

Optimization of backfilling mined-out spaces underground

Optymalizacja zasypywania podziemnych wyrobisk górniczych



DOI: 10.15199/62.2024.10.5

Proces zasypywania wyrobiska został zoptymalizowany w kopalni talku przy użyciu dostępnych cementowych odpadów pyłowych z pieca. Przygotowano cztery formuły zasypywania i przetestowano je w warunkach laboratoryjnych pod kątem ich przydatności. W szczególności określono wytrzymałość na zginanie i ścisnienie (po związaniu), gęstość, koszty produkcji i wydajność preparatu. Wybrano optymalną formułę i zalecono jej stosowanie w praktyce.

Słowa kluczowe: górnictwo, zasypywanie wyrobisk górniczych, pod-sadzka

The backfilling process was optimized in a talc mine by using an available cement kiln dust waste. Four backfilling formulatuion were prep.d. and tested under lab. conditions for their aplicability. In particular, flexural and compressive strength (after setting), d., prodn. costs and operationsl satisfaction of the formulation were detd. An optimum form-ulation was selected and recommended for pract. use.

Keywords: mining, backfilling mined-out spaces, backfill

Górnictwo, jak każda inna branża, przechodziło stopniowy rozwój. Ulepszano sposoby wydobywania, a co za tym idzie i samą technologię wydobywania. Początkowo stosowane metody ręcznego kopania zostały zastąpione nowoczesnymi zmechanizowanymi metodami wydobywania. Szybki rozwój technologii trwa do dziś. Wydobywanie surowców mineralnych jest jednym z głównych działań światowej gospodarki, przyczyniając się do materialnego i technologicznego rozwoju społeczeństwa¹⁻³).

Eksperti w firmach górniczych na całym świecie poszukują odpowiednich rozwiązań i metod w zakresie bezpieczeństwa środowiskowego w branży górniczej. Ta działalność wiąże się z ingerencją w środowisko, która, niestety, często jest nieodwracalna. Prawo ochrony środowiska, wraz z prawem geologicznym i górniczym, nakłada zatem na zakłady górnicze obowiązek ochrony ich otoczenia przed negatywnymi skutkami działalności górniczej¹⁻³).

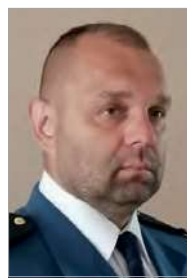
Mining, like any other industry, has undergone gradual development. The means of extraction and, consequently, the extraction technology itself have been improved. Initial methods of manual digging have been replaced by modern mechanized extraction methods. The rapid development of technologies continues even today. The extraction of mineral resources is one of the main activities of the global economy, contributing to the material and technological development of society¹⁻³).

Experts in mining companies around the world are concerned with this important issue and seek appropriate solutions and methods for environmental safety in the mining industry. This activity involves interventions in the environment, which are unfortunately often irreversible. Environmental protection laws, along with geological and mining laws, therefore impose an obligation on mining operations to protect their surroundings from the negative impacts of mining activities¹⁻³).



Martin KONČEK, BSc, MSc, PhD (ORCID: 0000-0003-1256-202X), he graduated in 2019 from the Faculty of Mining, Ecology, Management and Geotechnologies of the Technical University in Košice. In 2022, he has been an assistant professor at the Institute of Earth Resources. Specialty – mining, safety risk assessment, occupational safety and health issues in mining.

Dr inż. Martin KONČEK (ORCID: 0000-0003-1256-202X) w roku 2019 ukończył studia na Wydziale Górnictwa, Ekologii, Zarządzania i Geotechnologii Politechniki Koszyckiej. Od 2022 r. jest adiunktem w Instytucie Zasobów Ziemi tej samej uczelni. Specjalność – górnictwo, ocena ryzyka zawodowego, bezpieczeństwo i higiena pracy w górnictwie.



Miroslav BETUŠ, BSc, MSc, PhD (ORCID: 0000-0001-5362-5715), he graduated in 2011 from the Faculty of Mining, Ecology, Management and Geotechnologies of the Technical University in Košice. In 2016, he has been an assistant professor at the Institute of Earth Resources. Specialty – fire protection, basics of firefighting, technical means of the fire and rescue service and materials in the area of fire protection.

Dr inż. Miroslav BETUŠ (ORCID: 0000-0001-5362-5715) w roku 2011 ukończył studia na Wydziale Górnictwa, Ekologii, Zarządzania i Geotechnologii Politechniki Koszyckiej. Od 2016 r. jest adiunktem w Instytucie Zasobów Ziemi tej samej uczelni. Specjalność – ochrona przeciwpożarowa, podstawy pożarnic-

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnologies, Technical University of Košice, Letná 1/9, 042 00 Košice-Sever, Slovak Republic, phone: 0915 084 013, e-mail: martin.koncek@tuke.sk

Podczas wydobywania wartościowych surowców mineralnych nie należy zaniedbywać kwestii zapadlisk. Podczas wydobycia, a zwłaszcza po jego zakończeniu, istnieje znaczne ryzyko uszkodzenia konstrukcji podziemnych i powierzchniowych, a także potencjalnej degradacji gruntów rolnych, które następnie nie mogą być użytkowane ze względu na wysokie ryzyko, a wejście na tereny pogórnice odbywa się na własne ryzyko^{3, 4)}.

Zapewnienie stabilności podziemnych robót górniczych było ważnym zadaniem od początku górnictwa. Metody wydobywcze nieustannie ewoluowały, znacząco wpływając na stabilność prac górniczych w górnictwie rud, metali nieżelaznych i węgla. W górnictwie rud i kopalniach surowców innych niż rudy powszechnie stosuje się zasypywanie wyrobisk górniczych. Na technologię zasypywania wyrobisk ma jednak wpływ kilka czynników zewnętrznych, takich jak warunki geologiczne złoża oraz hydrogeologiczne i geomechaniczne właściwości złóż^{3, 4)}.

Z biegiem czasu wzrosły ekonomiczne i ekologiczne wymagania dotyczące górnictwa. Doprowadziło to do ponownej oceny wcześniej stosowanych technologii. Stopniowo zaczęto stosować selektywne i bardziej przyjazne dla środowiska metody wydobywcze zgodne z gospodarką bezodpadową, wykorzystujące potencjał ponownego użycia niekomercyjnego, tak zwanego materiału odpadowego bezpośrednio w podziemnej kopalni, w miejscu jego pochodzenia. Typowym przykładem takich technologii są metody wydobywcze z zasypywaniem wyeksploatowanych pustek. Główną ich zaletą jest wyeliminowanie przejawów działalności górniczej, które mają długoterminowy negatywny wpływ na środowisko. Materiał niekomercyjny, pochodzący z kopalni lub zakładów przetwórczych, jest ponownie wykorzystywany w ramach systemu zarządzania zasypywaniem. Materiały z hałd powstałych w okresie stosowania poprzednich technologii wydobywczych są również szeroko wykorzystywane do tego celu, częściowo eliminując wpływ wcześniejszej działalności górniczej. W niektórych zakładach górniczych zaczęto nawet stosować podsadzkę z domieszkami odpadów technologicznych pochodzących z innych procesów produkcyjnych i przetwórczych. Kluczowe jest jednak przestrzeganie przepisów oraz zapewnienie, że warunki kopalni i właściwości odpadów są odpowiednio dopasowane. Niedopasowanie może doprowadzić do katastrofy ekologicznej, potencjalnie skutkującej zaprzestaniem działalności wydobywczej⁵⁻⁷⁾.

In the extraction of useful mineral resources, the issue of subsidence basins should not be neglected. During and especially after mining, there is a significant risk of damage to underground and surface structures, as well as the potential degradation of agricultural land, which subsequently cannot be used due to the high risk, and entry into undermined areas is at one's own risk^{3, 4)}.

Ensuring the stability of underground mining works has been an important task since the beginning of mining. Mining methods have constantly evolved, significantly impacting the stability of mining works in ore, non-ore, and coal mining. In ore and non-ore mining, backfilling mined-out spaces with backfill has been extensively used. However, the backfilling technology is influenced by several external factors, such as the geological conditions of the deposit and the hydrogeological and geomechanical properties of the deposit^{3, 4)}.

Over time, economic and ecological demands on mining have increased. This has led to the reevaluation of previously used technologies. Gradually, selective and more environmentally friendly mining methods with zero-waste management began to be used, utilizing the potential for reusing non-commercial, so-called waste material directly in the underground mine, at the place of its origin. A typical example of these classes of mining technologies are extraction methods with backfilling mined-out spaces. The main advantage of these methods is the cessation of typical manifestations of mining activities that have long-term adverse effects on the environment. Non-commercial material, whether from mining or processing plants, is reused within the backfill management system. Materials from heaps created during the period of previous mining technologies are also extensively used for this purpose, partially eliminating the impacts of previous mining activities. In some mining operations, backfill with admixtures of technological waste from other manufacturing and processing operations has even started to be used. However, it is crucial to ensure that the conditions of the mine, laws, and properties of the wastes are carefully aligned. Inadequate alignment could lead to an environmental disaster, potentially resulting in the closure of the mining operation⁵⁻⁷⁾.

The results of studies conducted at TUKE, FBERG, and in cooperation with the mining operation EUROTALC s.r.o.



Marian ŠOFRANKO, BSc, MSc, PhD, Prof. (ORCID: 0000-0002-1626-0144), in 2023, he obtained his degree as the professor in the field Extraction and Processing of Earth Resources, at Technical University of Košice. He is head of the Department of Montane Sciences at Faculty of Mining, Ecology, Management and Geotechnologies of the Technical University of Košice. Speciality – mining, safety risk assessment, occupational safety and health issues in mining.

Prof. dr inż. Marian ŠOFRANKO (ORCID: 0000-0002-1626-0144) w roku 2023 uzyskał tytuł profesora w dziedzinie wydobycia i przetwarzania zasobów ziemi na Politechnice Koszyckiej. Jest kierownikiem Katedry Nauk Górskich na Wydziale Górnictwa, Ekologii, Zarządzania i Geotechnologii tej samej uczelni.

Specjalność – górnictwo, ocena ryzyka zawodowego, bezpieczeństwo i higiena pracy w górnictwie.



Gabriel WITTENBERGER, BSc, MSc, PhD (ORCID: 0000-0001-9742-7956), in 2005, he graduated from the Faculty of Mining, Ecology, Management and Geotechnologies of the Technical University in Košice. In 2001, he has been an assistant professor at the Institute of Earth Resources. Speciality – technician, technologist, expert in the field of drilling engineering, exploration, oil and gas wells.

Dr inż. Gabriel WITTENBERGER (ORCID: 0000-0001-9742-7956) w roku 2005 ukończył studia na Wydziale Górnictwa, Ekologii, Zarządzania i Geotechnologii Politechniki Koszyckiej. Od 2001 r. jest adiunktem w Instytucie Zasobów Ziemi tej samej uczelni. Specjalność – technik, technolog, ekspert w dziedzinie inżynierii wiertniczej, poszukiwań, odwiertów naftowych i gazowych.



Fig. 1. Location of the mining operation Eurotalc s.r.o.

Rys. 1. Lokalizacja zakładu górniczego Eurotalc s.r.o.

Przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w TUKE, FBERG oraz we współpracy z zakładem górniczym Eurotalc s.r.o. (Gemerská Poloma). Celem badania było opracowanie nowej formuły mieszanek podsadzkowych, które zastąpiłyby mieszanek obecnie stosowaną. Przy projektowaniu nowych formuł, ich użyteczności i wpływu składu na ostateczne właściwości mieszanki podsadzkowej brano pod uwagę kryteria ekonomiczne (niski koszt), bezpieczeństwo pracy (wytrzymałość), organizację pracy i zarządzanie (czas wiązania) oraz transport (możliwość pompowania przez rurociągi).

Część doświadczalna

Obiekt

Kopalnia Eurotalc s.r.o. znajduje się na obszarze katastralnym wsi Gemerská Poloma w powiecie Rožňava, ok. 4,5 km na północ od wsi, na wschodnich zboczach szczytu Zázvor (858 m n.p.m.), które stopniowo schodzą do dolin potoków Súľovský i Bindíkovský, tworząc południową granicę. Około 800 m na wschód przebiega droga krajowa III/533 prowadząca z Rožniawy do Spiskiej Novej Wsi (rys. 1). Firma Eurotalc s.r.o. wydobywa i przetwarza talk. Jest to jedna z najnowocześniejszych kopalń i jedno z najbogatszych złóż talku w Europie, z roczną produkcją ok. 125 tys. t. Złoże talku w Gemerskiej Polomie zostało odkryte przypadkowo w 1985 r. podczas poszukiwania cyny. Tutejszy talk ma dużą czystość, ok. 97%, stopień bieli do 90%, a eksperci uważają złoże Gemerská Poloma za jedno z najważniejszych na świecie, z zasobami wynoszącymi co najmniej 85 mln t (rys. 1)^{8, 9}.

(Gemerská Poloma) were presented in the paper. The aim of the study was to design a new formula for backfill mixtures to replace the current backfill mixture. When designing new formulas, their usability and impact on the final properties of the backfill mixture were considered based on the following criteria: economic (low cost), work safety (strength), work organization and management (setting time), and transportation (pumpability through pipelines)

Experimental

Object of the study

The mining operation Eurotalc s.r.o. is located in the cadastral area of the village Gemerská Poloma in the district of Rožňava, approximately 4.5 km north of the village, on the eastern slopes of Zázvor peak (858 m above sea level), which gradually descend into the valleys of the Súľovský and Bindíkovský creeks, forming the southern boundary. Approximately 800 m to the east runs the state road III/533 leading from Rožňava to Spišská Nová Ves (Fig. 1). The Eurotalc s.r.o. mines and processes talc. It is one of the most modern mines and one of the richest talc deposits in Europe, with an annual production of around 125 kt. The raw material has a whiteness degree of up to 90% and a purity of around 97%. The talc deposit in Gemerská Poloma was discovered accidentally in 1985 while searching for tin. The talc here shows a high purity, and experts consider the Gemerská Poloma deposit to be one of the most significant in the world, with reserves of at least 85 million tons (Fig. 1)^{8, 9}.



Jozef ČAMBAL, BSc, MSc, PhD (ORCID: 0000-0003-0895-4805), in 2019, he graduated from the Faculty of Mining, Ecology, Management and Geotechnologies of the Technical University in Košice. In 2022, he has been an assistant professor at the Institute of Earth Resources. Specialty – mining, safety risk assessment, occupational safety and health issues in mining.

Dr inż. Jozef ČAMBAL (ORCID: 0000-0003-0895-4805) w roku 2019 ukończył studia na Wydziale Górnicztwa, Ekologii, Zarządzania i Geotechnologii Politechniki Koszyckiej. Od 2022 r. jest docentem w Instytucie Zasobów Ziemi tej samej uczelni. Specjalność – górnictwo, ocena ryzyka zawodowego, bezpieczeństwo i higiena pracy w górnictwie.



Marianna TOMAŠKOVÁ, BSc, MSc, PhD (ORCID: 0000-0001-6281-1501), in 1996, she graduated from the Faculty of Mechanical Engineering of the Technical University in Košice. In 2001, she received her doctorate at the same faculty in the field of Safety of Technical Systems. Since 2007, she has been an associate professor at the Institute of Special Engineering Processes. Specialty – fire prevention and application of safety and risks in the field of fire protection.

Dr inż. Marianna TOMAŠKOVÁ (ORCID: 0000-0001-6281-1501) w roku 1996 ukończyła studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszyckiej. W 2001 r. na tym samym wydziale uzyskała stopień doktora w dziedzinie bezpieczeństwa systemów technicznych. Od 2007 r. jest adiunktem w Instytucie

Specjalnych Procesów Inżynierskich tej samej uczelni. Specjalność – zapobieganie pożarom i stosowanie bezpieczeństwa i ryzyka w dziedzinie ochrony przeciwpożarowej.



Fig. 2. Cement kiln dust

Rys. 2. Pył z pieca cementowego

Materiały

Pył z pieca cementowego był substytutem cementu w składzie mieszanek podsadzkowych pod ziemią. Stanowił on istotny produkt uboczny w procesie produkcji cementu i był częściowo składowany na hałdach. Ten drobnoziarnisty materiał był alkalicznym pyłem zawieszonym składającym się z utlenionych bezwodnych cząstek zebranych z elektrofiltrów podczas produkcji. Jego wykorzystanie i przetwarzanie było bardzo skomplikowane ze względu na charakter materiału. Ze względu na brak miejsca do składowania i stale rosnące koszty usuwania pyłu, zaczęto go stosować do stabilizacji gleby, wyrównywania terenu i jako dodatek do asfaltu. Może on być częściowo wykorzystywany jako dodatek do produkcji pasty cementowej, zaprawy lub betonu, ponieważ wpływa na wiązanie tych mieszanek. W związku z tym pył został użyty jako częściowy zamiennik cementu, spoiwa bardziej wartościowego (rys. 2)^{8, 10–12}.

Źródłem materiału podsadzkowego do wypełniania pustek pod ziemią były odpady poflotacyjne i woda technologiczna. Oba te źródła powstają podczas prowadzenia procesu flotacji. Materiały podsadzkowe nie wymagały specjalnej obróbki przed użyciem, a w przypadku stosowania mieszanek podsadzkowych do wypełniania wyrobisk górniczych, mieszanka jest uzupełniana spoiwem (cement oznaczony jako CEM II/A S42.5 N). Mieszanka, która wcześniej była powszechnie stosowana w firmie do zasypywania wyrobisk górniczych, składała się z odpadów poflotacyjnych, wody technologicznej i cementu^{8, 10, 11, 13}.

Stosowana dotychczas receptura materiału do zasypywania wyrobisk górniczych w spółce była następująca: cement

Materials

Cement kiln dust was a substitute for cement in the formulation of backfill mixtures underground. It was a significant by-product in the cement manufacturing process and was partially stockpiled in heaps. The dust was a finely granular material that was solid and highly alkaline particulate matter consisting of oxidized anhydrous particles collected from electrostatic precipitators during production. Its utilization and processing were very complicated due to the nature of the material. Due to the lack of storage space and the continuously increasing costs of dust disposal, they have begun to be used in soil stabilization, terrain leveling, and as additives in asphalt. They could be partially used as an additive in the production of cement paste, mortar, or concrete, as dust affects the setting of these mixtures. Therefore, the dust was used only as a partial replacement for the cement, a more valuable binder (Fig. 2)^{8, 10–12}.

The sources of backfill material for filling mined-out spaces underground were flotation tailings and process water. Both sources were generated during the flotation process. Backfill materials did not need any special treatment before use, and when using setting backfill mixtures for filling mined-out spaces, the mixture is supplemented with binder (cement designated as CEM II/A S42.5 N). The previously used mixture, which was commonly used in the company for backfilling mined-out spaces, consisted of flotation tailings, process water, and cement^{8, 10, 11, 13}.

The current recipe used for backfilling mined-out spaces in the company was as follows: cement (200 kg), tailings (1600 kg), and process water (320–500 L, depending on material moisture). The commonly used backfill mixture had a compressive strength of only 3.3 MPa after 28 days. The mixture was designed per 1 m³. Based on this recipe, new formulations have been proposed for laboratory testing to determine suitable backfill mixtures^{8, 10, 12, 14}.

Methods

The most significant component that significantly influences the strength was the type and amount of binder (cement), which was also one of the economically most demanding parts of the backfill. The individual concepts of proposed formulations designed for laboratory testing and determination of suitable backfill mixture were shown in Table 1. The formulations included cement kiln dust instead

Table 1. Compositions of the proposed backfilling formulations

Tabela 1. Skład proponowanych preparatów podsadzkowych

Recipe/Receptura	Cement, kg	Tailings/Odpady poflotacyjne, kg	Cement kiln dust/Pył z pieca cementowego, kg	Technological water ^{a)} /Woda technologiczna ^{a)} , L	Water for 1 m ³ /Woda dla 1 m ³ , L
1	200	1550	50	320–500	400
2	200	1500	100	320–500	410
3	200	1450	150	320–500	420
4	150	1550	100	320–500	400

^{a)} depending on the moisture content of the materials/w zależności od zawartości wilgoci w materiałach

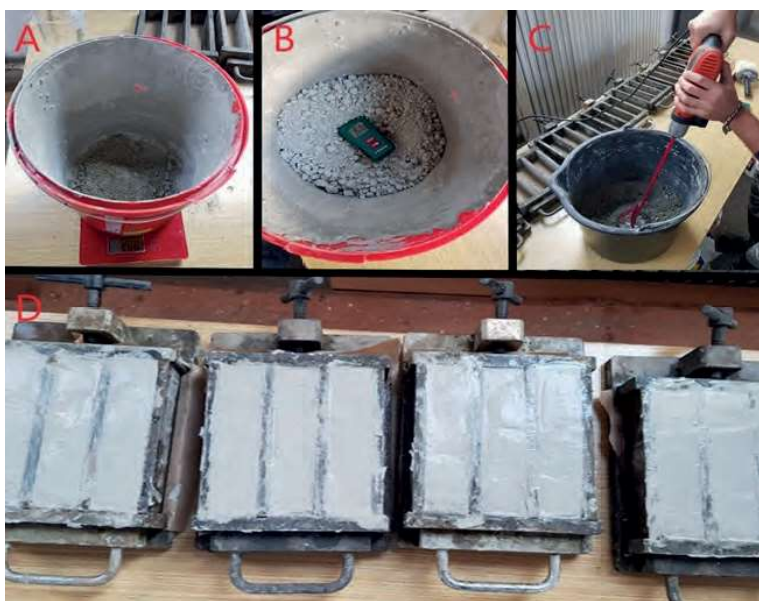


Fig. 3. Preparation of proposed backfill mixtures; A – preparation of material quantities, B – measurement of material moisture content, C – mixing of dry and wet mixture, D – filling of molds with the mixed mixture

Rys. 3. Przygotowanie proponowanych mieszanek podsadzkowych; A – odmierzanie ilości materiału, B – pomiar wilgotności materiału, C – mieszanie suchej i mokrej mieszanki, D – napętnianie form przygotowaną mieszanką

(200 kg), odpady poflotacyjne (1600 kg) i woda technologiczna (320–500 L, w zależności od wilgotności materiału). Ta mieszanka podsadzkowa miała wytrzymałość na ściskanie tylko 3,3 MPa po 28 dniach. Mieszanka została zaprojektowana na 1 m³. Na podstawie tej receptury zaproponowano nowe formuły do testów laboratoryjnych w celu opracowania odpowiednich mieszanek podsadzkowych^{8, 10, 12, 14}).

Metodyka badań

Najważniejszym składnikiem, który znacząco wpłynął na wytrzymałość podsadzki, był rodzaj i ilość spoiwa (cementu), który był również jednym z najbardziej wymagających ekonomicznie elementów podsadzki. Poszczególne koncepcje proponowanych receptur zaprojektowanych do badań laboratoryjnych i określenia odpowiedniej mieszanki podsadzkowej przedstawiono w tabeli 1. Zaproponowane preparaty zawierały pył z pieca cementowego zamiast odpadów poflotacyjnych obecnych w preparacie podstawowym (wydobyte odpady poflotacyjne zostały częściowo zastąpione pyłem z pieca cementowego). W ostatniej formułacji także część składnika cementowego została zastąpiona

of tailings compared to the base formulation, where the extracted tailings were replaced by cement kiln dust. In the last 4 formulations, a portion of the cement component was also replaced by an increase in cement kiln dust. However, according to literature data, the cement component could not be completely replaced by cement kiln dust to maintain the strength of the backfill mixture^{9, 12, 15, 16}.

Uniform laboratory testing procedure for the testing each proposed formulation was established. The proposed formulations were proceeded in the steps showed in Fig. 3 and 4 and included (i) collection of all necessary samples for the creation of backfill mixtures, (ii) preparation of the required material quantities, (iii) measurement of the moisture content of materials for laboratory work and measurement of the ambient temperature in which the mixture was being mixed, (iv) mixing of the dry and wet mixture (backfill mixture), (v) filling of molds with the mixed mixture and finally (vi) laboratory tests of individual mixtures^{9, 12, 15, 16}.

Fifteen test specimens were prepared from each formulation. Laboratory tests were conducted on the 3rd, 7th, 14th, 21st, and 28th day after filling the molds with the mixture, with 3 specimens tested on each of the days. The tests conducted on the specimens included measurements of flexural strength and compressive strength (Fig. 4). The strength of the backfill was a crucial parameter in terms of its quality. When evaluating the strength of the backfill, compressive strength was decisive as it most accurately reflected the effects of the load on the rock mass acting on the backfill in the mined-out space mixture^{9, 12, 15, 16}.



Fig. 4. Laboratory testing of proposed mixtures; left – measurement of flexural strength, right – measurement of compressive strength

Rys. 4. Testy laboratoryjne proponowanych mieszanek; po lewej – pomiar wytrzymałości na zginanie, po prawej – pomiar wytrzymałości na ściskanie

zwiększoną ilością pyłu z pieca cementowego. Jednak, zgodnie z danymi literaturowymi, aby utrzymać odpowiednią wytrzymałość mieszanki podsadzkowej składnik cementowy nie mógł być całkowicie zastąpiony pyłem z pieca cementowego^{9, 12, 15, 16}.

Ustalono jednolitą procedurę testów laboratoryjnych dla wszystkich proponowanych preparatów. Zaproponowane receptury były realizowane w etapach pokazanych na rys. 3 i 4 i obejmowały (i) pobranie wszystkich niezbędnych próbek do utworzenia mieszanek podsadzkowych, (ii) przygotowanie wymaganych ilości materiałów, (iii) pomiar wilgotności materiałów do prac laboratoryjnych i pomiar temperatury otoczenia, w którym przygotowywana była mieszanka, (iv) wymieszanie suchej i mokrej mieszanki podsadzkowej, (v) wypełnienie form wytworzoną mieszanką i wreszcie (vi) badania laboratoryjne poszczególnych mieszanek^{9, 12, 15, 16}.

Z każdego preparatu przygotowano 15 próbek testowych. Testy laboratoryjne przeprowadzono 3., 7., 14., 21. i 28. dnia po wypełnieniu form mieszanką, z 3 próbkami testowanymi w każdym z tych dni. Testy te obejmowały pomiary wytrzymałości na zginanie i ściskanie (rys. 4). Wytrzymałość podsadzki była kluczowym parametrem pod względem jej jakości. Przy ocenie wytrzymałości podsadzki decydujące znaczenie miała wytrzymałość na ściskanie, ponieważ najdokładniej odzwierciedlała ona wpływ obciążenia górotworu działającego na podsadzkę w pustce pokopalnianej^{9, 12, 15, 16}.

Badania wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na zginanie przeprowadzono w prasie hydraulicznej Form+ Test MEGA 100-200-10 D w warunkach laboratoryjnych Politechniki Koszyckiej, Wydział Górniczo-Geologiczny, Kontroli Procesów i Geotechnologii, w Instytucie Zasobów Ziemi, Wydział Nauk Górniczych, zgodnie z STN EN 12390-3 (rys. 5)¹⁷.

Aby ocenić wyniki, wzięto pod uwagę 4 kryteria: „Transport” (mieszanka powinna mieć odpowiednią gęstość i być łatwo transportowana rurociągiem), „Ekonomia” (proponowana mieszanka powinna mieć najniższe możliwe koszty produkcji przeliczone na 1 m³ w porównaniu z konwencjonalną mieszanką podsadzkową), „Bezpieczeństwo pracy” (mieszanka musi osiągnąć większą wytrzymałość niż konwencjonalna podsadzka) oraz „Organizacja i zarządzanie pracą” (mieszanka musi osiągnąć minimalną wytrzymałość 3,5 MPa w możliwie najkrótszym czasie)^{9, 12}.

Wyniki badań i ich omówienie

Wyniki testów wytrzymałości na zginanie (3 próbki/dzień) oraz wytrzymałości na ściskanie (6 próbek/dzień) zaproponowanych mieszanek poddanych testom laboratoryjnym zostały zebrane w tabelach 2 i 3. Wartości podane w tych tabelach przedstawiono graficznie na rys. 6. Wszystkie testowane preparaty wykazywały wzrost wytrzymałości na zginanie w miarę wzrostu czasu utwardzania (liczba dni po wypełnieniu form mieszanką) – lewy



Fig. 5. Hydraulic press-form+ Test MEGA 100-200-10 D

Rys. 5. Prasa hydrauliczna Form+ test MEGA 100-200-10 D

The tests of compressive strength and flexural strength were conducted on the hydraulic press Form+ Test MEGA 100-200-10 D under laboratory conditions of the Technical University of Košice, Faculty of Mining, Ecology, Process Control, and Geotechnologies, at the Institute of Earth Resources – Department of Mining Sciences according to STN EN 12390-3 (Fig. 5)¹⁷.

To evaluate the results, four criteria were taken into consideration: the „Transportation” (the mixture should have the correct density and could be easily transported by pipeline), „Economy” (the proposed mixture should have the lowest possible production costs per 1 m³ compared to the conventional backfill mixture), „Work Safety” (the mixture has to achieve higher strength compared to the conventional backfill) and „Organization and Work Management” (the mixture has to achieve a minimum strength of 3.5 MPa in the shortest possible time)^{9, 12}.

Results and discussion

The results of flexural strength tests (3 samples/day) and the compressive strength tests (6 samples/day) were collected in Table 2 and 3, respectively, for individual formulations with the mass of the materials used, which were subjected to laboratory testing. The measured values provided in Tables 2 and 3 were represented graphically in Fig. 6. On the left side of Fig. 6, all tested formulations could be seen, showing an increase in flexural strength depending on the curing time (number of days after filling the molds with the mixture). On the right side of Fig. 6, all tested formulations could be seen, showing an increase in compressive strength depending on the

Table 2. Flexural strength of samples in time, MPa

Tabela 2. Wytrzymałość próbek na zginanie w czasie, MPa

Recipe/Receptura	Day/Dzień				
	3	7	14	21	28
1	0.25	0.69	0.9	1.14	1.48
2	0.44	0.9	1.6	1.65	1.75
3	0.49	1.08	1.46	1.73	1.82
4	0.2	0.8	0.92	1.22	1.3

wykres na rys. 6, oraz wzrost wytrzymałości na ściskanie ze wzrostem czasu utwardzania (liczba dni po wypełnieniu form mieszaniną) – prawy wykres.

Wnioski

Najważniejszym aspektem badań było monitorowanie właściwości wytrzymałościowych i charakterystyki proponowanych mieszanek, które mogłyby być stosowane w różnych formach do podsadzki lub wypełniania pustki poeksploatacyjnej. Poszczególne mieszanki różniły się pod względem właściwości wytrzymałościowych w zależności od zastąpienia części cementu innym materiałem.

Określenie odpowiedniej formuły do zastosowania w operacjach wydobywczych było bardzo trudne, biorąc pod uwagę osiągnięcie maksymalnej wydajności w systemie podsadzania, nawet w ramach wydobycia pojedynczego złoża. Proponowana mieszanka podsadzkowa musiała spełniać przede wszystkim wymóg minimalnej wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 3,5 MPa, wymóg odpowiedniej gęstości, ekonomicznie opłacalnej produkcji oraz wiązania w określonych ramach czasowych. Wszystkie preparaty, które zostały zmieszane i przetestowane w warunkach laboratoryjnych, spełniły wymagania (tabela 4).

Z badań i pomiarów laboratoryjnych wytrzymałości na zginanie i ściskanie wynika, że preparat nr 4 spełnia opisane kryteria. Pierwsze kryterium „Transport” zostało spraw-

Table 3. Compressive strength of samples in time, MPa

Tabela 3. Wytrzymałość próbek na ściskanie w czasie, MPa

Recipe/Receptura	Day/Dzień				
	3	7	14	21	28
1	0.61	2.3	2.9	3.7	4.2
2	0.89	2.9	3.7	4.02	4.6
3	0.95	3.13	3.76	4.12	4.96
4	0.75	2.7	3.1	3.61	3.92

curing time (number of days after filling the molds with the mixture).

Conclusions

The most important aspect of the research was to monitor the strength properties and characteristics of the proposed mixtures, which could be used in various forms for backfilling or filling of mined-out spaces. The individual mixtures differed in terms of strength characteristics depending on the replacement of the proportion of cement with another type of material.

Determining a suitable formulation for application in mining operations was very challenging, considering achieving maximum efficiency in the backfilling system, even within the mining of a single deposit. The proposed backfill mixture had to meet primarily the minimum compressive strength requirement of 3.5 MPa, density of the mixture, economically viable production of the proposed mixtures, and setting within specified timeframes. All formulations that were mixed and tested under laboratory conditions met the requirements (Table 4).

From the study and laboratory measurements of flexural and compressive strengths, the formulation No. 4 met the criteria described above. The first criterion

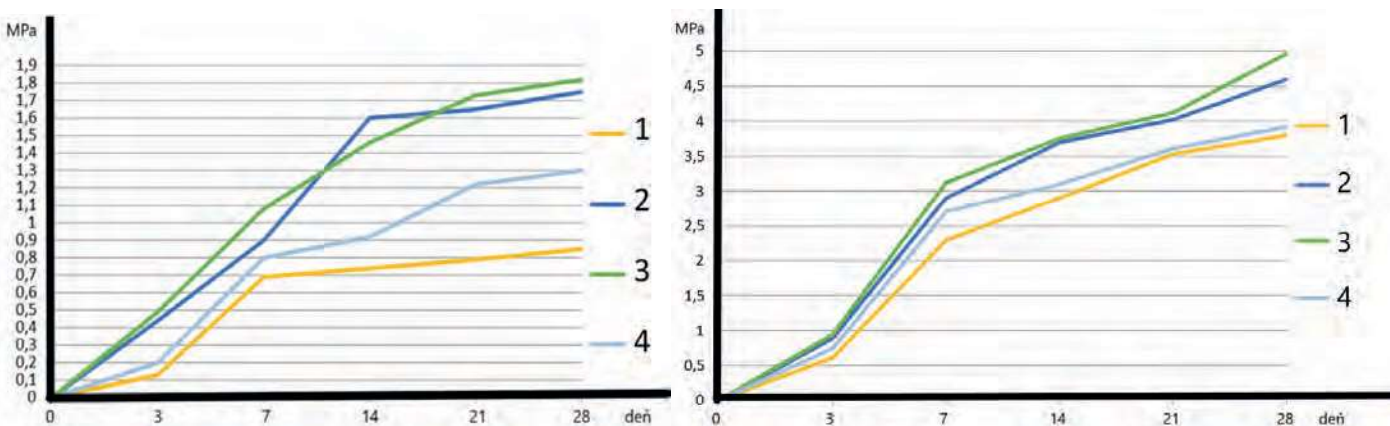


Fig. 6. Graphical representation of flexural strength (left) and compressive strength (right) measurements

Rys. 6. Wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie (po lewej) i ściskanie (po prawej)

Table 4. Summary of proposed formulations with fulfillment of individual requirements for quality backfill mixture

Tabela 4. Zestawienie proponowanych receptur wraz ze spełnieniem poszczególnych wymagań dotyczących jakości mieszanki podsadzkowej

Recipe/Receptura	Minimum compressive strength/ Minimalna wytrzymałość na ściskanie	Density/ Gęstość	Mixture production/ Produkcja mieszanki	Setting after 28 days/ Zwiążanie po 28 dniach	Satisfaction/ Wydajność
1	yes/tak	yes/tak	yes/tak	yes/tak	satisfactory/ zadowalająca
2	yes/tak	yes/tak	yes/tak	yes/tak	satisfactory/ zadowalająca
3	yes/tak	yes/tak	yes/tak	yes/tak	satisfactory/ zadowalająca
4	yes/tak	yes/tak	yes/tak	yes/tak	satisfactory/ zadowalająca

Table 5. Comparison of prices between the conventional and newly proposed backfill (own processing)

Tabela 5. Porównanie cen konwencjonalnej i nowo proponowanej podsadzki

Conventional backfill mixture (1 m ³) Konwencjonalna mieszanka podsadzkowa (1 m ³)			Newly proposed backfill mixture (1 m ³) Nowo proponowana mieszanka podsadzkowa (1 m ³)		
Material/ Material	The price/ Cena	Producer price/ Cena producenta	Material/ Material	The price/ Cena	Producer price/ Cena producenta
Cement, 200 kg	70 €/t with importation/ przy imporcie	14 €	cement, 150 kg	70 €/t with importation/ przy imporcie	10,5 €
Tailings/Odpady poflotacyjne, 1600 kg	0 €/t	0 €	tailings/odpady poflotacyjne, 1550 kg	0 €/t	0 €
Technological water/ Woda technologiczna	0 €/L	0 €	cement klin dust/pył z pieca cementowego, 100 kg	25 €/t with importation/ przy imporcie	2,5 €
			technological water/ woda technologiczna	0 €/L	0 €
Total price/Cena całkowita: 14 €/m ³			Total price/Cena całkowita: 13 €/m ³		

dzono wizualnie poprzez przelanie mieszaniny z jednego pojemnika do drugiego. Obie mieszanki zachowywały się podobnie podczas tego testu. Drugie kryterium porównawcze „Ekonomia” zostało sprawdzone poprzez porównanie kosztów w przeliczeniu na 1 m³ z konwencjonalną mieszanką podsadzkową (tabela 5). Po porównaniu cen można stwierdzić, że zasypianie jednej komory (wymiary komory 4 × 4 × 50 m) konwencjonalną podsadzką kosztuje firmę 11 200 euro, podczas gdy koszt proponowanej podsadzki wyniósłby 10 400 euro. W rezultacie firma oszczędza 800 euro na jednej komorze. Kolejne kryterium porównania „Bezpieczeństwo pracy” zostało spełnione, ponieważ nowo zaproponowana podsadzka miała wytrzymałość 3,92 MPa po 28 dniach, podczas gdy wartość tego parametru dla konwencjonalnej podsadzki wynosiła tylko 3,3 MPa po 28 dniach. Czwarte kryterium „Organizacja i zarządzanie pracą” zostało spełnione, ponieważ konwencjonalna podsadzka nie osiągnęła minimalnej wytrzymałości 3,5 MPa nawet po 28 dniach (miała tylko 3,3 MPa), podczas gdy nowo zaproponowana podsadzka osiągnęła minimalną wytrzymałość (3,5 MPa) już po 21 dniach. Pod względem organizacji i zarządzania pracą kolejną zaletą jest dostępność materiałów potrzebnych do produkcji proponowanej

„Transportation” was checked visually by pouring the mixture from one container to another. Both mixtures behaved similarly during this test. The second comparative criterion „Economy” was checked by comparing costs per 1 m³ with conventional backfill mixture (Table 5). After comparing the prices, it could be concluded that backfilling one chamber (dimensions of the chamber 4 × 4 × 50 m) with the conventional backfill will cost the company 11,200 € while the cost of proposed backfilling would be 10,400 €. It resulted in a saving of 800 € for the company for one chamber. Another criterion for comparison „Work Safety” was fulfilled, because newly proposed backfill had strength 3.92 MPa after 28 days, while the conventional backfill had only 3.3 MPa after 28 days. The fourth criterion „Organization and Work Management” was fulfilled as the conventional backfill did not reach the minimum strength 3.5 MPa even after 28 days (having only 3.3 MPa) while the newly proposed backfill achieved the minimum strength (3.5 MPa) after just 21 days. In terms of organization and work management, another advantage is the availability of materials needed for the production of the proposed backfill mixture.

Table 6. Comparisons between the proposed and conventional backfill according to established criteria (own processing)

Tabela 6. Porównanie proponowanej i konwencjonalnej podsadzki zgodnie z ustalonymi kryteriami (opracowanie własne)

Criteria/Kryterium	Conventional backfill mixture/ Konwencjonalna mieszanka podsadzki	Proposed backfill mixture/ Proponowana mieszanka podsadzki
Transportation/Transport	the same/to samo	the same/to samo
Economics/Ekonomia	more expensive/droższa	cheaper/tańsza
Work safety/ Bezpieczeństwo pracy	lower strength/mniejsza wytrzymałość	higher strength/większa wytrzymałość
Work organization and management/ Organizacja pracy i zarządzanie	unattained strength/ nieosiągnięta wytrzymałość	attained strength after 21 days/ wytrzymałość osiągnięta po 21 dniach

mieszanki podsadzki. Z wyników przeprowadzonego badania wynika, że zaproponowana receptura podsadzki jest korzystna w 3 z 4 ocenianych kryteriów w porównaniu z konwencjonalną recepturą podsadzki (tabela 6).

Finansowanie i podziękowania

Badanie zostało wsparte przez projekt badawczy EIT RM - MINETALC nr 19007, projekt badawczy 03/TUKE/2021, projekt badawczy VEGA 1/0588/21, projekt badawczy VEGA 1/0430/22 oraz projekt badawczy VEGA 1/0039/24.

From the results of our study, it follows that the newly proposed backfill recipe is advantageous in 3 out of the 4 criteria evaluated compared to the conventional backfill recipe (Table 6).

Funding and acknowledgement

The study was supported by research project EIT RM - MINETALC no. 19007, research project 03/TUKE/2021, research project VEGA 1/0588/21, research project VEGA 1/0430/22 and by research project VEGA 1/0039/24.

Received/Otrzymano: 08-08-2024

Reviewed/Zrecenzowano: 14-08-2024

Accepted/Zaakceptowano: 30-09-2024

Published/Opublikowano 21-10-2024

REFERENCES/LITERATURA

- [1] V. Bauer, *Banské technológie*, Fakulta BERG Technickej univerzity v Košiciach, 2015, ISBN 978-80-553-1616-1.
- [2] Anonymus, *Backfilling in mining*, <https://www.flyability.com/backfilling>.
- [3] T. Belem, M. Benzaazoua, *Geotech. Geol. Eng.* 2008, **26**, 147; doi:10.1007/s10706-007-9154-3.
- [4] Anonymus, *Dobývanie so zakladaním vydobytého priestoru*, <http://www.montanistika.sk/clanky/banictvo/40-3>.
- [5] O. Lintnerová, *Vplyv ťažby nerastných surovín na životné prostredie*, Polygrafické stredisko UK, Bratislava 2002, ISBN 80-223-1630-X.
- [6] M. Šofranko, *Theoretical aspects of backfilling in magnesite mines*, Eger Líceum Kiadó 2013, ISBN 978-615-5250-42-2.
- [7] L. Šiška, *Zakládání vyrubaných důlních prostorů*, Nakladatelství technické literatury, Praha 1972, ISBN 04-405-72.
- [8] Anonymus, *Eurotalc s.r.o.*, <https://www.eurotalc.sk>.
- [9] Anonymus, Internal materials of Eurotalc s.r.o., 2024.
- [10] M. Sheshpari, *Dep. Civil Eng.* 2015, **20**, 26.
- [11] M. Völpelová, *Ťažobný odpad*; https://app.sazp.sk/Odpady_TPDData/DSC0013712661f0d-6087-4662-8a1d-8310ce80c73a.jpg.
- [12] Zákon č. 514/2008 Z.z. o nakladaní s odpadom z ťažobného priemyslu; <https://www.zakonypreludi.sk/zz/2008-514>.
- [13] J.J. Zhang et al., *Minerals* 2019, **9**, 1; doi.org/10.3390/min9010053.
- [14] O. Zajac, H. Gondek, J. Boroška, *Hlbinné dobývacie stroje a zariadenia*, Vydavateľstvo Alfa, Bratislava 1991.
- [15] M. Šofranko et al., *Trans Tech. Publ.* 2014, **508**, 263; doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.508.263.
- [16] M. Šofranko, R. Zeman, *Acta Montanistica* 2001, **6**, 18.
- [17] Anonymus, *Products/Machines/MEGA-100-200-10-DM1-S*, <https://www.formtest.de/en/.php>.