

Eksploracja otworowa jako potencjalna metoda wydobycia głęboko zalegających złóż soli potasowych w Polsce

Solution Mining Technology – a Potential Mining Method for Deeply Buried Potash Deposits in Poland

Sebastiaan N.G.C. VAN DER KLAUW, Christian FRITZE, Stephan PFEIFER, Andreas JOCKEL

ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, e-mail: mining@ercosplan.com

W niniejszej pracy zostanie omówiona technologia wydobycia otworowego soli potasowych oraz jej potencjał zastosowania w głęboko zalegających złóżach w Polsce. Przedstawione zostaną warunki i ograniczenia tej metody a także przeprowadzony zostanie krótki przegląd dostępnych złóż soli potasowych w kraju. Celem analizy jest określenie obszarów w Polsce, gdzie ta technologia może być skutecznie wykorzystywana do wydobycia solanek zawierających potas, a także ewentualnie magnez, z podziemnych złóż soli.

W skrócie, metoda otworowego wydobycia soli potasowych polega na sprowadzeniu wody lub solanki (rozpuszczalnika) na poziom złoża, pozwalając na rozpuszczenie potasu i innych minerałów solnych ze złoża, a następnie wydobyciu powstałej solanki z utworzonej pod ziemią kawerny. Na powierzchni solanka jest przetwarzana w celu uzyskania nadającego się do sprzedaży produktu potasowego w postaci chlorku potasu (MOP) o zawartości K_2O większej niż 60% lub w postaci siarczanu potasu (SOP) o zawartości K_2O większej niż 50%. Wyzwaniem jest efektywne połączenie operacji wydobycia otworowego i przetwarzania solanek, w celu osiągnięcia ekonomicznie opłacalnego procesu.

Warunkiem osiągnięcia wydajności w procesie ekstrakcji soli metodą otworową jest uzyskanie stosunkowo wysokiej zawartości potasu w wytworzonej solance. Aby tak się stało, określona ilość rozpuszczalnika musi wejść w kontakt z odpowiednią ilością soli mineralnych zawierających potas, podczas całego okresu eksploatacji kawerny. W tym celu należy rozpuścić w rozpuszczalniku znaczną ilość (> 35%) minerałów obecnych w złożu (nie tylko minerałów zawierających potas, ale często też halitu (NaCl)). W ten sposób w pozostałościach po rozpuszczeniu rozwinię się odpowiednia porowatość, umożliwiając wymianę rozpuszczalnika i po-

This presentation will first discuss the solution mining technology for potash salts to define boundary conditions for its application also for deeply buried deposits. This will be followed by a brief overview of potash deposits in Poland. The boundary conditions for solution mining will then be used to infer where in Poland solution mining technology can be applied for the economic extraction of potassium- and possibly magnesium-bearing brines from the salt deposits in the underground.

In a nutshell, the technique of solution mining of potash salts is to bring down water or brine (solvent) towards the deposit level, let this material dissolve the potassium and possibly other salt minerals from the deposit, and then extract the resulting production brine back towards the surface from the cavern developing in the underground. At the surface, the production brine is processed to a saleable potash product, either a Muriate of Potash (MOP) with $K_2O > 60\%$ or a Sulphate of Potash (SOP) with $K_2O > 50\%$. The challenge is to combine the solution mining and brine processing operations in such a way that an overall efficient and economically viable process can be obtained.

An important boundary condition for an overall efficient operation is that a relatively high potassium content is reached in the production brine by solution mining. The prerequisite for this to happen is that a given volume of solvent is able to get into contact with an adequate amount of potash-bearing salt minerals over the lifetime of the cavern operation. To achieve this, a significant (> 35%) volume of the minerals within the deposit (not only the potassium-bearing minerals, but usually also halite (NaCl)) has to be dissolved by the solvent. This way, either an adequate porosity develops within the dissolution residues to allow for an exchange of solvent

wstajej na powierzchni rozpuszczania solanki, w przeciwnym razie pozostałe nierozpuszczone minerały rozpadną się i opadną na dno kawerny w miarę jej powstawania. Wymóg ten zwykle nie stanowi problemu w przypadku skał z dominacją sylwinu (KCl), karnalitu ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) czy nawet kainitu ($\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,75\text{H}_2\text{O}$), ale wyklucza to eksploatację ługowanie skał, w których dominuje polihalit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Gdy nawet niewielka ilość polihalitu rozpuści się w wodzie, dochodzi do nasycenia anhydrytem (CaSO_4). Rezultatem jest rozpuszczenie się jeszcze większej ilości polihalitu; równocześnie dochodzi do krystalizacji anhydrytu na powierzchni rozpuszczania a sam proces znacznie spowalnia. Niemożliwe jest wówczas osiągnięcie w rozsądnym czasie wymaganego wysokiego stężenia potasu w wyprodukowanej solance.

Aby doprowadzić wodę lub solankę do poziomu złoża, konieczne jest utworzenie drogi w dół poprzez wywiercenie otworu z powierzchni do tego poziomu. Wydobywanie solanki natomiast wymaga utworzenia innej drogi, ponieważ powietrze, gaz, woda lub solanka muszą wypierać solankę wypełniającą kavernę i jednocześnie zapobiegać powstaniu próżni w kawernie. Można to osiągnąć łącząc powierzchnię terenu z kaverną dwoma oddzielnymi otworami wiertniczymi lub łącząc je jednym odwiertem, który ma co najmniej dwie oddzielne ścieżki. Wiercenie jednego lub większej liczby otworów w celu utworzenia ścieżki transportu dla wody lub solanki w znacznym stopniu obciąża finanse operacji wiertniczych, zwłaszcza w przypadku złóż, które znajdują się głęboko pod powierzchnią ziemi. Dlatego też należy w pełni poznać geologię złoża, aby mieć pewność, że otwór wiertniczy kawerny pozwoli na rozpuszczenie określonej minimalnej objętości złoża w trakcie całego procesu wydobywania otworowego. Grubość złoża to czynnik, który może wpłynąć na potencjalną objętość złoża dostępną dla każdego otworu wiertniczego kawerny, co może potencjalnie umożliwić większe objętości w procesie wydobywania dla złoża o większej grubości. Kolejnym czynnikiem do uwzględnienia jest rozwijanie się boczne kawerny nad obszarem złoża, z dala od pierwotnego otworu wiertniczego. Z biegiem czasu i w zależności od grubości złoża, powstaje kaverna o dużej średnicy, co z kolei może wpłynąć na odpowiednio większą część złoża. Aby to osiągnąć, należy kontrolować wzrost kawerny ku górze, co osiąga się poprzez wstrzykiwanie wody lub solanki o mniejszej gęstości niż powstająca solanka produkcyjna. Osiąga się to poprzez zastosowanie warstwy izolującej „blanketu”, „poduszki” czyli medium o mniejszej gęstości niż woda i mającego niewielką lub żadną zdolność do rozpuszczania minerałów złoża osadzie. W roli „medium izolującego strop” zazwyczaj występuje ciecz węglowodorowa, gaz azotowy lub powietrze. Jednakże, w zależności od składu rozpuszczalnika, można zastosować również naturalną barierę, na przykład skałę solną, której dany rodzaj rozpuszczalnika

and production brine at the dissolution face, or the remaining non-dissolved minerals disaggregate and fall from the dissolution face to the bottom of the developing cavern. This requirement is usually not a problem within deposit rocks dominated by either sylvite (KCl), carnallite ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) or even kainite ($\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,75\text{H}_2\text{O}$), but this precludes the solution mining of rocks dominated by the mineral polyhalite ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). As soon as a small amount of polyhalite dissolves in water, the saturation of anhydrite (CaSO_4) is reached. At this point more polyhalite will dissolve, but this is accompanied by the crystallisation of anhydrite at the dissolution face and the dissolution process will slow down dramatically. It is then not possible to achieve the required high K-concentrations in the production brine within a reasonable amount of time.

To bring water or brine down to the deposit level, a pathway from the surface to the deposit level is necessary, requiring the drilling of a hole from the surface down to that level. The extraction of the brine requires another pathway, because either air/gas, water or brine has to displace the brine that is removed from the underground to prevent the development of a vacuum in the underground cavern. This is achieved by either connecting the surface to the cavern with two separate drill holes or by connecting both with one drill hole, which has at least two separate pathways. Drilling of the hole(s) to provide the pathways for water/brine transport is a major cost factor for a solution mining operation, especially for deeply buried deposits. Therefore, the geology of the deposit has to be known well enough to be certain that a cavern drill hole will, over its operation time, allow the solution mining operation to dissolve a certain minimum volume of the deposit. One factor influencing the available deposit volume per cavern drill hole is the thickness of the deposit, with potentially larger volumes available for solution mining in deposits with larger thicknesses. Another factor is the lateral cavern development over the deposit area, away from the drill hole, which results, over time and at a given deposit thickness, in a cavern with a large diameter influencing a correspondingly large volume of the deposit. To achieve this, the upward development of a cavern, which is predetermined by injection of water/brine with a lower density than the resulting production brine, has to be controlled. This is accomplished by using a “blanket”, which is a medium with a lower density than water and has no or minimal capacity to dissolve any of the deposit minerals. Usually, a liquid hydrocarbon product, nitrogen gas or air is used as a blanket material. However, depending on the composition of the solvent, a natural blanket consisting of a salt rock that hardly dissolves in this solvent can also be used. In deposits with an interlayering of horizons with different mineral compositions, the use of a natural blanket can limit the mineable thickness of the deposit.

może praktycznie nie rozpuszczać. W złożach z wkładkami przenikaniem się poziomów o różnym składzie mineralnym zastosowanie naturalnej warstwy ekranizującej może ograniczyć grubość eksploatacyjną złoża.

Ponieważ wiercenie otworów jest głównym elementem generującym koszty, kluczowe jest ustalenie, ile kawern musi działać jednocześnie, aby uzyskać odpowiednią ilość potasu w solance przeznaczonej do zakładów przetwórczych oraz osiągnąć planowaną roczną produkcję. To kwestia kluczowa z perspektywy ekonomii realizowanych operacji. Liczba otworów produkcyjnych niezbędnych do osiągnięcia określonej rocznej produkcji zależy od natężenia przepływu przez komorę, rzeczywistej średniej zawartości potasu osiągniętej w solance produkcyjnej oraz efektywności procesu jej przetwarzania. Natężenie przepływu nad kawerną oraz zawartość potasu w solance produkcyjnej są ze sobą powiązane i wpływają na siebie. Są one uzależnione od czasu retencji rozpuszczalnika na powierzchni rozpuszczania oraz od dostępnego efektywnego obszaru rozpuszczania na tej powierzchni. W tym kontekście- jeśli natężenie przepływu w systemie kawern maleje, a czas dostępny dla rozpuszczalnika do oddziaływania z minerałami zawierającymi potas na powierzchni rozpuszczania się wydłuża, i przy założeniu, że brak jest dalszych zmian w systemie wydobywania, nastąpi wzrost zawartości potasu w solance produkcyjnej. Teoretycznie, przy bardzo niskich prędkościach przepływu oraz przy określonej temperaturze, można osiągnąć nasyconą potasem solankę produkcyjną. Przy tak niskich prędkościach przepływu, liczba kawern, które muszą być jednocześnie eksploatowane, aby wyprodukować odpowiednią objętość wysokogatunkowej solanki, która umożliwi osiągnięcie planowanej rocznej produkcji, będzie bardzo duża, co poprzez wiercenie otworów zwiększy koszty w ramach projektu. Przy wyższych prędkościach przepływu, czas retencji rozpuszczalnika w kawernie jest krótszy, co skutkuje niższą zawartością potasu w solance produkcyjnej. Ponownie, aby uzyskać wystarczającą ilość potasu w solance produkcyjnej w ilości potrzebnej do osiągnięcia zaplanowanej rocznej produkcji, konieczne jest jej wydobycie z większej liczby kawern. Efektywność przetwarzania solanki o niższej jakości jest niższa w porównaniu z przetwarzaniem solanki o wyższej zawartości potasu. Dlatego też konieczne jest znalezienie optymalnej równowagi między średnią szybkością przepływu nad kawerną, uzależnioną od mineralogii złoża i mieści się gdzieś między 20 m³/h a 55 m³/h, a dostępną efektywną powierzchnią rozpuszczania (średnicą kawerny) wewnątrz kawerny. Ta równowaga jest niezbędna do uzyskania solanki produkcyjnej o zawartości potasu zbliżonej do, ale wciąż niższej niż nasycenie potasem.

Wielkość kawerny, w której prowadzona jest eksploatacja, ma istotny wpływ na ekonomię całego projektu wydobywania soli potasowych metodą otworową. Wpływa ona zarówno na liczbę otworów wiertniczych, które trzeba wykonać na po-

Since the drilling of cavern drill holes is a major cost factor, the number of simultaneously operating caverns required to reach an adequate amount of K in the brine brought to the processing plant to achieve a defined annual production is important for the economics of the operation. The number of cavern drill holes that are required to achieve a defined annual production depends on the flow rate over the cavern, the actual average K-content achieved in the production brine and the efficiency of the brine processing. The flow rate over the cavern and K-content of the production brine, however, are not independent, but are related to the retention time of the solvent at the dissolution face and the effective available area for dissolution at that face. For a defined dissolution area, the reduction of the flow through a cavern system and the increase in time for the solvent to react with potash-bearing minerals at the dissolution face will lead, under the assumption of no further changes to the solution mining system, to an increase in the K-content of the production brine. At very low flow rates, it is theoretically possible to achieve a K-saturated production brine at a given temperature. At such low flow rates, however, the number of caverns that need to be operated simultaneously to produce an adequate volume of this high-grade brine to achieve the planned annual production will be very large, increasing the project drilling costs. At higher flow rates, the retention time of the solvent in the cavern is shorter and the K-content of the production brine will be lower. Again, in order to have sufficient K in the overall production brine to achieve the planned annual production, more caverns have to produce brine. The processing of this low-grade brine has a lower efficiency compared to processing brine with a higher K-content. Therefore, an optimum balance has to be found between the average flow rate over a cavern, depending on the mineralogy of the deposit and being somewhere between 20 m³/h and 55 m³/h, and the available effective dissolution area (cavern diameter) available within the cavern to obtain a production brine with a K-content that is close to, but still below K-saturation.

Taking into consideration the factors of cavern lifetime, effective dissolution area and average production brine flow rate, the cavern size influences the economics of a solution mining project due to the number of required drill holes at the start and during continuous operation. To which size (diameter) a cavern is developed, depends on the short-term and long-term stability of the cavern, evaluated by rock mechanical modelling, and needs to consider, to a lesser degree, how much time it would take to prepare a cavern for production. Especially for deeply buried deposits, the solution mining technique has some advantages over the conventional underground mining technique when it comes to the rock mechanical modelling and interpretation of the results related to short- and long-term stability:

czątku operacji oraz podczas trwającej eksploatacji. Długość życia kaverny, efektywna powierzchnia rozpuszczania soli oraz natężenie przepływu solanki produkcyjnej to kluczowe czynniki, które wpływają na ten proces i decydują o jego opłacalności. Do jakiej wielkości (średnicy) rozwija się kavernę, zależy od jej krótko- i długoterminowej stateczności, ocenianej za pomocą modelowania geomechanicznego. W mniejszym stopniu uwzględnia się również czas potrzebny na przygotowanie kaverny do produkcji. Dla głęboko zalegających złóż, technika wydobywania otworowego posiada kilka zalet w porównaniu z konwencjonalną techniką górnictwa podziemnego, zwłaszcza jeśli chodzi o modelowanie geomechaniczne oraz interpretację wyników związanych ze statecznością krótko- i długoterminową. Oto one:

- W operacjach wydobywania otworowego nie wymaga się obecności personelu do prac pod ziemią, wskaźniki bezpieczeństwa dotyczące interpretacji wyników modelowania geomechanicznego w kontekście stabilności krótkoterminowej mogą więc być niższe niż w przypadku konwencjonalnego górnictwa podziemnego. Rurociągi w odwiertach mogą ulec uszkodzeniu z powodu niestateczności stropu, co może skutkować koniecznością dodatkowych prac przy kawernie lub w najgorszym przypadku, jej porzuceniem, jednak nie ma ryzyka utraty ludzkiego życia.
- W trakcie eksploatacji lub nawet po jej zakończeniu, kolumna rur prowadząca od kaverny do powierzchni generuje ciśnienie hydrostatyczne lub litostatyczne co najmniej równe z tym na poziomie kaverny. W porównaniu z konwencjonalnymi podziemnymi komorami górnictwymi wypełnionymi powietrzem, ciśnienie hydrostatyczne/litostatyczne kavern eksploatowanych otworowo, podczas pracy na równoważnych głębokościach skutkuje niższymi naprężeniami różnicowymi wokół wyrobisk górniczych.

Z tego powodu techniki wydobywania otworowego mogą być nadal stosowane z relatywnie wysoką efektywnością w głęboko zalegających złóżach, gdzie analiza geomechaniczna sugeruje, że w tradycyjnym górnictwie podziemnym możliwe byłoby jedynie minimalne wydobycie ze względów bezpieczeństwa.

Kolejnym atutem wydobywania otworowego w porównaniu do tradycyjnego wydobywania podziemnego w głęboko zalegających złóżach jest wpływ gradientu geotermalnego, który skutkuje wyższymi temperaturami w głębszych warstwach złóż. W przypadku operacji wydobywania otworowego jest to korzystne, ponieważ tempo rozpuszczania większości minerałów soli zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury, a saturację solanki potasem osiąga się przy wyższych stężeniach potasu w solance. Dzięki temu możliwe jest eksploatowanie kavern w głęboko zalegających złóżach przy wyższych prędkościach przepływu, co pozwala na uzyskanie wyższego stężenia potasu w solance produkcyjnej w porównaniu z kavernami eksploatowanymi w podobnych złóżach na mniejszych głębokościach. W przypadku konwencjonalnych operacji

- As no personnel are required for underground work in a solution mining operation, the safety factors for the interpretation of the rock mechanical modelling results regarding short-term stability can be lower for solution mining compared to conventional underground mining. Down-hole piping might get damaged due to minor roof instability, requiring additional work on the cavern or, in the worst case, abandonment of a cavern, but there is no risk of loss of human life.
- During operation or even after abandonment of a cavern, the solvent or production brine column from the cavern to surface has at least a hydrostatic/halmostatic pressure at the cavern level. Compared to air-filled conventional underground mining rooms, the hydrostatic/halmostatic pressure for an operation at comparable depths results in a smaller differential stress around the mine opening for the solution mining cavern.

For these reasons, solution mining techniques can still be applied with a relatively high recovery ratio in deeply buried deposits, where rock mechanical modelling suggests that only very low recovery ratios would be feasible for a safe conventional underground mining operation.

A further advantage of solution mining compared to conventional underground mining in deeply buried deposits stems from the geothermal gradient, which results in relatively high deposit temperatures at greater depths. For a solution mining operation, this is advantageous as the dissolution rate of most salt minerals increases at higher temperatures and also the K-saturation of the brine is reached at higher K-concentrations in the brine. This allows caverns in deeply buried deposits to be operated at higher flow rates, achieving higher K-concentration in the production brine compared to caverns operated within similar deposits at shallower depths. For a conventional underground mining operation, higher deposit temperatures are not advantageous as they require additional investment for ventilation.

From the previous sections, the following boundary conditions for the mining of deeply buried potash deposits can be derived:

- the deposit should consist of the potassium- and/or magnesium-bearing salt minerals sylvite, carnallite or kainite in combination with halite. Other phases can be present, but their influence on the solution mining operation has to be investigated during further studies,
- the average thickness of a single deposit layer should exceed 2 m. The thicker the layer the better; however, it is feasible to mine several such layers from a cavern drill hole,
- it has to be possible to use information from drill holes that are several 100 m apart to predict the thickness and mineral composition of the deposit between these drill holes in order to evaluate in advance how much deposit

górnictwych pod ziemią wyższe temperatury w złożu nie są korzystne, ponieważ wiążą się z koniecznością dodatkowych inwestycji w system wentylacyjny.

Na podstawie wcześniejszych sekcji można wyciągnąć następujące wnioski dotyczące ograniczeń związanych z głębino-
wą eksploatacją kopalń soli potasowej:

- złożo powinno składać się z soli potaso- i/lub magnezono-
śnych, tj. minerałów takich jak sylwin, karnalit lub kainit,
w połączeniu z halitem. Inne fazy mineralne mogą występować, lecz ich wpływ na operację wydobywania otworowego wymaga dalszych badań,
- średnia grubość pojedynczej warstwy złoża powinna wynosić ponad 2 m. Im grubsza warstwa, tym lepiej; jednakże możliwe jest wydobywanie kilku takich warstw z jednego otworu kawernowego,
- by dokładnie oszacować, ile materiału złożowego można wydobyć z jednego lub więcej otworów kawernowych, niezbędne jest wykorzystanie informacji z odwiertów, które są oddalone od siebie o kilkaset metrów. Te dane pozwalają przewidzieć grubość i skład mineralny złoża między tymi odwiertami jeszcze przed rozpoczęciem eksploatacji.

Większość rentownych złóż soli kamiennych i soli potasowych w Polsce osadziła się podczas okresu cechsztynu (późny perm, około 255 milionów lat temu). Osady solonośne sedymentowały w obszarze europejskiego basenu permskiego, rozciągającego się na obszarze około 700 000 km² w północnej części Europy Środkowej, od wschodniej Anglii na zachodzie aż po Litwę na wschodzie. Osady solne w Polsce są podzielone na cztery cyklotemy (PZ1 do PZ4), z przewagą skał solnych w cyklotemach dolnych i środkowych. Cyklotemy od Z5 do Z7 zidentyfikowane w Niemczech uważane są za podcykle górnego cyklotemu PZ4 w Polsce. W obszarze obejmującym północną i centralną Polskę (do około 60% powierzchni kraju), skały solne tych cyklotemów mogą osiągać grubość nawet do 1400 m. Sole potasu i magnezu o znaczeniu ekonomicznym, takie jak sylwin, karnalit i polihalit, występują w dolnych trzech cyklotemach (PZ1 do PZ3).

Większość złóż pokładowych z poziomo zalegającymi warstwami soli o minimalnym lub umiarkowanym wpływie tektoniki, występują na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej na północnym wschodzie oraz monoklinie przedsudeckiej i niecki północnosudeckiej na południowym zachodzie basenu cechsztyńskiego. W centralnej części basenu cechsztyńskiego w Polsce, w rejonie antyklinorium środkowopolskiego z przyległymi synklinami, biegnącego od północnego zachodu na południowy wschód, warstwy soli uległy tektonicznemu przekształceniom.

W drugiej połowie XX wieku przeprowadzono wiele prac geologicznych w poszukiwaniu zasobów soli kamiennych, soli potasowych i magnezowych. Odkryto wówczas liczne złoża, które poddano dalszym badaniom i eksploracji, jednak

material can be extracted from one or more cavern drill holes.

Most of the economically interesting rock salt and potash deposits in Poland were deposited during the Zechstein (Late Permian, approx. 255 milion years ago). The salt-bearing sediments were deposited within the European Permian Basin, which extends across an area of approx. 700,000 km² in northern Central Europe, from eastern England in the west to Lithuania in the east. The salt-bearing sediments are divided into four cycles (PZ1 to PZ4) in Poland, with the salt rocks dominating in the lower and middle cycles. The cycles Z5 to Z7 identified in Germany are considered subdivisions of the upper PZ4 cycle in Poland. In northern and central Poland (below about 60% of the country), the salt rocks of these cycles can reach a thickness of up to 1,400 m. Potassium and magnesium salts of economic interest: sylvinite, carnallite and polyhalite have been reported in the lower 3 cycles (PZ1 to PZ3).

Mostly horizontally layered salt deposits with minimal to moderate tectonic overprint occur on the East European Precambrian Platform in the northeast as well as within the Peri Sudetic Monocline and the North Sudetic Depression in the southwest of areas with Zechstein-aged salts in Poland. In the central part of the area with Zechstein-aged salts in Poland, within the NW-SE striking Central Polish Anticlinorium and within accompanying synclines, the salt is present in tectonically overprinted salt structures.

As part of several geological prospection campaigns in the second half of the 20th century, besides several deposits with rock salt, deposits with potassium and magnesium salts were found and these have been further explored with different intensities. The knowledge about the overall geological structure of these deposits is usually minimal. The exploration drill holes intersected potassium and magnesium salts at depths between 700 and 1,800 m. As potassium- and magnesium-bearing minerals, sylvite, carnallite, polyhalite and also minor amounts of kieserite (MgSO₄·H₂O), kainite, hexahydrite (MgSO₄·6H₂O) and langbeinite (K₂SO₄·2MgSO₄) have been reported (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020).

Historical resources estimated according to the standards used at the time of exploration have been reported only for a few of these deposits.

In the general area of Puck Bay on the East European Precambrian Platform, potassium and magnesium sulphate horizons have been identified within the PZ1 cycle at depths greater than 1,000 m and with a thickness of several tenths of metres in several drill holes within four sub-areas with a total area of about 18 km². The deposit is considered to be horizontally layered with minimal tectonic overprint. The main potassium- and magnesium-bearing mineral is polyhalite (15.6% K₂O) with carnallite present in minor amounts. For the whole

z uwagi na zróżnicowany stopień ich zaawansowania, wiedza na temat struktury geologicznej tych złóż jest ograniczona. W wyniku wiercenia otworów badawczych napotkano złoża soli potasowych i magnezowych na głębokościach sięgających od 700 do 1800 metrów poniżej powierzchni ziemi. Wśród minerałów zawierających potas i magnez zidentyfikowano sylwin, karnalit, polihalit, a także w mniejszych ilościach kieseryt ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), kainit, heksahydrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) i langbeinit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$) (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020).

Źródła historyczne, w których zasoby soli potasowych oszacowano zgodnie z normami obowiązującymi w tamtym czasie, zostały zgłoszone tylko dla kilku złóż soli kamiennej.

W obszarze Zatoki Puckiej na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej, w ramach cyklotemu PZ1, zidentyfikowano warstwy siarczanów potasu i magnezu na głębokościach przekraczających 1000 metrów. Warstwy mają grubość kilkudziesięciu metrów i występują w kilku otworach wiertniczych, w czterech różnych podobszarach o łącznej powierzchni wynoszącej około 18 km². Złoże jest pokładowe z warstwami ułożonymi prawie poziomo, z minimalnym wpływem tektoniki. Głównym minerałem zawierającym potas i magnez jest polihalit (15,6% K_2O), natomiast karnalit występuje w mniejszych ilościach. Dla całego złoża zgłoszono historyczne zasoby wynoszące od 600 milionów ton z minimalną zawartością 7,7% K_2O do maksymalnej zawartości 13,7% K_2O (Państwowa Służba Geologiczna, 2022).

W odniesieniu do struktury solnej Kłodawa, znajdującej się w Antyklinorium Środkowopolskim, zidentyfikowano minerały soli zawierające potas i magnez w cyklotemach PZ2 i PZ3. W cyklocie PZ3 występuje karnalit zawierający kieseryt (8,5% K_2O ; 8,1% MgO), którego warstwy osiągają miąższość od 15 do 30 m. Na podstawie badań geologicznych zgłoszono historyczne zasoby wynoszące około 90 milionów ton karnalitu (Czapowski, Bukowski, 2010).

Oprócz tych bardziej intensywnie badanych złóż, działania w zakresie historycznej prospekcji i eksploracji wykazały obecność potencjalnych złóż soli potasowych na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej (np. Żelazna Góra), w Antyklinorium Środkowopolskim (np. Inowrocław, Góra, Mogilno), a także na monoklinie przedsudeckiej (np. Zielona Góra-Kożuchów, Nowa Sól-Otyń).

Dla złóż pokładowych, potencjał soli potasowych i magnezowych szacuje się na około 3,64 miliarda ton. Najbardziej znaczące zasoby soli potasowych i magnezowych odnaleziono na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej na głębokościach od 700 do 1800 m, w monoklinie przedsudeckiej na głębokościach od 900 do 1800 m oraz w niecce północnosudeckiej na głębokościach od 970 do 1800 m, na obszarze ogółem wynoszącym 466 km² (Czapowski, Bukowski, 2013). Dla różnych złóż, średnia miąższość warstw zawierających

deposit, historical resources of 600 million metric tonnes with 7.7% K_2O at minimum and 13.7% K_2O at maximum have been reported (Państwowa Służba Geologiczna, 2022).

Regarding the Kłodawa Salt Structure located in the Central Polish Anticlinorium, potassium- and magnesium-bearing salt minerals have been identified in the cycles PZ2 and PZ3. The kieserite-bearing carnallite (8.5% K_2O ; 8.1% MgO) within the PZ3 cycle may have a thickness of between 15 and 30 m. Based on geological exploration, historical resources amounting to about 90 million metric tonnes of carnallite have been reported (Czapowski, Bukowski, 2010).

Besides these more intensely explored deposits, the historical prospection and exploration efforts have identified further potential potash deposits in the East European Precambrian Platform (e.g. Żelazna Góra), the Central Polish Anticlinorium (e.g. Inowrocław, Góra, Mogilno) as well as in the the Peri Sudetic Monocline (e.g. Zielona Góra-Kożuchów, Nowa Sól-Otyń).

For deposits considered to be more or less horizontally layered and with minor tectonic overprint, the potential for potassium and magnesium salts is estimated to be in the range of 3.64 billion metric tonnes. The most significant occurrences have been found in the East European Precambrian Platform at depths between 700 and 1,800 m, in the Peri Sudetic Monocline at depths between 900 and 1,800 m and in the North Sudetic Depression at depths between 970 and 1,800 m over an area totalling 466 km² (Czapowski, Bukowski, 2013). For the different deposits, the average thickness of the potassium and magnesium salt-bearing layers ranges between 2 and 7 m, whereas the average K_2O content varies between 4 and 9%.

Taking into account the boundary conditions inferred for the solution mining of deeply buried deposits, the tectonically complex salt structures present in the Central Polish Anticlinorium are not a prime target, because there is no potential to reliably extrapolate thickness and mineral grade a distance away from a drill hole intersecting the deposit. Within these structures, there is a high risk that it will not be possible to access an adequate volume of the deposit via a cavern drill hole to produce enough production brine with sufficient K-content for an overall economically viable operation. In this respect, the best options to define a deposit suitable for solution mining occur in areas where the deposits are considered to be more or less horizontally layered and with minor tectonic overprint as present in the East European Precambrian Platform, the Peri Sudetic Monocline and the North Sudetic Depression. The polyhalite-dominated deposit that has been defined in Puck Bay and all other polyhalite-dominated deposits are not suitable for solution mining. Taking into account the reported average K_2O contents of between 4% and 9%, the best options for solution mining in these areas are probably present where carnallite is the main potassium- and

sole potasu i magnezu wynosi od 2 do 7 m, podczas gdy średnia zawartość K_2O waha się od 4 do 9%.

Biorąc pod uwagę ograniczenia wynikające z wydobywania otworowego głęboko zalegających złóż, skomplikowane struktury solne w Antyklinorium Środkowopolskim nie stanowią głównego obiektu zainteresowania, ze względu na brak możliwości wiarygodnej ekstrapolacji wartości miąższości i zawartości minerałów w odległości od otworu wiertniczego, przecinającego dane złoża. W obrębie skomplikowanych struktur solnych, istnieje ryzyko, że nie będzie możliwe uzyskanie dostępu do wystarczającej objętości złoża za pomocą otworu wiertniczego. Stanowi to problem, ponieważ aby operacja była opłacalna, potrzebna jest określona ilość solanki produkcyjnej zawierająca dostateczną ilość potasu. W kontekście poszukiwań złóż odpowiednich do wydobywania otworowego, najlepsze warunki występują w obszarach, gdzie występują złoża pokładowe z warstwami soli zalegającymi poziomo, niezaangażowane tektonicznie, na przykład takie jak na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej, w monoklinie przedsudeckiej oraz w niecce północnosudeckiej. Złoża zdominowane przez polihalit, takie jak to w Zatoce Puckiej, oraz inne złoża o podobnym składzie mineralnym, nie nadają się do wydobywania otworowego. Jeśli jednak uwzględnimy średnie zawartości K_2O między 4% a 9%, to najlepsze opcje do rozważenia pojawiają się tam, gdzie głównym minerałem zawierającym potas i magnez jest karnalit. Bez dokładnego przeanalizowania wszystkich dostępnych danych nie można jednak wykluczyć, że istnieją również złoża z dominacją sylwinu, które też mogą nadawać się do wydobywania otworowego.

magnesium-bearing mineral of the deposit. Without having reviewed all available data in detail, however, it cannot be ruled out that sylvite-dominated deposits suitable for solution mining can also be defined.

LITERATURA/ REFERENCES

- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2010. Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art. *Geological Quarterly*, 2010, 54 (4): 509–518.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2013. Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowych w Polsce a perspektywy jego wykorzystania. *Górnictwo Odkrywkowe*, 54 (2): 74 – 84.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020. Sól kamienna (rock salt, salt, halites) i sole potasowo-magnezowe (potash salts, potassium salts, potassium-magnesium salts). W: Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.12.2018 r. (red. Szamałek K., Szufflicki M., Mizerski W.): 218–232. PIG-PIB, Warszawa.
- PAŃSTWOWA SŁUŻBA GEOLOGICZNA, 2022. BILANS ZASOBÓW ZŁÓŻ KOPALIN W POLSCE wg stanu na 31 XII 2021 r. PIG-PIB, Warszawa.