny 20 obr/min. Próby wytrzymałości na ścieranie wykonywano trzykrotnie i wyniki uśredniono.

Wytrzymałość statyczna kruszyw jest zróżnicowana. Najmocniejsze kruszywo 1 uzyskano z kaolinu poprocesowego bez dodatków (średnio 166 N), słabsze otrzymano w przypadku prób 2 i 3 średnio ~100 N. W każdej z prób zaobserwowane wysokie wartości odchylenia standardowego pomiarów (tab. 7). Jednak jak wspomniano wcześniej kruszywa projektowane na zielone dachy nie przenoszą obciążeń, dlatego nie ma potrzeby aby miały wysoką i stabilną wytrzymałość. Znacznie ważniejszym parametrem jest odporność na ścieranie, która w przypadku otrzymanych kruszyw jest wysoka. Maksymalny niekorzystny ubytek masy jaki uzyskano w badaniach wynosił 2,72 %, co można uznać za wynik satysfakcjonujący (tab. 8).

Tabela 7. Badania wytrzymałości statycznej (miażdżenie)
Table 7. Static strength tests (crushing)

Próbka	Miażdżenie		
	Średnia masa granul [g]	Średnia siła nacisku [N]	Max siła nacisku [N]
Kruszywo 1 kaolin wylew	0,131 ± 0,045	166,57 ± 73,27	398
Kruszywo 2 kaolin wylew, granodioryt	0,103 ± 0,030	100,37 ± 36,14	186
Kruszywo 3 kaolin wylew, topniki	0,104 ± 0,026	104,67 ± 47,21	294

Tabela 8. Badanie wytrzymałości dynamicznej (ścieranie)
Table 8. Dynamic strength test (abrasion)

Próbka	Ścieralność, średni ubytek masy [%]
Kruszywo 1 – kaolin wylew	0,12
Kruszywo 2 – kaolin wylew, granodioryt	2,72
Kruszywo 3 – kaolin wylew, topniki	0,74

3.5. NASIĄKLIWOŚĆ WODNA, CAŁKOWITA RETENCJA

Popularną techniką ograniczającą powstawanie plam ciepła jest uczynienie powierzchni miejskich parowalnymi [31]. Chłodzenie parowe może być skuteczne poprzez buforowanie utajonego strumienia ciepła z powodu przejścia cieczy w parę wody przechwyconej przez nawierzchnię [7]. Jeśli chodzi o zdolność buforowania wody wykazano, że przepuszczalność wody zależy od porowatości i kształtu materiałów warstwy substratu zielonego dachu [32]. W wielu miastach na całym świecie uznano, że najważniejszą ekologiczną zaletą nasadzeń na dachach jest zarządzanie wodą burzową. Trudno jest podać średnie wartości wydajności, jednak można oczekiwać, że około 50% opadów deszczu zostanie zatrzymanych przez ekstensywny zielony dach. Mikroretencja w porach kruszywa ma kluczowe znaczenie. Zasympulowano retencję wodną podczas opadu gwałtownego. W tym celu pobrano po 100 g wysuszonego kruszywa i przelewano przez niego 300 ml wody destylowanej. Wodę wlewano tak, aby przepływał dynamiczny (symulacja opadu nawałnego), a powierzchnia kruszywa całkowicie zwilżona. Czas przelewu każdej próbki wynosił 10 sekund. Eksperyment dla każdej próbki powtarzano pięć razy, po czym wyliczono wartość średnią. Wyniki przedstawiono w tab. 9. Całkowita retencja wodna jest ilością wody zatrzymanej w kruszywie w odniesieniu procentowym.

Tabela 9. Zestawienie parametrów hydrometrycznych kruszyw
Table 9. Summary of hydrometric parameters of aggregates

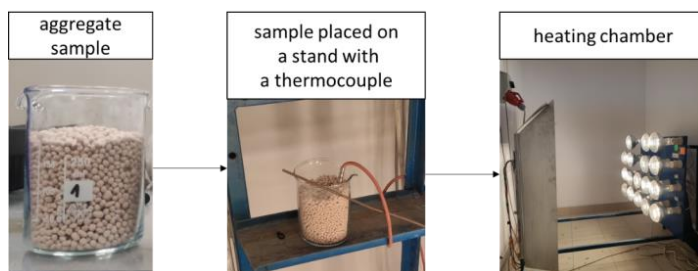
Próbka	Nasiąkliwość całkowita [%]	Pojemność retencyjna [%]	pH przesączu	Przewodność przesączu [μ S]
Kruszywo 1	44	32,6	7,80	165
Kruszywo 2	36	30,9	7,34	145
Kruszywo 3	40	33,1	7,39	167

Zielony dach retencyjny jest w stanie zmagazynować duże ilości wody opadowej, co zasadniczo poprawia bilans wodny, przeciwdziała skutkom suszy oraz chłodzi. Pomimo bardzo niskiej gęstości nasypowej kruszywo lekkie typu keramzytowego

ma względnie niską nasiąkliwość, ponieważ w jego strukturze dominuje porowatość zamknięta. Taka porowatość właściwie nie ma znaczenia w przypadku pochłaniania wody w czasie gwałtownych opadów, natomiast może znaleźć zastosowanie jako warstwa drenażowa. Wytworzone spiekane kruszywa mają dobrą pojemność retencyjną wynoszącą powyżej 30%. Jeżeli kruszywo bardzo dobrze pochłania wodę, pojemność retencyjna może być równa nasiąkliwości całkowitej. W badaniach przeprowadzono również analizę pH i przewodności przesączonej wody. Nie zanotowano znaczących zmian pH, wymywalność substancji rozpuszczalnych pozostaje na bardzo niskim poziomie. Wartość pH wody destylowanej użytej do badań wynosiła 6,48 a przewodność 32 μS . Badane kruszywo można uznać zatem za inertne i bezpieczne jeśli chodzi o wypłukiwanie się związków potencjalnie niebezpiecznych i korodujących.

3.6. WŁAŚCIWOŚCI TERMICZNE, REFLEKSYJNOŚĆ

Badano nagrzewanie się kruszyw w komorze klimatycznej wykorzystując równomiernie rozłożone promienniki ciepła o mocy 7 kW. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 8. Jest ono wyposażone w czujniki alarmujące przekroczenie temperatury 95°C. Odległość między promiennikami a próbkami wynosiła 1,5 m, a temperatura początkowa komory 25°C.

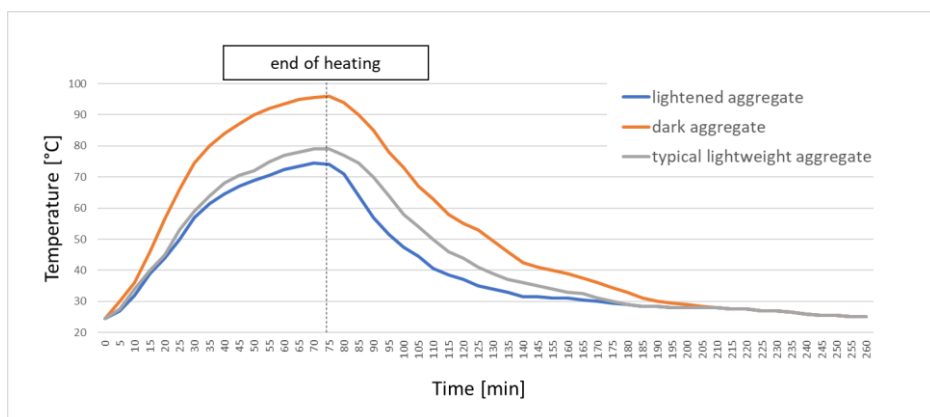


Rys. 8. Schemat stanowiska badawczego do badań termicznych (ICiMB Kraków)

Fig. 8. Schematic diagram of the test stand for thermal tests (ICiMB Kraków)

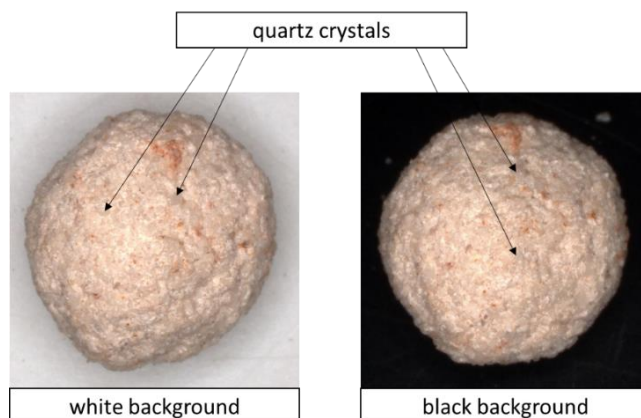
W celach porównawczych oprócz wytworzonych kruszyw rozjaśnionych badano również typowe kruszywo lekkie typu keramzytowego oraz ciemny łupkę ilasty znajdujący zastosowanie w ogrodnictwie. Badano taką samą objętość próbek czyli 200 cm^3 . Wyniki tych badań przedstawiono w postaci krzywych grzanie – swobodne studzenie na rys. 9. Najbardziej nagrzewające się i zarazem najbardziej niekorzystne jest kruszywo z łupka ilastego. W czasie ok. 75 min osiągnęło temperaturę 96°C podczas, gdy kruszywo lekkie typowe i rozjaśnione uzyskało temperatury odpowiednio 80°C i 74°C, co daje różnicę temperatur 20 stopni. Za właściwości cieplne odpowiedzialne są współ-

czynniki przewodności cieplnej minerałów wchodzących w skład kruszywa. Charakteryzują się następująco: SiO_2 1–11 W/mK, Al_2O_3 24–39 W/mK, MgO 32–63 W/mK. Z punktu widzenia termodynamicznego dwutlenek krzemu żle akumuluje ciepło i ma najniższe wartości współczynnika przewodności cieplnej, a więc pożądana jest jego jak najwyższa wartość (tab. 5, składy tlenkowe kruszyw). Tlenkami dobrze i bardzo dobrze przewodzącymi i akumulującymi ciepło są tlenki glinu i magnezu [25]. Najwyższe wartości tych tlenków obserwuje się w minerałach ciemnych grup piroksenów i amfiboli oraz w surowcach ilastych stosowanych do produkcji kruszyw lekkich. Wpływ na to zjawisko mógł mieć również fakt, że oprócz odmiennego składu, próbki te różniły się znacznie między sobą gęstością; gęstość pozorna próbki kruszywa rozjaśnianego wyniosła $1,50 \text{ g/cm}^3$, gęstość pozorna keramzytu oscyluje w granicach $1,25 \text{ g/cm}^3$, natomiast gęstość pozorna łupka to około $2,7 \text{ g/cm}^3$.



Rys. 9. Krzywe „grzanie – swobodne studzenie” kruszyw
Fig 9. Curves “heating – free cooling” of aggregates

Konwencjonalne materiały stosowane w infrastrukturze nawierzchniowej na dachach, jak np. cement, charakteryzują się zazwyczaj niskimi właściwościami refleksyjnymi (tj. niskim odbiciem słonecznym i emisyjnością cieplną) i niską przepuszczalnością. Dlatego są podatne na wysokie zyski ciepła, co skutkuje wysoką temperaturą powierzchni i uwalnianiem ciepła jawnego, a w konsekwencji przyczynia się do efektu miejskich plam ciepła [33]. Refleksyjność to zdolność odbijania zmiennych ilości światła padającego na daną powierzchnię. Związana jest ściśle z właściwościami minerałów. Można ją oceniać wizualnie. Powierzchnie mogą bardzo dobrze odbijać i załamywać światło. Na rysunku 10 przedstawiono zdjęcie z mikroskopu cyfrowego próbki kruszywa z największą ilością kwarcu, czyli kruszywa 1 – widoczne odbijające powierzchnie kryształów. Kwarc ze względu na swoje właściwości odbłaskowe może skutecznie odbijać znaczną część promieniowania słonecznego.



Rys. 10. Fotografia z mikroskopu cyfrowego granuli kruszywa z widocznymi kryształami kwarcu
 Fig. 10. Digital microscope photograph of an aggregate granule with visible quartz crystals

4. WNIOSKI

Wdrożenie alternatywnych materiałów, które mogą odbijać padające promieniowanie słoneczne i jednocześnie zatrzymywać wodę, jest uważane za skuteczną strategię obniżania temperatury powierzchni. Takim materiałem mogłyby być rozjaśnione kruszywa pozyskiwane z odpadów kaolinowych. Wnioski z przeprowadzonych prac:

- uzyskano kruszywa o gęstości pozornej od 1,54 do 1,59 g/cm³,
- pożądane właściwości kruszyw uzyskano poprzez odpowiednie spiekanie, które miało na celu jedynie zlepienie cząstek mineralnych bez zaniku porów,
- kruszywa mają dobrą retencję wody na poziomie 30%,
- testy termiczne wykazały mniejszą podatność na ogrzewanie kruszyw w porównaniu do typowych kruszyw,
- najlepszy rodzaj porowatości uzyskano w kruszywie 1, tj. opartym na odpadach kaolinowych z hydrocyklonu, który jest otwarty w skali mezo, tj. o średnicy 30–300 μm,
- testy wykazały, że kruszywa są odpowiednie do stosowania w projektach zielonych dachów.

LITERATURA

- [1] HOPKINS G., GOODWIN C., *Living Architecture: Green Roofs and Walls*. Collingwood CSIRO Press, Collingwood, Victoria, Australia, 2011, <https://doi.org/10.1071/9780643103078>
- [2] DI GIUSEPPE E., D'ORAZIO M., *Assessment of the effectiveness of cool and green roofs for the mitigation of the Heat Island effect and for the improvement of thermal comfort in Nearly Zero Energy Building*, Architectural Science Review, 2014, 58 (2), 134–143, <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.966050>

- [3] SANTAMOURIS M., SYNNEFA A., KARLESSI T., *Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions*, Solar Energy, 2011, Vol. 85/12, 3085–3102, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- [4] SANTAMOURIS M., *Cooling the Cities – A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments*, Solar Energy, (2014) 3, 682–703.
- [5] SUN Y., AUGENBROE G., *Urban heat island effect on energy application studies of office buildings*, Energy and Buildings, 2014, Vol. 77, 171–179, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.055>
- [6] BERARDI U., GHAFARIAN HOSEINI A., *State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs*, Applied Energy, 2014, Vol. 115, 411–428, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- [7] LI W.C., YEUNG K.K.A., *A Comprehensive Study of Green Roof Performance from Environmental Perspective*, International Journal of Sustainable Built Environment, 2014, 3, 127–134, <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001>
- [8] BERNDTSSON J.C., *Green Roof Performance towards Management of Runoff Water Quantity and Quality: A Review*, Ecological Engineering, 2010, 36, 351–360, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- [9] ROEHR D., FASSMAN-BECK E., *Living Roofs in Integrated Urban Water Systems*, 1st ed., Routledge, 2015, <https://doi.org/10.4324/9781315726472>
- [10] RAZZAGHMANESH M., BEECHAM S., BRIEN C.J., *Developing resilient green roofs in a dry climate*, Science of the Total Environment, 2014, Vol. 490, 579–589, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.040>
- [11] CASTETON H.F., STOVIN V., BECK S.B.M., DAVISON J.B., *Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit*, Energy and Buildings, 2010, Vol. 42 (10), 1582–1591, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>
- [12] ALEXANDRI E., JONES P., *Temperature decrease in a urban canyon due to green walls and green roofs in di-verse climates*, Building and Environment, 2008, 43 (2008), 480–493.
- [13] LIU R., COFFMAN R., *Lightweight Aggregate Made from Dredged Material in Green Roof Construction for Stormwater Management*, Materials, 2016, 9, 611.
- [14] KAZEMI M., COURARD L., ATTIA S., *Water permeability, water retention capacity, and thermal resistance of green roof layers made with recycled and artificial aggregates*, Building and Environment, 2023, 227, 109776, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109776>
- [15] OULDBOUKHITINE S.-E., BELARBI R., *Experimental characterization of green roof components*, Energy Proc., 2015, 78, 1183–1188, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.099>
- [16] FARIASS R.D., MARTINEZ GARCIA C., COTES PALOMINO T.; MARTINEZ ALLERANO M., *Effects of Wastes from the Brewing Industry in Lightweight Aggregates Manufactured with Clay for Green Roofs*, Materials, 2017, 10, 527, <https://doi.org/10.3390/ma10050527>
- [17] SZOTA C., FLETCHER T.D., DESBOIS C., RAYNER J.P., WILLIAMS N.S.G., FARELL C., *Laboratory tests of substrate physical properties may not represent the retention capacity of green roof in situ*, Water, 2017, 9, 920, <https://doi.org/10.3390/w9120920>
- [18] STOVIN V., VESUVIANO G., DE-VILLE S., *Defining green roof detention performance*, Urban Water Journal, 2015, 14 (6), 574–588, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1049279>
- [19] GRACSON A., HARE M., MONAGHAN J., HALL N., *The water retention capabilities of growing media for green roofs*, Ecol. Eng., 2013, 61, 328–334.
- [20] HAO D.L.C., RAZAK R.A., KHEIMI M., YAHYA Z., ABDULLAH M.M.A.B., BURDUHOS NEGRIS D.D., FANSURI H., EDIATI R., MOHAMED R., ABDULLAH A., *Artificial Lightweight Aggregates Made from Pozzolan Material: A Review on the Method, Physical and Mechanical Properties*, Thermal and Microstructure, Materials, 2022, 15, 3929, <https://doi.org/10.3390/ma15113929>
- [21] ALQAHTANI F.K., ZAFAR, I. *Characterization of processed lightweight aggregate and its effect on physical properties of concrete*, Constr. Build. Mater., 2019, 230, 116992.

- [22] KUMAR P.S., BABU M.J.R.K., KUMAR K.S., *Experimental Study on Lightweight Aggregate*, Int. J. Civ. Eng. Res., 2010, 1, 65–74.
- [23] STEMPKOWSKA A., GAWENDA T., *Improved Artificial Aggregates for Use in Green Roof Design. Sustainability*, 2024, 16, 5512, <https://doi.org/10.3390/su16135512>
- [24] STEMPKOWSKA A., GAWENDA T., *Artificial lightweight aggregate made from alternative and waste raw materials, hardened using the hybrid method*, Scientific Reports, 2024, Vol. 14, art. no. 16880, 1–19, 10.1038/s41598-024-67454-3
- [25] STEMPKOWSKA A., IZAK P., MASTALSKA-POPLAWSKA J., STASZEWSKA M., *The analysis of thermal properties of selected rock materials by thermovision methods*, Inżynieria Mineralna, Journal of the Polish Mineral Engineering Society, 2018, Vol. 20, 337–344.
- [26] CHEELA V.R.S., JOHN M., BISWAS W., SARKER P., *Combating Urban Heat Island Effect – A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies*. Buildings 2021, 11, 93, <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>
- [27] STEMPKOWSKA A., *Characterization of the Flux System: Lithium-Aluminum Silicate (Li)–Alkali Feldspars (Na, K); Magnesium (Mg) and Calcium (Ca)–Silicates*, Materials, 2021, 14, 7386, <https://doi.org/10.3390/ma14237386>
- [28] BOCCACCINI A.R., HAMANN B., *Review In Situ high-temperature optical microscopy*, Journal of Materials Science, 1999, 34, 5419–5436, <https://doi.org/10.1023/A:1004706922530>
- [29] KANG S.J.L., *Sintering, densification, grain growth and microstructure*, Elsevier, Oxford 2005.
- [30] MILLER C., *Moisture management in green roofs*, In: *Proc. Greening Rooftops for Sustainable Communities*, 1–6 May, Chicago 2003, 29–30.
- [31] WANG J., MENG Q., TAN K., ZHANG L., Yu. ZHANG Y., *Experimental investigation on the influence of evaporative cooling of permeable pavements on outdoor thermal environment*, Build. Environ., 2018, 140, 184–193.
- [32] KACZMARCZYK A.; BARYŁA A., KOŻUCHOWSKI P., *Design and Development of Low P-Emission Substrate for the Protection of Urban Water Bodies Collecting Green Roof Runoff*, Sustainability, 2017, 9, 1795, <https://doi.org/10.3390/su9101795>
- [33] YANG J., WANG Z.-H., KALOUSH K.E., *Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a “silver bullet” for mitigating urban heat island?*, Renew. Sustain. Energy Rev., 2015, 47, 830–843.

LIGHTWEIGHT AGGREGATE LIGHTENED FROM BY-PRODUCTS CLASSIFICATION OF KAOLIN RAW MATERIALS FOR REDUCTION OF URBAN HEAT SPOTS

Urban areas tend to have a much higher so-called Urban Heat Island (UHI) temperature than the surrounding non-urbanised areas. Urban built-up areas not only affect the formation of urban heat spots, but also reduce natural retention capacities. Low retention does not provide an effective means of responding to locally occurring water deficits and does not reduce the effects of excess water during periods of high water. The aim of this study was to produce aggregates with a grain size of 2–8 mm from clay-sand fractions created by enriching white-burning clays, which were also modified with additives. Such aggregates can be used, for example, on building roofs (cool roofs). Particular attention was paid to the microstructure of the aggregate, as the idea of the research was to obtain a material with adequate porosity on the meso scale. This type of porosity was obtained through a suitable sintering process. Detailed microscopic analyses were also carried out to assess the structure of the materials produced. Brightened materials with a high absorption of more than 30% and low apparent density of 1.5 g/cm³ and bulk density of 0.9 g/cm³ were obtained.

A u t o r z y

Ireneusz BAIC, ireneusz.baic@wit.lukasiewicz.gov.pl

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa

Adam BAJCAR, adam.bajcar@igo.wroc.pl

Poltegor-Instytut – Instytut Górnictwa Odkrywkowego
ul. Parkowa 25, 50-516 Wrocław

Alicja BAKALARZ, alicja.bakalarz@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

Marcin BARANOWSKI, marcin_baranowski@kosd-niemodlin.com.pl

Kopalnie Odkrywkowych Surowców Drogowych S.A. w Niemodlinie
ul. Bohaterów Powstań Śląskich 30, 49-100 Niemodlin

Rafał BARON, rbaron@komag.eu

Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

Aleksandra BORECKA, aborecka@agh.edu.pl

AGH w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Magdalena DUCHNOWSKA, magdalena.duchnowska@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

Marek CAŁA, cala@agh.edu.pl

AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Tomasz GAWENDA, gawenda@agh.edu.pl

AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Beata FIGARSKA-WARCHOŁ, figarska@min-pan.krakow.pl

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zakład Gospodarki Zasobami Mineralnymi
ul. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków

Dariusz FOSZCZ, foszcz@agh.edu.pl

AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Stefan GÓRALCZYK, sgoralczyk84@gmail.com

Federacja Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych, Naczelna Organizacja Techniczna
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa

Katarzyna GUZIK, guzik@min-pan.krakow.pl

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zakład Gospodarki Zasobami Mineralnymi
ul. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków

Piotr KARWOWSKI, piotr.karwowski@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

Urszula KĄŻMIERCZAK, urszula.kazmierczak@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

Żaklina KONOPACKA, zaklina.konopacka@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław

Daniel KOWOL, dkowol@komag.eu

Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

Wiesław KOZIOL, wieslaw.kozioł@wit.lukasiewicz.gov.pl

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa

- Łukasz MACHNIAK, machniak@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Górniczej i Bezpieczeństwa Pracy
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Jerzy MALEWSKI, jerzy.malewski@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Piotr MATUSIAK, pmatusiak@komag.eu
Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice
- Artur MIROS, artur.miros@wit.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Warszawski Instytut Technologiczny. Centrum Nowych Technologii w Budownictwie
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
- Przemysław MOCZKO, przemyslaw.moczko@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów
ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław
- Mikołaj OSTROWSKI, mikolaj.ostrowski@icimb.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie
ul. Cementowa 8, 31-983 Kraków
- Izabela POLNISZEK, izabela.polniaszek@icimb.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie
ul. Cementowa 8, 31-983 Kraków
- Agnieszka SARAMAK, dsaramak@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Daniel SARAMAK, dsaramak@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Konrad SŁOWIŃSKI, konrad.slawinski@kruszipol.pl
Polski Związek Producentów Kruszyw
al. Solidarności 34/325, 25-323 Kielce
- Dagmara SOLATYCKA, d.solatycka@wug.gov.pl
Okręgowy Urząd Górniczy we Wrocławiu
ul. Kotlarska 41, 50-151 Wrocław
- Agata STEMPOKOWSKA, stemp@agh.edu.pl
AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
- Paweł STRZAŁKOWSKI, pawel.strzalkowski@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Przemysław SZULC, przemyslaw.szulc@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Inżynierii Konwersji Energii
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Tomasz STĘPIEŃ, t.stepien@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Jędrzej WIĘCKOWSKI, jedrzej.wieckowski@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów
ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław
- Michał WOLNY, michal.wolny@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Katedra Górnictwa
ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
- Tomasz ZAWADZKI, prezes@kosd-niemodlin.com.pl
Kopalnie Odkrywkowych Surowców Drogowych S.A. w Niemodlinie
ul. Bohaterów Powstań Śląskich 30, 49-100 Niemodlin

KÜPER®

POLSKA

Optymalne rozwiązania dla przesiewania kruszyw.

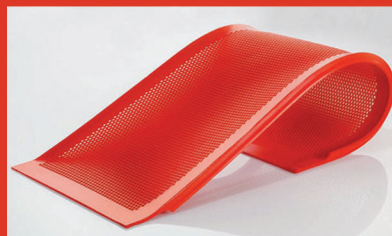
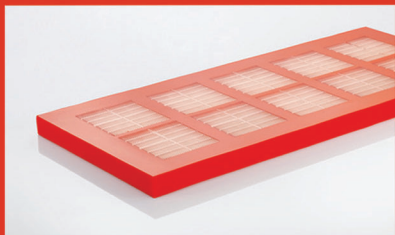
- sita przemysłowe: gumowe, poliuretanowe, stalowe segmentowe, napinane, płaskie
- maty do odwadniaczy • płyty poliuretanowe • akcesoria: dysze natryskowe, kulki czyszczące sita, kołki montażowe, zgarniacze i inne
- sprężyny i części do przesiewaczy, • doradztwo i pomoc w doborze sit

- maszyny i urządzenia:



SCHAUENBURG

Maschinen- und Anlagen-Bau GmbH



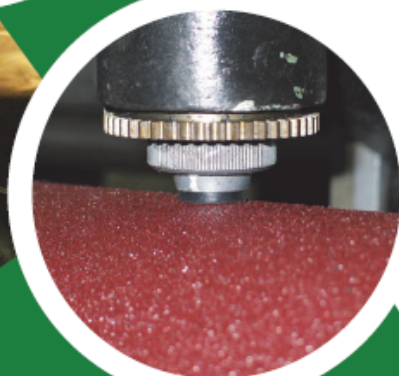
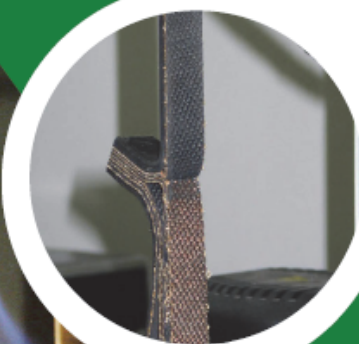
Kueper Polska Sp. z o.o.

tel. +48 604 176 066, 604 176 065, info@kueperpolska.com

www.kueperpolska.com

Badamy taśmy przenośnikowe i ich połączenia, gumę, mieszanki kauczukowe i tworzywa sztuczne

- Badania dotyczące bezpieczeństwa
pożarowego
- Badania właściwości
fizyko-mechanicznych
- Badania rozwojowe
- Badania atestacyjne
- Konsultacje, opinie
i ekspertyzy



POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
WYDZIAŁ GEINŻYNIERII, GÓRNICTWA I GEOLOGII
KATEDRA GÓRNICTWA
LABORATORIUM BEZPIECZEŃSTWA PRACY

ul. Na Grobli 13, 50-421 Wrocław, tel. 782 070 760, monika.maslakiewicz@pwr.edu.pl



AB 905

LABORATORIUM BEZPIECZEŃSTWA PRACY

(akredytacja nr AB 905 - pełny zakres dostępny na www.pca.gov.pl)
oferuje:

a) akredytowane badania środowiska pracy i w środowisku zewnętrznym

- powietrze: pyły przemysłowe, substancje nieorganiczne, stężenie/zawartość krystalicznej krzemionki (kwarc i krystobalit);
- hałas na stanowiskach pracy;
- hałas ultradźwiękowy na stanowiskach pracy;
- drgania mechaniczne działające na organizm człowieka przez kończyny górne;
- drgania mechaniczne o ogólnym działaniu na organizm człowieka;
- hałas pochodzący od instalacji, urządzeń, zakładów przemysłowych;

b) nieakredytowane badania i ekspertyzy

- modelowanie komputerowe rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pyłowych i gazowych (spalin) oraz hałasu w środowisku zewnętrznym na potrzeby kart informacyjnych przedsiębiorstw oraz ocen oddziaływania na środowisko;
- ocena wydatku energetycznego metodą pomiarową lub tabelaryczną;
- szkolenia specjalistyczne w zakresie realizacji i walidacji metod pomiarowych;
- projektowanie działań poprawy warunków pracy/bytowania;
- dobór ochronników słuchu;
- porównania międzylaboratoryjne w zakresie akredytowanych metod badawczych;

KONTAKT

inż. Monika Maślakiewicz: 782 070 760, monika.maslakiewicz@pwr.edu.pl

dr inż. Danuta Szyska: 662 080 102, danuta.szyska@pwr.edu.pl

Notatki



ISBN 978-83-7493-298-1