

prof. dr hab. Elżbieta Pilecka<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0002-1536-4291

mgr inż. Justyna Morman-Wątor<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-3415-8709

# Wykorzystanie odpadów wydobywczych modyfikowanych wapnem do budowy wałów przeciwpowodziowych

## *The use of lime-modified mining waste for the construction of flood embankments*

DOI: 10.15199/33.2022.07.06

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych odpadów wydobywczych o uziarnieniu mniejszym od 2 mm, zmodyfikowanych spoiwem wapiennym, w aspekcie wykorzystania ich jako materiału budowlanego do budowy wałów przeciwpowodziowych. Wyniki badań laboratoryjnych wskazują na poprawianie właściwości fizycznych, a przede wszystkim zmniejszenie współczynnika filtracji o 98%. Analiza wyników obliczeń MES modelu wału przeciwpowodziowego w programie MIDAS wykazała zwiększenie współczynnika stateczności do bezpiecznego poziomu.

**Słowa kluczowe:** odpady wydobywcze; wzmacnianie materiałów odpadowych; wały przeciwpowodziowe.

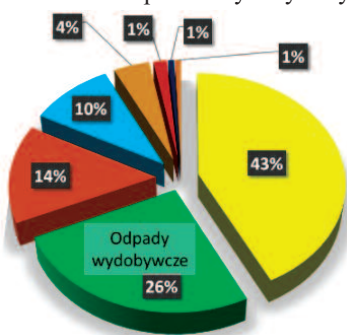
**Abstract.** This article presents the results of tests of the physical and mechanical properties of mining waste with a grain size less than 2 mm and modified with lime binder in the context of its use as a building material for the construction of flood embankments. The results of the laboratory tests indicate the improvement of the physical properties, particularly the reduction of the filtration coefficient by 98%. The analysis of the results of FEM in the MIDAS program of the flood embankment showed an increase in the stability coefficient to a safe level.

**Keywords:** mining waste; reinforcement of waste materials; flood embankments.

Rozwiązania technologiczne w budownictwie ziemnym powinny uwzględniać działania proekologiczne związane m.in. z wykorzystaniem materiałów odpadowych z przemysłu. Jednym z przykładów takich działań jest zastosowanie odpadów wydobywczych do budowy wałów przeciwpowodziowych [1, 2, 3, 4]. Odpady takie są tanie i łatwo dostępne na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Należy podkreślić, że wały przeciwpowodziowe są budowlami ziemnymi o znacznej długości, dlatego też ich budowa lub modernizacja pochłania duże nakłady finansowe.

Najczęściej odpady wydobywcze wykorzystuje się w województwach, gdzie są wytwarzane, a koszty ich transportu niskie. Na rysunku 1 przedstawiono procentowy udział poszczególnych rodzajów gruntów użytych do budowy korpusu wałów przeciwpowodziowych w województwie małopolskim w 438 prze-

badanych przekrojach [5, 6]. Analiza danych wykazała, że odpady wydobywcze zastosowano w 26% przypadków, a szesnaście korpusów wałów zbudowano w całości z odpadów wydobywczych.



Oznaczenia: ■ G, π, Pg, Pog – IL = 0,01 ÷ 0,25; ■ Grz+KRli+pc+Wk – IL=0,05; ■ Pd, Pr – ID=0,34 ÷ 0,67; ■ G, π, Pg, Pog – IL ≤ 0,00; ■ G, π, Pg, Pog – IL = 0,26 ÷ 0,5; ■ Iluczeń; ■ Po, Ż – ID=0,34 ÷ 0,67; ■ Po, Ż – ID=0,68 ÷ 0,80 gdzie: G – glina; π – pył; Pg – piasek gliniasty; Pog – pospółka gliniasta; Grz+KRli+pc+Wk – glina pylasta zwięzła z rumosem łupka ilastego, piaskowca i węgla kamiennego; Pd – piasek drobny; Pr – piasek pylasty; Po – pospółka; Ż – żwir; ID – stopień zagęszczenia; IL – stopień plastyczności

**Rys. 1. Udział procentowy różnych materiałów ziemnych użytych do budowy korpusów wałów przeciwpowodziowych w województwie małopolskim**

*Fig. 1. Percentage distribution of the land used for the construction of flood embankments in the Malopolska Voivodeship*

Celem przeprowadzonych badań było określenie możliwości zastosowania zmodyfikowanych wapnem odpadów wydobywczych do budowy wałów przeciwpowodziowych. Ich weryfikację przeprowadzono za pomocą analizy numerycznej Metodą Elementów Skończonych MES w programie MIDAS. Wykonano obliczenia modelu wału przeciwpowodziowego ze zmodyfikowanego wapnem materiału odpadowego. Odpady wydobywcze pochodziły z Zakładu Górniczego „Sobieski”, które są wykorzystywane m.in. do budowy wałów przeciwpowodziowych w województwie małopolskim.

### Metoda badań i obliczeń

Badania dotyczące ulepszenia odpadów wydobywczych, pobranych z hałdy Zakładu Górniczego „Sobieski”, wykonane zostały przez zespół autorski w Laboratorium Mechaniki Gruntów Katedry Geotechniki i Wytrzymałości Materiałów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Technologia wzmacniania gruntu wapnem stosowana

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

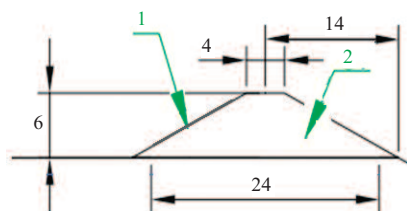
<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: elzbieta.pilecka@pk.edu.pl

jest od wielu lat w drogownictwie i kolejnictwie, jak również w mniejszym stopniu w budownictwie hydrotechnicznym [7]. W ramach badań określono wpływ dodatku 8% wapna palonego CaO w stosunku do masy szkieletu gruntowego odpadów wydobywczych (ZG S1 + 8% W). Próby po dodaniu spoiwa były formowane i pielęgnowane zgodnie z normą PN-S-96011:1998 [8]. Analizy granulometryczne wykonano zgodnie z PKN-CEN ISO/TS 17892-4 [9].

Właściwości mechaniczne badanych odpadów wydobywczych bez i z dodatkiem spoiwa oznaczono w aparacie trójosiowego ściskania. Badania przeprowadzono metodą CD zgodnie z procedurą podaną przez BS 1377-8 [10]. Ponadto oznaczono edometryczny moduł ściśliwości przy różnych naprężeniach i wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,95, 0,97$  i  $1,00$  zgodnie z PKN-CEN ISO/TS 17892-5 [11].

Ponadto przeprowadzono obliczenia numeryczne Metodą Elementów Skończonych (MES) w programie MIDAS GTS NX w celu oznaczenia stateczności hipotetycznego wału przeciwpowodziowego. Założono, że będzie on zbudowany w całości z materiału odpadowego. W drugim wariantcie obliczeń przyjęto wał z materiału odpadowego zmodyfikowanego dodatkiem spoiwa hydraulicznego w postaci wapna palonego. W celu sprawdzenia zachowania się tych materiałów, w obliczeniach przyjęto jedynie wał przeciwpowodziowy bez podłoża, chcąc uniknąć jego wpływu na wyniki modelowania. Nachylenie skarpy odwodnej i odpowietrznej wynosiło 1: 2. Geometrię wału przeciwpowodziowego przedstawiono na rysunku 2.

Do obliczenia stateczności modelu obwałowania przeciwpowodziowego zastosowano model gruntu sprężysto-



Rys. 2. Przyjęta geometria wału: 1 – skarpa odwodna; 2 – korpus wału

Fig. 2. Adopted shaft geometry: 1 – upstream slope; 2 – shaft body

-plastyczny Coulomba-Mohra. Parametry gruntowe wprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1997-1:2008 [12]. Ocenę stateczności nasypu w programie MIDAS GTS NX wykonano metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie (ang. *Shear Strength Reduce Method – SSRM*) [13]. W obliczeniach analizowano tylko możliwość zniszczenia nasypu – stan graniczny GEO. W obliczeniach stateczności przeprowadzonych zgodnie z PN-EN 1997-1 [12] stosowano podejście obliczeniowe 3 (DA3) i kombinację współczynników częściowych A2+M2+R3. Współczynnik A2 jest wprowadzony do oddziaływań pochodzących od konstrukcji, a współczynnik M2 do parametrów wytrzymałościowych gruntu oddziałującego na konstrukcje, np. oddziaływań geotechnicznych oraz do oporów gruntu (zestaw M2 do parametrów wytrzymałościowych), a współczynnik R3 wynosi 1,0.

Wartość edometrycznego modułu ściśliwości odpadów wydobywczych przyjęto w przypadku naprężeń 100 – 200 kPa przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 0,97$ . Model obliczeniowy posiadał 2419 czterowęzłowych oczek siatki o wielkości 0,2 m. W celu określenia zmian wartości współczynnika filtracji gruntu w czasie, związanych ze zmianą porowatości, zastosowano wzór van Genuchtena dla gruntu nie w pełni nasyconego [14, 15].

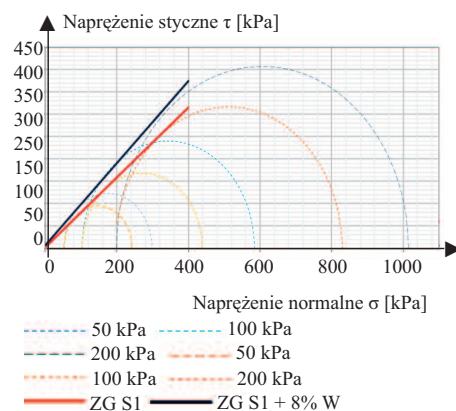
### Wyniki badania właściwości odpadów wydobywczych

Na podstawie analizy granulometrycznej stwierdzono, że odpad wydobywczy z Zakładu Górniczego „Sobieski” o uziarnieniu 0 – 2 mm stanowi piasek drobny zgodnie z klasyfikacją geotechniczną wg PN-EN ISO 14688-2:2006 [16]. Zawartość frakcji piaskowej w składzie uziarnienia wynosiła 87,89%, natomiast frakcji pylastej było 12,11%. Badanie składu uziarnienia odpadów wydobywczych z dodatkiem wapna wykazało zwiększenie zawartości frakcji pylastej do 16,659% i zmniejszenie zawartości frakcji piaskowej do 83,41%. Odpady z dodatkiem spoiwa sklasyfikowano wg PN-EN ISO 14688-2:2006 [16] jako piasek pylasty. Odpady wydobywcze ZG „Sobieski” (ZG S1) charakteryzowały się średnią wilgotnością  $w_n = 18,31\%$ . Średnia gęstość właściwa szkieletu wy-

niosła  $\rho_s = 2,413 \text{ g/cm}^3$  i była mniejsza od gęstości właściwej szkieletu gruntu mineralnych o podobnym uziarnieniu, a średnia gęstość właściwa szkieletu badanych odpadów z dodatkiem spoiwa –  $\rho_s = 2,535 \text{ g/cm}^3$ . Średnia wartość współczynnika filtracji  $k = 4,99 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  była typowa dla współczynników filtracji piasków pylastych. Współczynnik filtracji odpadów wydobywczych z dodatkiem wapna znacznie się zmniejszył i wynosił  $k = 6,59 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ .

Na podstawie badań parametrów zagęszczalności określono wilgotność optymalną odpadów wydobywczych na ok. 20,438%. Problem wydaje się być jednak bardziej złożony, gdyż w miarę zwiększania zagęszczania w aparacie Proctora grunt odpadowy coraz bardziej się rozdrabnia i zwiększa frakcję pylastą. Wilgotność optymalna odpadów wydobywczych z dodatkiem wapna wynosiła średnio 13,2%, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu odpadów wydobywczych  $\rho_{ds} = 1,44 \text{ g/cm}^3$ , a odpadów z dodatkiem spoiwa  $\rho_{ds} = 1,67 \text{ g/cm}^3$ .

Wykres zależności naprężeń stycznych od normalnych z badań w aparacie trójosiowego ściskania przedstawiono na rysunku 3. Kąt tarcia wewnętrznego odpadów wydobywczych wynosił  $\varphi = 38,1^\circ$ , a odpadów zmodyfikowanych wapnem  $\varphi = 42,2^\circ$ , natomiast spójność odpadów wydobywczych  $c = 2,35 \text{ kPa}$ , a odpadów zmodyfikowanych wapnem  $c = 7,14 \text{ kPa}$ . Wyniki badań edometrycznych modułów ściśliwości w przypadku naprężeń 100 – 200 kPa przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Wykres kół Mohra badanych odpadów wydobywczych z aparatu trójosiowego ściskania

Fig. 3. Mohr's circle diagram from the triaxial compression test for mining waste

**Tabela 1. Edometryczny moduł ściśliwości odpadów wydobywczych bez i z dodatkiem spoiw**  
*Table 1. Edometric modulus of compressibility of mining waste and waste with lime binder*

Charakterystyka		Odpad wydobywczy			Odpad wydobywczy z wapnem		
Is [-]		0,95	0,97	1,0	0,95	0,97	1,0
Zakres naprężeń	100 – 200	<b>9178</b>	<b>15634</b>	<b>16466</b>	<b>10756</b>	<b>13110</b>	<b>16645</b>

## Wyniki modelowania numerycznego korpusu wału przeciwpowodziowego z odpadów wydobywczych bez i z dodatkiem spoiwa

W obliczeniach numerycznych założono przejście fali powodziowej trwające 7 dni. Przyjęto maksymalny poziom fali powodziowej 5,5 m w czwartej dobie, utrzymanie się tego poziomu przez jedną dobę, a następnie jej obniżanie do poziomu zera w ciągu dwóch dni. Schemat przejścia fali powodziowej przedstawiono na rysunku 4. Właściwości geotechniczne odpadów przyjęte do obliczeń przedstawiono w tabeli 2.



**Rys. 4. Schemat przejścia fali powodziowej na skarpie odwodnej**  
*Fig. 4. Diagram of flood wave transition on the upstream slope*

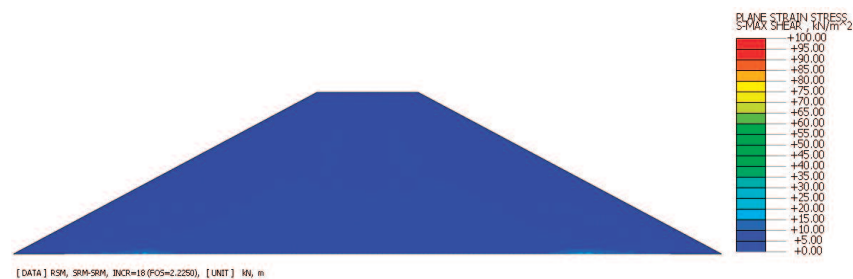
**Tabela 2. Tabela parametrów gruntowych w modelach obliczeniowych**  
*Table 2. Table of soil parameters in calculation models*

Zastosowany materiał	$\gamma$ [g/cm <sup>3</sup> ]	e [-]	$\phi$ [°]	c [kPa]	$E_{\text{red}} (I_s = 0,97, 100 - 200)$ [kPa]	k [m/s]
Odpad wydobywczy (ZG S1)	15	0,77	38,10 (32,48)*	2,35 (1,88)*	15634	$4,99 \cdot 10^{-4}$
Odpad wydobywczy wzmocniony wapnem (ZG S1 + 8% W)	16,40	0,74	42,10 (33,68)*	7,14 (5,712)*	13110	$6,59 \cdot 10^{-6}$

\* parametry obliczeniowe

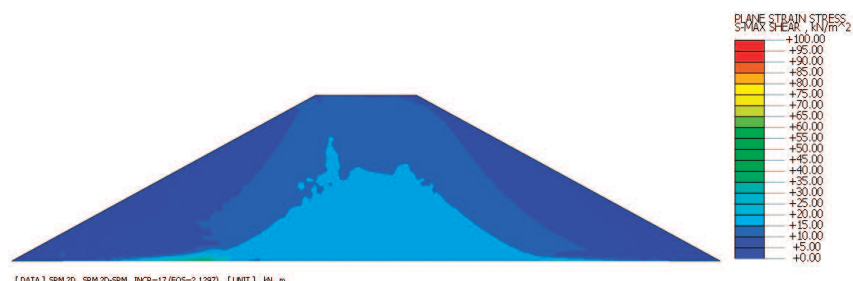
Wyniki obliczeń numerycznych korpusu wału przeciwpowodziowego z odpadów wydobywczych, bez i z dodatkiem spoiwa, przedstawiono na rysunkach 5 ÷ 12. Stwierdzono, że w czasie przejścia fali powodziowej naprężenia ścinające różnie się kształtowały. Rysunki przedstawiają zmiany naprężeń ścinających, które odpowiadają za położenie powierzchni poślizgu. Od stanu początkowego (rysunki 5 i 9) do stanu maksy-

malnej wysokości fali powodziowej w czwartej i piątej dobie przejścia fali powodziowej (rysunki 7, 8 i 11, 12) stateczność wału się zmniejszała.



**Rys. 5. Maksymalne naprężenia ścinające, warunki początkowe, korpus wału z odpadów wydobywczych (FoS = 2,22)**

*Fig. 5. Maximum shear stress initial conditions, shaft body from mining waste (FoS = 2.22)*

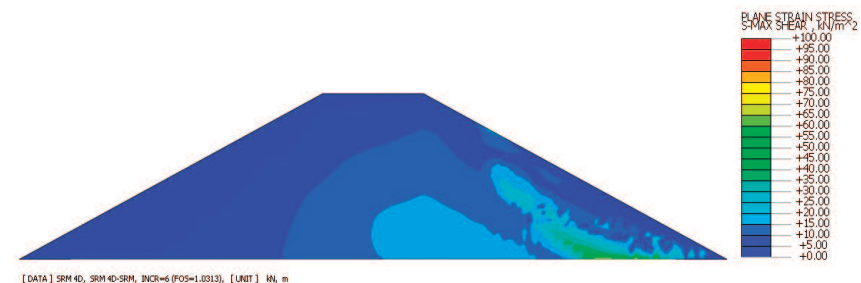


**Rys. 6. Maksymalne naprężenia ścinające w drugiej dobie piętrzenia wody, korpus wału z odpadów wydobywczych (FoS = 2,12)**

*Fig. 6. Maximum shear stresses on the second day of water damming, shaft body made of mining waste (FoS = 2.12)*

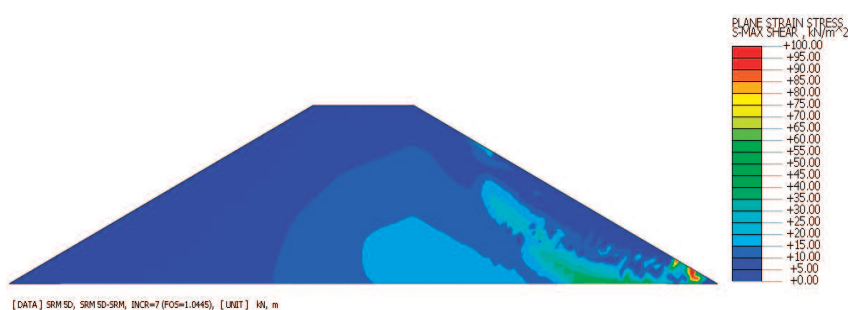
## Analiza wyników badań modelowych

W tabeli 3 przedstawiono wartości współczynnika stateczności w poszczególnych dobach przejścia fali powodziowej. Z przeprowadzonej analizy wynika, że współczynnik statecz-



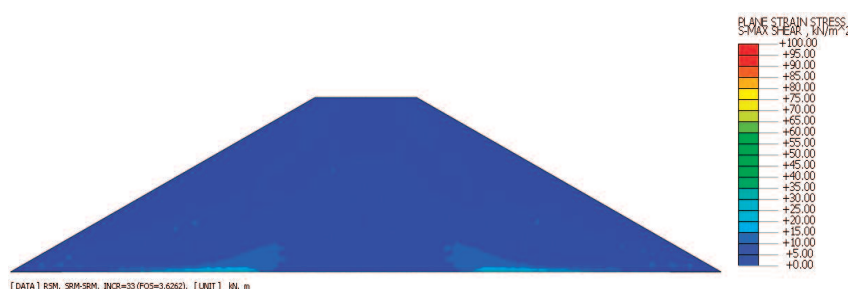
**Rys. 7. Maksymalne naprężenia ścinające w czwartej dobie piętrzenia wody, korpus wału z odpadów wydobywczych (FoS = 1,03)**

*Fig. 7. Maximum shear stresses in the fourth day of water damming, body of the embankment made of mining waste (FoS = 1.03)*



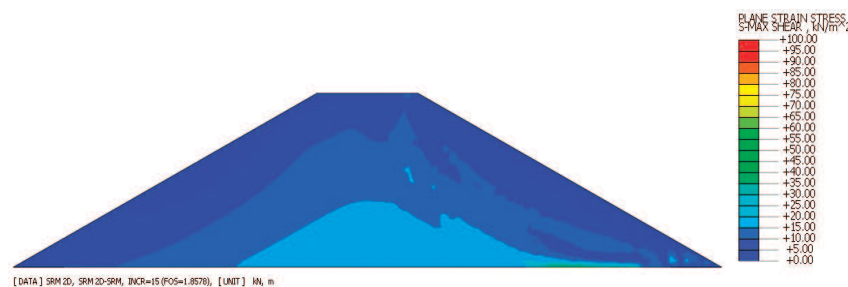
Rys. 8. Maksymalne naprężenia ścinające w piątej dobie piętrzenia wody, korpus wału z odpadów wydobywczych (FoS = 1,04)

Fig. 8. Maximum shear stresses on the fifth day of water damming, shaft body made of mining waste (FoS = 1.04)



Rys. 9. Maksymalne naprężenia ścinające, korpus wału z odpadów wydobywczych wzmocnionych wapnem, warunki początkowe (FoS = 3,62)

Fig. 9. Maximum shear stresses, shaft body made of lime-reinforced mining tailings, initial conditions (FoS = 3.62)



Rys. 10. Maksymalne naprężenia ścinające, korpus wału z odpadów wydobywczych wzmocnionych wapnem, 2 doba piętrzenia wody (FoS = 1,85)

Fig. 10. Maximum shear stresses, body of the shaft made of lime-reinforced mining waste, day 2 of water damming (FoS = 1.85)



Rys. 11. Maksymalne naprężenia ścinające, korpus wału z odpadów wydobywczych wzmocnionych wapnem, 4 doba piętrzenia wody (FoS = 1,77)

Fig. 11. Maximum shear stresses, shaft body made of lime-reinforced mining waste, fourth day of water damming (FoS = 1.77)

ności wału przeciwpowodziowego z odpadów wydobywczych bez dodatku wapna nie spełniał w czwartej i piątej dobie fali powodziowej wymaganego współczynnika stateczności, który zgodnie z Rozporządzeniem [17] musi wynosić  $FoS > 1,5$ . Z Rozporządzenia [17] wynika, że minimalna wartość współczynnika stateczności dla projektowanej wody miarodajnej w przypadku wałów klasy I wynosi  $FoS > 1,5$ , dla podstawowego układu obciążeń, niezależnie od klasy budowli hydrotechnicznej. Dodanie spoiwa w postaci wapna palonego do odpadów wydobywczych pozwoliło na poprawę stateczności wału przeciwpowodziowego.

### Podsumowanie

Zastosowanie wapna do odpadów wydobywczych spowodowało poprawę ich właściwości geotechnicznych i potwierdziło potencjalne ich wykorzystanie do budowy wałów przeciwpowodziowych. Dodatek spoiwa spowodował zwiększenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu  $\rho_{ds}$ , zmniejszenie wilgotności optymalnej oraz poprawę wytrzymałości na ściskanie. Z analizy składu granulometrycznego wynika, że po dodaniu wapna nastąpiło zwiększenie zawartości frakcji pyłastej. Wyniki badań jednoznacznie wskazują na poprawę właściwości fizycznych odpadów wydobywczych zmodyfikowanych spoiwem wapiennym. Gęstość właściwa szkieletu odpadów zmodyfikowanych wapnem zwiększyła się o prawie 5%. Największą zaletą modyfikowanego odpadowego materiału gruntowego jest poprawa współczynnika filtracji. Jego wartość zmniejszyła się o jeden rząd wielkości. Ponadto zaobserwowano wzrost kąta tarcia wewnętrznego i spójności.

Analiza wyników obliczeń modelowania numerycznego wskazała jednoznacznie na zwiększenie stateczności wału przeciwpowodziowego zbudowanego ze zmodyfikowanych wapnem odpadów wydobywczych. Zastosowanie takiego materiału budowlanego gwarantuje bezpieczne użytkowanie budowli. Prowadzone będą badania zastosowania innych spoiw.



Rys. 12. Maksymalne naprężenia ścinające, korpus wału z odpadów wydobywczych wzmocnionych wapnem, 5 doba piętrzenia wody (FoS = 1,75)  
 Fig. 12. Maximum shear stresses, shaft body made of lime-reinforced mining waste, five days of water damming (FoS = 1.75)

Tabela 3. Wartość współczynnika stateczności  
 Table 3. Value of the stability coefficient

Zastosowany materiał	stan początkowy	Wskaźnik stateczności (FoS)		
		2 doba przejścia fali powodziowej	4 doba przejścia fali powodziowej	5 doba przejścia fali powodziowej
Odpad wydobywczy (ZG S1)	2,4	2,1	1,0	1,0
Odpad wydobywczy wzmocniony wapnem (ZG S1 + 8% W)	3,6	1,8	1,7	1,7

**Literatura**

[1] Bian Z, Miao X, Lei S, Chen SE, Wang W, Struthers S. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. Science. 2012; doi: 10.1126/science. 1224757.

[2] Blajer M, Stopkowicz A, Adamczyk J, Cała M. The preliminary research of the physico-mechanical properties of aggregates based on the colliery shale, supplemented by fly ash. Archives of Mining Sciences. 2019; doi: 10.24425/ams.2018.124992.

[3] Haibin L, Zhenling L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China, Resources, Conservation and Recycling. 2010, 12, Tom 54, s. 1331-1340.

[4] Filipowicz J, Brorys M. Wykorzystanie odpadów przemysłowych, Śródkowopomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska. 2008. Tom 10. s. 633-644.

[5] ATEiRI „mkm PERFECT” sp. z o.o. Opracowanie oceny stanu technicznego obwałowań na terenie powiatu oświęcimskiego, wadowickiego, krakowskiego, wielickiego, proszowickiego, bocheńskiego, brzeskiego, tarnowskiego, dąbrowskiego oraz nowosądeckiego i limanowskiego będących w administracji Małopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Krakowie – badania okresowe (pięcioletnie), 2013.

[6] Geopartner Sp. z o.o. Opracowanie oceny stanu technicznego obwałowań przeciwpowodziowych na terenie powiatu krakowskiego, tarnowskiego i dąbrowskiego będących w administracji Małopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Krakowie – badania okresowe (pięcioletnie). Kraków, 2012. – Część I: Obwałowania na terenie powiatu krakowskiego zgodnie z SIWZ wraz z załącznikami oraz ofertą. Kraków.

[7] Gąsiorowski S. Ulepszenie i stabilizacja gruntów spoiwem wapiennym, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne. 2012, s. 64 – 66.

[8] PN-S-96011:1998, Stabilizacja gruntu wapnem do celów drogowych. 1998.

[9] PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego.

[10] BS 1377-8, 1990, Methods of test for Soils for civil engineering purposes – Part 8: Shear strength tests (effective stress). British Standards Institution.

[11] PKN-CEN ISO/TS 17892-5:2009 Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 5: Badanie edometryczne gruntów.

[12] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.

[13] MIDAS GTS NX, 2019. Manual specifications.

[14] Van Genuchten M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, 1980, 5, Tom 44, s. 892-898.

[15] Hardy Yide K, Yutao P, Yannick Choy Hing N, Fook Hou L. An approach for modelling spatial variability in permeability of cement-admixed soil, Acta Geotechnica, 2021.

[16] PN-EN ISO 14688-2:2018-05:2018. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania.

[17] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie, Dz.U. 2007 nr 86 poz. 579.

Przyjęto do druku: 15.06.2022 r.



**ARBOCEL P – The Power of Innovation**

- – nieograniczone możliwości regulacji konsystencji,
- – łatwe i szybkie mieszanie,
- – zagęszczanie i stabilizacja tynków i farb przy jednoczesnej poprawie aplikacji



**Rettenmaier Polska**

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbocel@jrs.pl