



I. ARTYKUŁY / PAPERS

O możliwościach wypełniania kawern poługowniczych soli kamiennej

On the Possibilities of Backfilling Leached Salt Caverns

Wacław ANDRUSIKIEWICZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami,
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: andrus@agh.edu.pl

AGH University of Krakow, Faculty of Civil Engineering and Resources Management, Av. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków, e-mail: andrus@agh.edu.pl

STRESZCZENIE

Kawerny solne powstają w wyniku ługowania soli przy pomocy wody lub nienasyconych solanek. W wyniku tego procesu powstają pustki o kubaturze kilkuset tysięcy m³, a nawet ponad milion m³. Często uzyskane pustki przeznacza się na magazyny węglowodorów i gazów, ale ich żywotność nie jest nieograniczona w czasie z uwagi na właściwości reologiczne soli. Ze względów geomechanicznych kawerny wypełnia się solanką nasyconą, co pozwala na ograniczenie konwergencji komór, jednak jej nie zatrzymuje. Uwięziona w kawernach solanka zawiera sól stanowiącą ok. 15% objętości kawerny.

W artykule zarysowano możliwości odzyskania znacznej części solanki w różnych technologiach wypełniania kawern materiałem, który zastąpi solankę. Materiał ten często jest odpadem, który może być zagospodarowany w kawernie; w przeciwnym wypadku trafi na składowisko powierzchniowe z wszelkimi tego konsekwencjami środowiskowymi i ekonomicznymi. Wskazano kierunki przyszłych badań, które rokują powodzenie omawianych działań w kierunku związanym z ochroną środowiska.

Słowa kluczowe: kawerny solne, odzysk solanki, wypełnianie kawern

1. WPROWADZENIE

Każdy rodzaj górnictwa kopaliny stałych powoduje negatywny wpływ na szeroko rozumiane środowisko naturalne, a w szczególności na środowisko geologiczne. Pozornie naj-

ABSTRACT

Salt caverns are formed through the process of leaching salt with water or unsaturated brines, resulting in voids ranging in volume from hundreds of thousands to over a million cubic meters. These excavated voids are often designated for storing hydrocarbons and gases. However, their long-term stability is not indefinite due to the rheological properties of salt. To address geomechanical concerns, saturated brine is employed to fill these caverns. This strategy helps limit cavity convergence but does not eliminate it. Notably, the brine enclosed within the caverns contains salt, constituting approximately 15% of the cavern's total volume.

This article discusses the potential for recovering a substantial portion of brine through various technologies employed in the process of backfilling caverns with alternative materials. Frequently, these materials are waste products that can be effectively repurposed within the cavern. Otherwise, they would find their way to surface landfills, with all the resulting environmental and economic consequences. Additionally, the article highlights future research directions that hold promise for the success of the discussed environmental protection initiatives.

Keywords: salt caverns, brine recovery, cavern backfilling.

1. INTRODUCTION

Every type of solid mineral mining has a negative impact on the broader natural environment, with the geological environment being particularly affected. Outwardly, borehole

mniej inwazyjne może się wydawać górnictwo otworowe, w tym soli kamiennej. Na powierzchni to zaledwie głowica eksploatacyjna połączona z rurociągami technologicznymi, natomiast kilkaset metrów poniżej powierzchni terenu powstaje wyrobisko poeksploatacyjne po wylugowanej soli, czyli kawerna. Objętość powstałych kawern liczy się w setkach tysięcy metrów sześciennych, nierzadko nawet w milionach (np. Donadei, Schneider 2022).

Aby kawerna nie utraciła stateczności, koniecznym jest „podparcie” jej ociosów. W przypadku komór w trakcie eksploatacji jest to woda/solanka o różnym stopniu nasycenia, natomiast kawerny wyeksploatowane wypełnione są solanką nasyconą. Jeżeli kawerny pełnią rolę magazynową, wówczas częściowo wypełnione są solanką nasyconą (w części przyspągowej), a częściowo magazynowanym medium (część przystropowa).

Istotą podparcia ociosów kawerny jest wywołanie ciśnienia działającego od wewnątrz kawerny na jej ociosy, o wartości nieprzekraczającej ciśnienia litostaticznego. W praktyce w przypadku komór wyeksploatowanych ciśnieniem tym jest ciśnienie hydrostatyczne solanki. Podobnie jest w przypadku komór magazynowych wypełnionych cieplem medium (solanka/ ropopochodne), z tym, że w przypadku części kawerny wypełnionej cieplymi produktami ropopochodnymi ciśnienie przez nie wywierane jest mniejsze od ciśnienia wywieranego przez solankę (różnica ciężarów właściwych obu cieczy). W przypadku magazynowania gazu koniecznym jest jego sprężenie aż do uzyskania optymalnego ciśnienia.

Bez względu na etap „życia” kawerny jak i sposób jej wykorzystania po zakończonej eksploatacji, ciśnienie wywierane na jej ociosy od wewnątrz będzie zawsze niższe od panującego ciśnienia litostaticznego. To z kolei ma wpływ na prędkość konwergencji, która przebiega z pewną zmiennością w czasie wynikającą m.in. ze sposobu korzystania z kawerny.

Wykorzystanie kawern na cele magazynowe nie jest nieograniczone w czasie. Zjawisko konwergencji, poza wpływem na objętość kawerny, ma także wpływ na stan ociosów. W przypadku kawern magazynowych ma bezpośredni związek ze szczelnością górotworu wokół kawerny, która w tym przypadku jest wartością priorytetową. Zakończenie pracy kawerny jako magazynu powoduje jej likwidację poprzez wypełnienie solanką pełnonasyconą.

Takie rozwiązanie też nie rozwiązuje problemu, gdyż powolne zaciskanie się kawerny powoduje, że konieczny jest odbiór i zagospodarowanie solanki „wypchniętej” z komory. W dłuższym horyzoncie czasowym pojawią się szkody górnicze, które można obecnie szacować przy założeniu, że kawerna (zespół kawern) są cały czas wypełnione solanką. A co w przypadku rozszczelnienia się górotworu wokół kawerny i ucieczki solanki? Szkody górnicze wystąpią w bardzo krótkim czasie, a ich rozmiar może przybrać charakter katastroficznego. Dotychczasowe doświadczenia z katastrof kopalń

mining, including salt mining, may appear to be the least invasive. On the surface, it involves little more than an extraction head connected to technological pipelines. However, a few hundred meters below the surface, post-mining voids known as caverns emerge as a result of salt leaching. The volume of these caverns can be substantial, often reaching hundreds of thousands and, in some instances, even millions of cubic meters (e.g., Donadei, Schneider, 2022).

To maintain the stability of a cavern, it is essential to provide support for its walls. During active mining operations, this support is typically provided by water or brine with varying degrees of saturation, while post-mining caverns are filled with fully saturated brine. When caverns are utilized for storage purposes, they are partially filled with saturated brine (in the lower part) and partially with the stored medium (in the upper part).

The essence of supporting the cavern walls lies in creating an internal pressure on the cavern walls that does not exceed lithostatic pressure. In practice, the hydrostatic pressure of brine provides this pressure for depleted chambers. Similarly, in the case of storage chambers filled with liquid media (brine or petroleum derivatives), albeit with the distinction that in the part of the cavern filled with liquid petroleum products, the pressure they exert is less than that exerted by brine (due to the difference in their specific weights). When storing gas, it is necessary to compress it until the optimal pressure is achieved.

Regardless of the stage of a cavern’s “life” and its intended use after exploitation, the pressure exerted on its walls from the inside will consistently remain lower than the prevailing lithostatic pressure. This, in turn, affects the rate of convergence, which fluctuates over time due to various factors, including the manner in which the cavern is utilized.

The utilization of caverns for storage purposes is not indefinite. The convergence, in addition to impacting the cavern’s volume, also affects the condition of its walls. For storage caverns, this convergence is directly related to the impermeability of the surrounding rock mass, which takes precedence. When a cavern’s storage role comes to an end, it is closed by backfilling it with fully saturated brine.

However, this approach does not completely resolve the issue, as the gradual tightening of the cavern necessitates the removal and proper management of the brine “pushed out” from the chamber. Mining-related damages will emerge over time, which can be approximated assuming that the cavern (or a set of caverns) is continually filled with brine. But what happens in the event of a breach in the rock mass surrounding the cavern, leading to brine leakage? Mining damages will manifest rapidly, and their extent could be catastrophic. Previous experiences from mining disasters in Wapno and Łęzkowice serve as stark reminders that this problem cannot be underestimated.

w Wapnie i w Łęczkowicach wskazują, że problemu tego nie można bagatelizować.

Innym aspektem – czysto gospodarczym – jest ilość pełnowartościowego surowca w postaci solanki nasyconej nadającej się do wykorzystania w przemyśle chemicznym uwięzionej w kawernie. To ok. 15% zasobów wyeksploatowanych z kawerny!

W tej sytuacji koniecznym jest poszukiwanie rozwiązań, które z jednej strony pozwolą na odzyskanie uwięzionej w kawernie solanki, z drugiej zaś zapewnią kawernie stateczność w długich horyzontach czasowych. Niewątpliwie warunki takie spełnia klasyczna podszadzka hydrauliczna (solanka wypełniająca kawernę nie jest podszadką hydrauliczną! – por. Plucińska et. al. 2020), jednak jest to rozwiązanie relatywnie bardzo drogie. Poszukiwany materiał do wypełnienia kawerny powinien spełniać wszelkie wymogi bezpieczeństwa rozumianego jako bezpieczeństwo środowiska geologicznego, w tym także stateczność kawerny po okresie jej eksploatacji. Oczywiście nie są to jedyne warunki, jakie materiał ten powinien spełniać – należy uwzględnić także jego dostępność, cenę, etc.

2. KAWERNY SOLNE JAKO WYROBISKA O WIELU MOŻLIWOŚCIACH

Kawerny solne powstają na skutek otworowej eksploatacji złoża soli. Zatlaczana do górotworu solnego woda rozpuszcza złożę i jest wypompowywana na powierzchnię w postaci solanki o różnym stopniu zasolenia. Celowość wykonywania tego typu wyrobisk można rozpatrywać pod kątem górniczym, mającym za cel wyeksploatowanie określonej ilości kopaliny, a następnie zamknięcie wyrobiska. Drugim aspektem jest aspekt magazynowy. Wydobyta solanka nie jest wykorzystywana gospodarczo, gdyż celem jest pozyskanie kubatury do magazynowania gazu i/lub węglowodorów. W praktyce najczęściej łączy się oba cele – w pierwszej kolejności pozyskuje się surowiec, a następnie przez pewien okres czasu kawerny pełnią rolę magazynową. Ostatnio można się spotkać z coraz większym zainteresowaniem kawernami jako przestrzeniami do magazynowania sprężonego powietrza oraz wodoru. Badane są też możliwości odzyskiwania energii geotermalnej z solanki wypełniającej kawernę.

W Polsce istnieją dwie wielootworowe kopalnie soli – w Mogilnie i w Górze. Kawerny w trakcie eksploatacji pełnią typową rolę górniczą, natomiast część wyeksploatowanych kawern, po odpowiednim przebrojeniu otworów pełni rolę magazynową – Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu (KPMG) Mogilno oraz Podziemny Magazyn Ropy i Paliw (PMRiP) Góra.

Z kolei powstały w ostatnim czasie KPMG Kossakowo to typowy obiekt magazynowy gazu, który w trakcie budowy

Another purely economic aspect concerns the quantity of fully valued materials trapped within the cavern in the form of saturated brine suitable for use in the chemical industry. This constitutes approximately 15% of the resources extracted from the cavern!

In this scenario, it is necessary to seek solutions that, on the one hand, enable the recovery of trapped brine within the cavern and, on the other hand, ensure the long-term stability of the cavern. Undoubtedly, the classical hydraulic backfill fulfills these requirements (it's important to note that the brine used to fill the cavern is not a hydraulic backfill; see Plucińska et al., 2020). However, this is a relatively costly approach. The material sought for cavern backfilling should meet all safety requirements, including geological and environmental safety and cavern stability after the period of its exploitation. Of course, these are not the only conditions that this material should meet; considerations such as its availability, cost, etc. must also be taken into account.

2. SALT CAVERNS: EXCAVATIONS WITH NUMEROUS OPPORTUNITIES

Salt caverns are the result of extracting salt deposits through borehole mining. This process involves injecting water into the salt formations, dissolving them, and then bringing the dissolved salt back to the surface in the form of brine with varying levels of saltiness. From a mining perspective, the feasibility of such excavations can be assessed with the aim of extracting a specific quantity of the mineral and subsequently closing the excavation. Another aspect is related to storage. Here, the extracted brine isn't used for economic purposes; instead, the primary objective is to secure space for storing gases and/or hydrocarbons. In practice, these dual objectives are often intertwined. Initially, the focus is on resource extraction, after which the caverns serve as storage spaces for a certain duration. Recently, there has been growing interest in using caverns as storage facilities for compressed air and hydrogen. Additionally, ongoing research is exploring the potential for harnessing geothermal energy from the brine filling these caverns.

There are two multi-borehole salt mines in Poland, one in Mogilno and the other in Góra. During active mining operations, the caverns serve their typical mining purpose. However, after a proper borehole, a portion of the depleted caverns takes on a storage role. This includes the Underground Gas Storage Cavern (Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu - KPMG) in Mogilno and the Underground Oil and Fuel Storage (Podziemny Magazyn Ropy i Paliw - PMRiP) in Góra.

On the other hand, KPMG Kossakowo, has been established as a typical gas storage facility. The emphasis during

nie był ukierunkowany na odzysk solanki – ta była zrzucana do Zatoki Puckiej.

Ostatnio można się spotkać z coraz większym zainteresowaniem kavernami jako przestrzeniami do magazynowania sprężonego powietrza oraz wodoru. Badane są też możliwości odzyskiwania energii geotermalnej z solanki wypełniającej kavernę. Przez pewien czas prowadzono badania nad możliwością sekwestracji CO₂.

Kawerna po zakończeniu swojej żywotności zostaje zlikwidowana – najczęściej poprzez wypełnienie solanką nasyconą. W efekcie stopień jej wykorzystania gospodarczego wynosi ok. 85%, pozostałe 15% to sól niezbędna do uzyskania pełnonasyconej solanki wypełniającej kavernę. W celu podniesienia współczynnika wykorzystania kaverny, solankę należy zastąpić innym materiałem, który w co najmniej takim samym stopniu spełni swoje zadanie jak solanka (Kunstman et al. 2002). Największe doświadczenia w tym zakresie mają Niemcy, gdzie uruchomiono kilka instalacji umożliwiających wypełnianie kavern solnych odpadami pochodzącymi z procesów przemysłowych bądź górniczych. Rozwiązania w tym zakresie opracowały i wdrożyły m. in. takie firmy jak: Kavernengesellschaft Stassfurt mbH, Minex plus GmbH, International GmbH Bleicherode. Poprzez uruchomione instalacje w kavernach solnych lokowane są m. in. szlamy wiertnicze, zawiesiny na bazie popiołów lotnych, odpady z procesów przemysłowych przeróbki soli. Zebrane w tym zakresie doświadczenia wskazują, że przy odpowiednio dobranym składzie mieszanin do wypełniania kavern oraz sposobie zatłaczania możliwe jest odzyskanie ok. 70-80% pełnowartościowej solanki. Z geomechanicznego punktu widzenia istotne jest to, że wtłaczane mieszaniny z racji swojego ciężaru objętościowego (zdecydowanie wyższego niż wypełniająca kavernę solanka) poprawiają stateczność ociosu kaverny, co ma wpływ na konwergencję, a w końcowym wyniku – na wielkość szkód górniczych.

Należy zaznaczyć, że niektóre z wdrożonych rozwiązań są chronione patentami zarejestrowanymi także w Polsce.

3. PODSADZANIE, SKŁADOWANIE ODPADÓW, CZY...?

3.1. Uwagi wstępne

Polskie prawo dopuszcza wypełnianie pustek podziemnych (tu: kavern po eksploatacji soli kamiennej) w sposób określony w przepisach. W tym zakresie podstawowym aktem prawnym jest Ustawa Prawo geologiczne i górnicze (dalej Ustawa Pging) oraz Rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu zakładów górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi.

3.2. Podsadzanie

Podsadzanie – wypełnianie pustek poeksploatacyjnych materiałem płonnym znajdującym się na miejscu bądź do-

construction was not on brine recovery, which was instead released into Puck Bay.

Lately, there has been a growing interest in utilizing caverns to store compressed air and hydrogen. Research is also underway to explore the potential for harnessing geothermal energy from the brine filling the cavern. Furthermore, studies on the viability of carbon dioxide (CO₂) sequestration have been done for a period of time.

After the end of their operational lives, caverns are usually closed by backfilling them with saturated brine. Consequently, its economic utilization reaches approximately 85%, with the remaining 15% consisting of salt essential for achieving fully saturated brine to fill the cavern. To enhance the cavern's utilization efficiency, it is necessary to replace the brine with another material that can perform its role to at least the same degree as the brine (Kunstman et al., 2002). Germany has gained significant expertise in this area, where several facilities have been established for backfilling salt caverns with waste materials originating from industrial or mining processes. Companies such as Kavernengesellschaft Stassfurt mbH, Minex plus GmbH, and International GmbH Bleicherode have developed and implemented solutions in this regard. These salt cavern installations accommodate materials like drilling mud, suspensions based on fly ash, and waste generated during industrial salt processing. Experience gathered in this field indicates that with a well-chosen mixture composition for cavern filling and an appropriate injection method, it is possible to recover approximately 70-80% of high-value brine. From a geomechanical perspective, it's essential to note that the injected mixtures, due to their higher bulk density (significantly higher than the brine filling the cavern), improve the stability of the cavern's walls. This has an impact on convergence and, ultimately, on the extent of mining-induced subsidence.

It should be noted that some of the implemented solutions are protected by patents registered in Poland.

3. BACKFILLING, UNDERGROUND DISPOSAL OF WASTE, OR...?

3.1. Initial Comments

Polish law allows for backfilling the underground voids (here: caverns after salt extraction) in accordance with specific regulations. In this regard, the primary legal acts include the Geological and Mining Law Act (PGIG Act) and the Regulation on specific requirements for the operation of mining facilities extracting minerals using boreholes.

3.2. Backfilling

Backfilling is the filling of post-exploitation voids with non-valuable material, either found on-site or brought in from external sources, used for the protection of surface structures

starczonym z zewnątrz, stosowane dla ochrony obiektów naziemnych (Leksykon 1989). Przedstawioną definicję można rozszerzyć o stwierdzenie, że celem podsadzania jest szeroko rozumiana ochrona powierzchni terenu nad wyrobiskiem.

Podstawowym materiałem podsadzkowym są piaski kwarcytowe. Norma dotycząca materiałów podsadzkowych (PN-93/G-11010) dopuszcza jako materiały podsadzkowe także żwiry i odpady (do tej grupy zakwalifikowano żuźle, skałę płoną, odpady przemysłowe, mieszanki różnych materiałów podsadzkowych, inne) spełniające wymagania normy.

W historii polskiego górnictwa otworowego soli kamiennej likwidacji poprzez podsadzenie doczekała się jedynie kopalnia otworowa „Łęzkowice” (Traple, Wilk 2002). Stosunkowo płytka eksploatacja w połączeniu z utratą kontroli nad procesem ługowania kawern spowodowała poważne zagrożenie na powierzchni, skutkiem czego podjęto decyzję likwidacji pustek podziemnych oraz rekultywację powierzchni. W sumie w kawernach ulokowano ponad 1 mln m³ materiału podsadzkowego (piasek), a na powierzchni do rekultywacji terenu wykorzystano przeszło 300 tys. m³ mas ziemnych.

Podsadzanie kawern materiałem neutralnym wobec solanki (piasek, żwir skała płoną) pozwala na jej odzysk na poziomie 80 do 90%, co w pierwszej chwili może wydawać się atrakcyjne. Biorąc jednak pod uwagę tylko sam koszt materiału podsadzkowego (bez kosztów transportu, koniecznej infrastruktury powierzchniowej, prawdopodobnie konieczny drugi otwór do kawerny itd.) proces ten jest ekonomicznie nieuzasadniony.

3.3. Składowanie odpadów

Podziemnym składowiskiem odpadów – jest część górotworu, w tym podziemne wyrobisko górnicze, wykorzystywana w celu unieszkodliwiania odpadów przez ich składowanie (art. 6 pkt 1 ust. 6 Ustawy PgiG). Podziemne składowanie odpadów może odbywać się na podstawie koncesji (art. 22 pkt 1 ust. 6 Ustawy PgiG).

Wyróżnia się następujące typy podziemnych składowisk odpadów (art. 125 pkt 1 Ustawy PgiG):

- 1) podziemne składowisko odpadów niebezpiecznych;
- 2) podziemne składowisko odpadów obojętnych;
- 2a) podziemne składowisko odpadów promieniotwórczych;
- 3) podziemne składowisko odpadów innych niż niebezpieczne, obojętne i promieniotwórcze.

Wg stanu na dzień 31 maja 2023 r. w Polsce funkcjonują 3 koncesjonowane podziemne składowiska odpadów należące do PGNiG S.A.: Borzęcin (zatłaczanie CO₂), Husów-Albigowa-Krasne oraz Świdnik (składowanie odpadów płynnych z wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego) (<https://dane.gov.pl/>).

Wydaje się być realną szansą utworzenia w nieczynnych kawernach solnych podziemnego składowiska odpadów, któremu będzie przyswiecał cel odzyskania „uwięzionej” w ka-

(Leksykon 1989). This definition can be expanded to include the fact that the purpose of backfilling is the comprehensive protection of the surface area above the mine working site.

Quartz sand is the primary backfill material.

The standard regulating backfill materials (PN-93/G-11010) also allows for gravels and waste materials (including slag, barren rock, industrial waste, mixtures of various backfill materials, and others) that meet the standard's requirements.

In the history of Polish borehole salt mining, decommissioning through backfilling has been applied only in the case of the “Łęzkowice” borehole mine (Traple, Wilk 2002). The relatively shallow excavation, combined with a loss of control over the leaching process in the caverns, posed a significant surface hazard. As a result, the decision was made to close the underground voids and carry out surface reclamation. In total, over 1 million m³ of backfill material (sand) was deposited in the caverns, and more than 300,000 m³ of earthworks were used for surface reclamation.

Backfilling caverns with materials like sand, gravel, or barren rock, which are neutral to the brine, enables the recovery of approximately 80 to 90% of it. This initially appears attractive. However, when considering only the cost of backfill material (excluding expenses related to transportation, essential surface infrastructure, the potential need for a secondary borehole to access the cavern, and more), this process proves to be economically unjustifiable.

3.3. Underground disposal of waste

Underground waste storage - is a part of the rock mass, including underground mining workings, that is utilized to neutralize waste through storage (Art. 6 point 1 of the Geological and Mining Law). Underground waste storage may be conducted under concession (Art. 22 point 1 of the Geological and Mining Law).

The following types of underground waste storage are distinguished (Art. 125, point 1 of the Geological and Mining Law):

- 1) Underground storage of hazardous waste;
- 2) Underground storage of non-hazardous waste;
- 2a) Underground storage of radioactive waste;
- 3) Underground storage of waste other than hazardous, non-hazardous, and radioactive waste.

As of May 31, 2023, there are three licensed underground waste storage facilities in Poland owned by PGNiG S.A.: Borzęcin (CO₂ injection), Husów-Albigowa-Krasne, and Świdnik (storage of liquid waste from oil and natural gas extraction) (source: <https://dane.gov.pl/>).

There is a viable opportunity to repurpose inactive salt caverns as underground waste storage facilities, with the goal of recovering the trapped brine for industrial use. The cru-

wernach solanki do dalszego jej przemysłowego wykorzystania. Kwestią jest wskazanie takiego odpadu do składowania, który nie spowoduje zanieczyszczenia solanki.

Interesującym odpadem wydaje się być gips syntetyczny, powstający w procesie odsiarczania spalin (desulfogips), popularnie określany REA-gipsem (nazwa pochodzi od niemieckiej nazwy instalacji do odsiarczania spalin – *Rauchgasentschwefelungsanlage*, w skrócie REA). Gips z instalacji odsiarczania spalin (IOS) charakteryzuje się niską promieniotwórczością naturalną oraz niską zawartością metali ciężkich i innych zanieczyszczeń, a zarazem dużą czystością chemiczną (Jarema-Suchorowska 2013).

Produkcja REA-gipsu ma tendencje rosnące, aktualnie przekracza 3 mln Mg/rok, ale tylko ok. 80% zostaje gospodarczo wykorzystana. Reszta trafia na składowiska powierzchniowe, czyli ostrożnie szacując jest to ok. 500-600 tys. Mg rocznie.

Wstępne zagadnienia związane ze składowaniem REA-gipsu w kawernach były już poruszane (Andrusikiewicz 2016) i wydaje się być zasadne dalsze prowadzenie badań w tym kierunku.

Ideą jest podawanie do kawerny mieszaniny gipsowo-solankowej o odpowiedniej gęstości i z określoną wydajnością. Parametry te są niezwykle istotne, gdyż najbardziej pożądaną formą osadzania się gipsu poniżej buta rury zatłaczającej (strefa wypełnienia mieszaniną gipsowo-solankową) jest jak najmniejsze zanieczyszczenie solanki powyżej wylotu (strefa „brudnej” solanki). Z kolei but rury odbierającej czystą solankę powinien być zlokalizowany jak najwyżej (strefa „czystej” solanki) – Rys. 1.

Przeprowadzone przez autora wstępne badania możliwości wykorzystania REA-gipsu do wypełniania kawern wskazują, że z chwilą zaprzestania podawania mieszaniny gipsowo-solankowej do modelowanej kawerny, w stosunkowo krótkim czasie następuje sedymentacja gipsu ze strefy „brudnej” solanki w strefie wypełnienia. W warunkach przemysłowych przerwy takie będą niezbędne, gdyż wylot rurociągu podającego mieszaninę powinien być zlokalizowany kilka metrów powyżej poziomu osadzania się gipsu i w związku z tym konieczne będą operacje „podciągania” rurociągu.

Docelowo należy zbudować taki mechanizm, by mieszanina równomiernie „rozkładała” się po dnie kawerny przy równoczesnej optymalizacji pracy pomp (ciśnienie tłoczenia). To z kolei wiąże się właściwościami reologicznymi mieszaniny (Ahmaruzzaman 2010) i na tej podstawie dobranie optymalnych proporcji solanka – gips (Malczewska et al. 2013).

Również interesujące wydaje się być składowanie odpadów występujących w postaci pyłów i popiołów. Niewątpliwie konieczna będzie ich obróbka poprzez proces immobilizacji, który polega na fizykochemicznym unieszkodliwianiu odpadów. Celem tego procesu jest takie chemiczne przekształcenie odpadu, by nie dochodziło do wymywania z niego substancji szkodliwych, które występujące w postaci zwią-

cial consideration is selecting waste materials for storage that won't contaminate the brine.

An interesting waste material for consideration is synthetic gypsum, which is generated during the flue gas desulfurization process and is commonly known as REA-gypsum (derived from the German name for flue gas desulfurization installations, Rauchgasentschwefelungsanlage, or REA). Gypsum from flue gas desulfurization installations (FGD) is characterized by low natural radioactivity, minimal heavy metal content, and other pollutants, along with high chemical purity (Jarema-Suchorowska 2013).

The production of REA-gypsum has been on the rise, currently exceeding 3 million metric tons per year. However, only about 80% of it is economically utilized. The remaining portion ends up in surface landfills, estimated to be around 500-600 thousand metric tons annually.

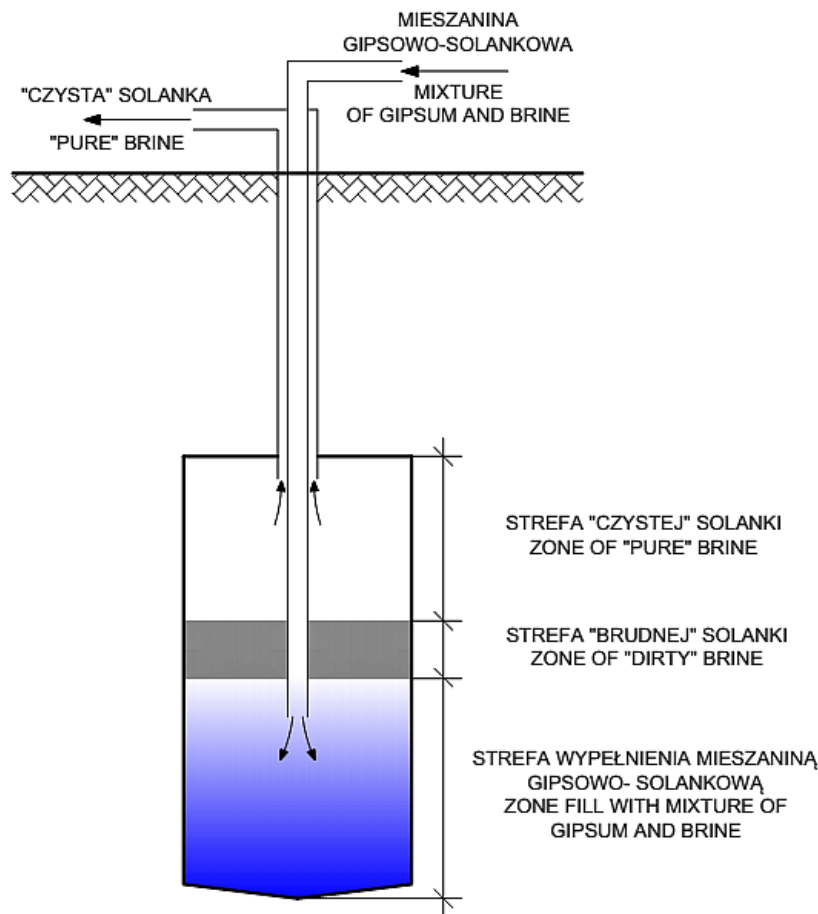
Preliminary issues related to the storage of REA-gypsum in caverns have previously been addressed (Andrusikiewicz 2016), and it seems justified to continue research in this direction.

The concept involves injecting a gypsum-brine mixture into the cavern, carefully controlling its density and flow rate. These parameters are of utmost importance, as the most desirable way for gypsum to settle below casing shoe (the mixture-filling zone) is to minimize brine contamination above the outlet (the “dirty” brine zone). Conversely, the withdrawal casing shoe for clean brine should be positioned as high as possible (the “clean” brine zone) – see Figure 1.

The preliminary investigations conducted by the author regarding the feasibility of using REA gypsum for cavern backfilling indicate that once the supply of the gypsum-brine mixture to the modelled cavern ceases, gypsum sedimentation in the “dirty” brine zone within the filling zone occurs relatively quickly. In industrial conditions, such interruptions will be necessary because the outlet of the pipeline delivering the mixture should be located several meters above the gypsum sedimentation level. Consequently, operations to “lift” the pipeline will be required.

In the long term, it is critical to develop a mechanism that facilitates the even “distribution” of the mixture across the cavern floor while simultaneously optimizing pump performance (discharge pressure). This, in turn, is related to the rheological properties of the mixture (Ahmaruzzaman 2010) and the selection of optimal proportions of brine to gypsum (Malczewska et al. 2013).

Storing waste in the form of dust and ashes also appears to be of interest. Undoubtedly, their treatment through the immobilization process, which involves the physicochemical neutralization of waste, will be necessary. This process aims to chemically transform the waste in such a way that no harmful substances are washed from it, which occur in the form of soluble compounds (e.g., soluble chemical compounds of



Ryc. 1. Schemat osadzania się REA-gipsu w kawernie
 Fig. 1. Scheme illustrating the deposition of REA gypsum in the cavern.

ków rozpuszczalnych (np. rozpuszczalne związki chemiczne metali stanowiące substancje szkodliwe zagrażające środowisku). Ponadto można uzyskać zmianę niektórych parametrów fizycznych odpadu w postaci np. poprawy jego wytrzymałości, zmniejszenia nasiąkliwości, zwiększenia gęstości itp. Procesowi immobilizacji poddaje się najczęściej odpady niebezpieczne o charakterze nieorganicznym (Fengler 2012, Mierzwiński et al. 2017).

Ponadto konieczne są szczegółowe badania w kierunku możliwości potencjalnych reakcji pomiędzy odpadem a solanką, gdyż może dochodzić do wytwarzania gazów w postaci np. wodoru. W takim przypadku może to być przesłanka negatywna w kierunku możliwości składowania danego odpadu.

Innym problemem do rozwiązania będzie technologia podawania odpadów poddanych immobilizacji do kawy, którą będzie determinować ostateczna forma odpadu mającego wypełnić kawernę.

3.4. Odzysk odpadów na potrzeby wypełniania kawern

Poprzez odzysk odpadów rozumie się jakikolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygoto-

metals that pose a threat to the environment). Furthermore, it is possible to alter certain physical parameters of the waste, such as improving its strength, reducing its permeability, increasing its density, etc. The immobilization process is most commonly applied to hazardous waste of an inorganic nature (Fengler 2012; Mierzwiński et al. 2017).

Furthermore, detailed studies on the potential reactions between the waste and brine are necessary, as this may lead to the generation of gases such as hydrogen. In such a case, it could serve as a negative factor regarding the feasibility of storing the specific waste.

Another challenge to address is the technology for delivering immobilized waste into the cavern, a process that will be determined by the final form of the waste intended for cavern backfilling.

3.4. The recovery of waste for the purpose of cavern backfilling

The term waste recovery refers to any process whose main result is for waste to serve a useful purpose by replacing other materials that would otherwise be used to fulfil a specific function or by which waste is prepared to fulfil such a function within a given facility or in the economy as a whole (Waste Act).”

wywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce (Ustawa o odpadach).

Odzysk odpadów będących produktami termicznego przekształcania odpadów (w tym także komunalnych) może odbywać się jako:

- spalanie odpadów (przez ich utlenianie);
- inne procesy termicznego przekształcania odpadów, w tym pirolizę, zgazowanie i proces plazmowy, o ile substancje powstające podczas tych procesów termicznego przekształcania odpadów są następnie spalane.

Efektem termicznego przekształcania odpadów są pozostałości w postaci żużli i popiołów paleniskowych. Do tego dochodzą jeszcze tzw. popioły lotne, powstające na skutek przepływu powietrza przez strefę spalania, które „porywa” drobne cząsteczki ciał stałych tworząc emisję pyłu z procesu spalania. Głównym składnikiem pyłów są związki krzemu, glinokrzemiany, tlenki żelaza, ale też związki alkaliczne, w szczególności tlenki siarki. Z uwagi na ochronę środowiska niezbędne jest oczyszczanie spalin. System oczyszczania spalin jest dość skomplikowany i składa się z kilku elementów:

- odpylania gazów spalinowych;
- usuwania gazów kwaśnych;
- usuwania tlenków azotu;
- usuwania metali ciężkich;
- usuwania związków organicznych.

Prócz wymienionych produktów spalania odpadem są wszelkiego rodzaju sorbenty wykorzystane w procesie oczyszczania spalin, albo w postaci ciał stałych (np. węgiel aktywny w przypadku metody „suchej”) bądź szlamów (w przypadku technologii „mokrej”). Wysuszone szlamy określane są jako tzw. placki filtracyjne.

Każdy produkt spalania (odpad wtórny) podlega zaklasyfikowaniu do właściwej grupy odpadów zgodnie z katalogiem odpadów (Rozporządzenie w sprawie katalogu odpadów). Część z nich kwalifikowana jest jako odpad niebezpieczny (tzw. „z gwiazdką”).

Likwidacja kawern poeksploatacyjnych poprzez ich wypełnienie może być realizowana poprzez przeznaczoną do tego celu instalację do odzysku odpadów, którym właśnie mogą być wybrane popioły oraz pyły powstające w instalacjach termicznego przekształcania odpadów. Ponieważ popioły i pyły charakteryzują się stosunkowo niską gęstością (w przeciwieństwie do gipsu), konieczne będzie skomponowanie odpowiedniego medium, które pozwoli na związanie odpadów, a przy tym będzie pompowalne rurociągami. W tym miejscu należy przyrzeć się **światowym osiągnięciom** związanym z technologią pasty, często określanej podsadzką pastową (Marx et al. 2003). Technologia ta stosowana jest w Niemczech w zakładach podziemnych odzysku odpadów. Jej sednem jest sporządzenie mieszaniny o konsystencji pasty składającej się z odpadów drobnofrakcyjnych, materiałów

The recovery of waste that results from thermal waste treatment (including municipal waste) can be performed through:

- waste incineration (through their oxidation).
- other thermal waste treatment processes, including pyrolysis, gasification, and plasma processes, provided that the substances generated during these thermal waste treatment processes are subsequently incinerated.

The thermal transformation of waste results in residues in the form of slag and ash from combustion. Furthermore, there are fly ashes, which result from the airflow through the combustion zone, carrying away fine particles of solid matter and creating emissions of particulate matter from the combustion process. The primary components of these particulates include silicon compounds, silicates, iron oxides, and alkali compounds, particularly sulphur oxides. To protect the environment, flue gas cleaning is essential. The flue gas cleaning system is quite complex and consists of several components:

- flue gas dust removal
- removal of acidic gases
- removal of nitrogen oxides
- removal of heavy metals
- removal of organic compounds

In addition to the mentioned combustion products, there are various types of sorbents used in the flue gas cleaning process, either in solid form (e.g., activated carbon in the “dry” method) or as sludge (in the “wet” technology). Dried sludges are referred to as so-called filtration cakes.

Each combustion product (secondary waste) is subject to classification into the appropriate waste group in accordance with the waste catalogue (Regulation on the Waste Catalogue). Some of them are classified as hazardous waste (so-called “starred” waste).

The process of decommissioning post-exploitation caverns by backfilling them can be facilitated by employing dedicated waste recovery facilities, which can include certain types of ash and dust generated during waste incineration processes. However, due to the relatively low density of ashes and dust (unlike gypsum), it becomes essential to formulate an appropriate medium that enables waste encapsulation while remaining pumpable through pipelines. In this context, it's beneficial to explore the global advancements associated with paste technology, often referred to as paste backfilling (Marx et al. 2003). This technique is currently in use in Germany within underground waste recovery facilities. Its core concept involves creating a mixture with a paste-like consistency, comprising finely ground waste, binding agents, and water (for salt caverns, the brine would be the target fluid), followed by its injection into a specified location via pipelines (see Figure 2).



Ryc. 2. Podszadzka pastowa (Peschken 2018)

Fig. 2. Paste Backfilling (Peschken 2018)

wiązących i wody (w przypadku kawern solnych docelowo byłaby to solanka), a następnie podanie jej rurociągiem w określone miejsce – Rys. 2.

Zawartość materiałów wiążących powoduje, że pasta ulega samozestaleniu, a tak powstały masyw może osiągnąć wytrzymałość na ściskanie nawet do kilkunastu MPa. W przypadku klasycznych kopalń głębinowych technologia ta jest bezodciekowa (Korzeniowski, Poborska-Młynarska 2016). W przypadku zastosowania pasty w przestrzeniach wypełnionych solanką pasta powinna stanowić barierę dla ewentualnych niekorzystnych emisji pochodzących od odpadów wchodzących w skład pasty. Niewątpliwie przyczynić się może do tego fakt, że solanka w przypadku wielu materiałów wiążących przyspiesza proces wiązania, a tym przypadku jest to proces samozestalania.

Podawanie pasty do kawerny powinno odbywać się podobnie jak w przypadku gipsu – but rury wylotowej powinien być zlokalizowany w niewielkiej odległości od dna kawerny, pozwalającej na jej rozplywanie się po dnie kawerny. Oczywiście pasta powinna mieć odpowiednią gęstość (która będzie wynikała z jej składu) i lepkość – to kierunek badań nad jej składem. Prawdopodobnie również powstanie tu strefa solanki „brudnej” (por. Rys. 1), niemniej jednak w chwili obecnej są to tylko hipotezy wymagające naukowej, a następnie praktycznej weryfikacji.

Na potrzeby wypełniania kawern polugowniczych instalacja odzysku odpadów „związanych” w postaci pasty wydaje się być ciekawą propozycją i wyzwaniem dla technologów.

4. PODSUMOWANIE

Aktualne trendy związane z budową kawern solnych związane są z podziemnym magazynowaniem płynnych

The presence of binding materials causes the paste to self-harden, resulting in a solid mass that can attain compressive strengths of several MPa. This technology is seepage-free in conventional underground mines (Korzeniowski, Poborska-Młynarska 2016). When the paste is used in spaces filled with brine, it should serve as a barrier against potential adverse emissions from the waste components within the paste. This effect is likely because, in the case of many binding materials, brine accelerates the binding process, which in this case is the self-hardening phase.

The method of delivering paste into the cavern should resemble the process employed for gypsum. The outlet pipe of the delivery tube should be positioned slightly above the cavern floor, allowing the paste to disperse evenly across the bottom. Naturally, the paste must be of appropriate density (determined by its composition) and viscosity. These attributes are areas of ongoing investigation in terms of formulation. Probably, a “dirty” brine zone will also develop (see Fig. 1); however, these are currently just hypotheses awaiting scientific and practical validation.

To fill leached caverns, the waste recovery installation utilizing a “bound” paste appears to be an intriguing proposition and a challenge for technologists.

4. CONCLUSION

The current trends associated with the construction of salt caverns revolve around the underground storage of liquid and gaseous energy resources. The brine extracted during this process is typically classified as waste and, as a result, is not economically utilized. Simultaneously, caverns are being developed to extract brine for industrial applications, with the

i gazowych surowców energetycznych. Pozyskana solanka traktowana jest jako odpad i w związku z tym nie jest wykorzystywana gospodarczo. Ale równolegle powstają kawerny związane z pozyskiwaniem solanki do celów przemysłowych, natomiast późniejsze przekształcenie ich na podziemne magazyny to danie drugiego życia kawernom. Te, które nie są wykorzystywane na potrzeby magazynowe, po zakończonej eksploatacji pozostają wypełnione solanką z uwagi na konieczność zapewnienia im stateczności.

Bez względu na sposób wykorzystania kawern solnych podlegają one procesom konwergencji, które dążą do „zamknięcia” kawerny, czyli zlikwidowania podziemnej pustki. Jak wynika z aktualnego stanu wiedzy na ten temat, jest to proces rozłożony co najmniej na setki, a być może, tysiące lat. Trzeba mieć świadomość, że kawerny aktualnie eksploatowane jako magazyny mają również ograniczoną żywotność, co wynika z konwergencji. Po zakończeniu pracy jako podziemny magazyn kawerna powinna zostać wypełniona solanką. Należy jednak liczyć się z możliwością rozszczelnienia się kawerny bądź wnikięcia solanki wypełniającej kawernę w górotwór. Wówczas proces „zamykania” może ulec zdecydowanemu przyspieszeniu, co prawdopodobnie będzie skutkowało poważnymi uszkodzeniami na powierzchni (vide kopalnia otworowa Łęzkowice).

W związku z powyższym wydaje się być zasadne podjęcie działań zmierzających do dania kawernom kolejnego życia, tym razem wypełniając je materiałem stałym. Zaletą takiego rozwiązania, poza czysto ekologicznymi, jest trwałe „podparcie” ociosów kawerny, co istotnie powinno ograniczyć konwergencję. Ponadto nawet w sytuacji rozszczelnienia się kawerny materiał wypełniający nadal pozostanie na swoim miejscu i będzie spełniał swoją rolę.

Powyżej zarysowano trzy warianty wypełnienia pustki kawerny, które technicznie są bardzo do siebie zbliżone, gdyż ostatecznie chodzi o wypełnienie kawerny materiałem stałym. Również rozwiązania techniczne w zakresie sposobu wypełniania kawern wydają się być w zasięgu możliwości. Oczywiście w ostatecznym rozrachunku o wyborze wariantu zadecydują względy ekonomiczne, które już na starcie eliminują podsadzanie w postaci jak opisano powyżej.

Opisane rozwiązania mają jednak drugie oblicze – procedury prawno-administracyjne, które mogą okazać się trudniejsze niż strona techniczna. Najprostsze wydają się być te związane z podsadzaniem. Technologia powszechnie znana i stosowana w górnictwie podziemnym, wymagająca jedynie implementacji do górnictwa otworowego. Ale jak już wspomniano, najprawdopodobniej nie atrakcyjna finansowo. Z kolei w przypadku otworowego składowania podziemnego odpadów pierwsze ścieżki są już przetarte, ale dotyczą składowania odpadów ciekłych z wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego w szcerpanych złożach ropy. W przypadku składowania odpadów w kawernach solnych w Polsce nie przeprowadzono jak dotąd ani jednego postępowania prawno-admini-

potential for later conversion into underground storage facilities, effectively providing a second lease of life for these caverns. Those caverns that are not repurposed for storage, following the conclusion of their primary operations, are filled with brine to ensure their stability.

Regardless of how salt caverns are utilized, they are subject to convergence processes that aim to “close” the cavern, essentially eliminating the underground void. According to current knowledge on this topic, this is a process that spans at least hundreds, and possibly thousands, of years. It’s important to be aware that even caverns currently used as storage facilities have limited lifespans due to convergence. Upon completion of their role as underground storage facilities, caverns should be filled with brine. However, it’s essential to consider the possibility of cavern sealing or the intrusion of brine into the surrounding rock mass. In such cases, the “closure” process could significantly accelerate, potentially resulting in significant surface damage, as seen in the Łęzkowice Borehole Salt Mine.

In light of the above, it seems justified to take actions aimed at giving the salt caverns a new lease of life, this time by backfilling them with solid material. One of the advantages of such a solution, apart from its environmental benefits, is the permanent “support” it provides to the cavern walls, which should significantly reduce convergence. Moreover, even in the event of cavern seal failure, the backfilling material will remain in place and continue to serve its purpose.

The three outlined approaches for cavern void backfilling are technically quite similar, as they all involve the use of solid materials to occupy the cavern. The technical solutions for this backfilling process also appear to be within reach. However, the ultimate choice between these variants will be primarily dictated by economic factors, which, right from the outset, rule out the backfilling method as described above.

The described solutions, however, have another facet – legal and administrative procedures that may prove to be more challenging than the technical aspects. The simplest ones are likely to be associated with backfilling, a technology widely familiar and applied in underground mining, only requiring adaptation for borehole mining. Nevertheless, as previously mentioned, it may not be financially appealing. On the other hand, in the case of underground storage of waste in boreholes, the first steps have already been taken, but they concern the storage of liquid waste from oil and gas extraction in depleted oil fields. In the case of waste storage in salt caverns in Poland, not a single legal-administrative procedure has been conducted so far, and one can expect a lengthy process with no guarantee of success.

Conversely, waste recovery facilities lack precise legislative definitions. The determination of whether they should be classified as waste storage facilities or as facilities simi-

nistracyjnego i można spodziewać się długotrwałej procedury bez gwarancji sukcesu.

Z kolei instalacje odzysku odpadów nie zostały w prawodawstwie jasno opisane i kwestią urzędniczą będzie stwierdzenie, czy należy je interpretować jako składowanie odpadów, czy też jako instalację analogiczną jak np. instalacje doszczelniania zrobów zawałowych w kopalniach węgla kamiennego mieszaninami popiołowymi (nota bene traktowane są one jako element profilaktyki przeciwpożarowej). Należy wspomnieć, że jedna z polskich kopalń podziemnych nosi się z zamiarem uruchomienia instalacji do odzysku i unieszkodliwiania odpadów do likwidacji pustek podziemnych poprzez ich wypełnianie. W tym przypadku nie mówi się o składowisku podziemnym odpadów, a mimo to procedury prawno-administracyjne trwają już kilka lat.

Biorąc pod uwagę aktualną sytuację związaną z wykorzystaniem kawern solnych w Polsce należy uznać za w pełni zasadne podjęcie kroków w kierunku docelowego wypełnienia kawern materiałem stałym. Czas jest niewątpliwie elementem, który istotnie wpływa na dobrostan kawern. Wykorzystując skromne doświadczenia niemieckie w tym zakresie należy podjąć działania, które pozwolą wykorzystać potencjał tkwiący w kubaturze kawern i odzyskać z nich „uwięzioną” solankę. Bilans korzyści wydaje się być jednoznaczny, jeżeli uwzględnimy przy tym korzyści płynące z ograniczenia ilości odpadów trafiających corocznie na składowiska powierzchniowe. Planowane nowe kawerny magazynowe w dłuższej perspektywie czasowej to kolejne kubatury do wykorzystania w nieodległej przyszłości. Wypracowanie odpowiednich technologii wypełniania kawern z równoległe wypracowaną ścieżką legislacyjną wydaje się być optymalną metodą likwidacji podziemnych pustek przynoszącą profity gospodarcze i środowiskowe.

lar to those used, for instance, for sealing goaf areas in underground coal mines with ash mixtures (notably treated as part of fire prevention measures) becomes an administrative consideration. It's noteworthy that one of Poland's underground mines is contemplating the establishment of a waste recovery and disposal facility for backfilling underground voids. In this case, it is not referred to as an underground waste repository, yet legal-administrative procedures have been ongoing for several years.

Considering the current scenario regarding the use of salt caverns in Poland, it is entirely justified to take steps towards the ultimate backfilling of these caverns with solid materials. Time plays a crucial role, significantly influencing the well-being of these caverns. Drawing upon the slight German experience in this field, actions should be initiated to tap into the potential inherent in the cavern volumes and recover the “trapped” brine. The balance of benefits appears unequivocal, especially when considering the advantages of reducing the amount of waste annually directed to surface landfills. The planned new storage caverns will, in the long term, provide additional volumes to be utilized in the near future. Developing suitable technologies for cavern backfilling, in parallel with a well-structured legislative framework appears to be the optimal strategy for addressing underground voids. This strategy promises both economic and environmental advantages.

LITERATURA/REFERENCES

- AHMARUZZAMAN M.; 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36: 327-363.
- ANDRUSIKIEWICZ W., 2016. Possible Uses of Synthetic Gypsum in Salt-Cavern Filling. *Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, No 1(37): 57-62.
- DONADEI S., SCHNEIDER G.-S., 2022. Compressed air energy storage [w:] *Storing Energy (Second Edition)*, Elsevier.
- FENGLER M., 2012. Stabilizacja i zestalanie (immobilizacja) odpadów niebezpiecznych ze spalarni odpadów komunalnych w technologii „Geodur”. *Piece przemysłowe & kotły*, 12:38-44. https://dane.gov.pl/pl/dataset/221/resource/48485,lista-koncesyjna-podziemne-bezbiornikowe-magazynowanie-podziemne-skadowanie-odpadow-oraz-wydobywanie-wod-termalnych-stand-na-31052023-r/table?page=1&per_page=20&q=&sort= (dostęp 24.07.2023 r.)
- JAREMA-SUCHOROWSKA S., 2013. Zagrożenia dla gospodarki gipsem z instalacji odsiarczania spalin. *Biuletyn Naukowo-techniczny Zakładów Pomiarowo-Badawczych Energetyki*. Rok LVIII, Nr 2 (250): 33-40.
- KORZENIOWSKI W., POBORSKA-MŁYNARSKA K.M., 2016. Składowanie i odzysk odpadów wtórnych z instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych w kopalni podziemnej. *Inżynieria Ekologiczna - Ecological Engineering*, 49: 91-99.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K.; 2002: *Zarys otworowego ługownictwa solnego. Aktualne kierunki rozwoju*. Wyd. AGH, Kraków.
- LEKSYKON górniczy, praca zb., 1989. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- MALCZEWSKA M., CZABAN S., GŁOWSKI S., ŚWIERZKO R., KIWACZ T., SOBOTA J., 2013. Badania liniowych strat ciśnienia podczas przepływu mieszaniny dwufazowej w rurociągu na przykładzie mieszaniny popiołowo-wodnej. *Ochrona Środowiska*, 35/2: 69-72.
- MARX H., LACK D., KRAUKE W, 2003. Versatz untertätiger Hohlräume mit Industriellen Reststoffen am Beispiel des Bergwerkes Glückauf Sondershausen. *Symposium Solne „Quo vadis Sal“*, Mikorzyn k. Konina
- MIERZWIŃSKI D., ŁACH M., MIKUŁA J., 2017. Alkaliczna obróbka i immobilizacja odpadów wtórnych ze spalania odpadów.

- Inżynieria Ekologiczna – *Ecological Engineering*. 18 (2): 102-108.
- PESCHKEN P., 2018. Pumptechnik als Alternative zur herkömmlichen Förderung von Feststoffen. *Mining Report Glückauf* 154 (4): 306-317.
- PLUCIŃSKAA., KROWIARZ M., KLEJNOWSKAA., PŁÓCIENNIK J., 2020. Składowanie odpadów vs. podsadzanie wyeksploatowanych komór solankowych – potencjał i możliwości na przykładzie Kopalni Soli „Mogilno”. *Przegląd Solny*, 15: 32-39. PN-93/G-11010. *Górnictwo. Materiały do podsadzki hydraulicznej. Wymagania i badania.*
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Gospodarki z dnia 25 kwietnia 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu zakładów górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi. Dz. U. 2014 poz. 812.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów. Dz.U.2020.10.
- TRAPLE J., WILK S., 2002. Ekologiczne skutki eksploatacji soli kamiennej metodą otworową w kopalni „Łęzkowice”. Część II. Historia likwidacji kopalni. *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 19/1: 237-253.
- USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze. Dz. U. 2011 Nr 163 poz. 981 z późn. zm.
- USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz.U.2021.779 t.j.