# Zapobieganie szkodliwym skutkom wydobycia soli kamiennej i soli potasowych poprzez zastosowanie badań geologicznych i techniki modelowania złóż, wraz z wykorzystaniem analizy geomechanicznej i wyników modelowania do planowania działalności górniczej

## Prevention of Hazardous Impact from Rock Salt and Potash Mining by Application of Geological Exploration and Deposit Modelling Followed by Application of Geotechnical Analysis and Modelling Results for Mine Planning

Thomas KIEßLING<sup>1</sup>, Andreas JOCKEL<sup>1</sup>, Sebastiaan N. G. C. VAN DER KLAUW<sup>1</sup>, Till POPP<sup>2</sup>, Ralf-Michael GÜNTHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, e-mail: mining@ercosplan.com
<sup>2</sup> Institut f
ür Gebirgsmechanik GmbH; e-mail: office@ifg-leipzig.de

### STRESZCZENIE

Większość rentownych złóż soli kamiennej i soli potasowych w Polsce osadziła się w okresie cechsztynu (późny perm, ok. 255 mln lat temu). Osady solonośne sedymentowały w europejskim basenie permskim, który rozciąga się na obszarze ok. 700 000 km<sup>2</sup> w północnej części Europy Środkowej, od wschodniej Anglii na zachodzie po Litwę na wschodzie. Osady solne są w Polsce podzielone na cztery cyklotemy (PZ1 do PZ4), przy czym skały solne dominują w cyklotemach dolnym i środkowym. Cyklotemy od Z5 do Z7 zidentyfikowane w Niemczech są uważane za pododdziały górnego cyklotemu PZ4 w Polsce. W północnej i środkowej Polsce (do około 60% powierzchni kraju) skały solne tych cyklotemów mogą osiągać grubość do 1400 m. Rentowne złoża soli potasowych i magnezowych, takie jak sylwin, karnalit i polihalit, występują w dolnych trzech cyklach (PZ1 do PZ3).

Ponadto sekwencje soli kamiennej o grubości do 300 m osadzały się w zapadlisku przedkarpackim w południowej Polsce w okresie miocenu. Te mioceńskie sole kamienne, które lokalnie wystepowały płytko pod powierzchnią ziemi, stanowiły podstawę wydobycia soli kamiennej przez wiele lat.

### Abstract

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 km<sup>2</sup> 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, carnallitite and polyhalitite have been reported in the lower 3 cycles (PZ1 to PZ3).

In addition, up to 300 m thick rock salt sequences were deposited within the Carpathian Foredeep Depression in southern Poland during the Miocene. These Miocene rock salts, which are locally deposited close to the earth's surface, W Polsce, większość złóż pokładowych z poziomo zalegającymi warstwami soli o minimalnym lub umiarkowanym wpływie tektoniki, występuje na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej na północnym wschodzie oraz monoklinie przedsudeckiej i niecki północnosudeckiej na południowym zachodzie basenu cechsztyńskiego. W centralnej części basenu cechsztyńskiego, w rejonie antyklinorium środkowopolskiego o kierunku NW-SE, oraz w towarzyszących mu synklinach, sól występuje w strukturach solnych poddanych wpływom tektonicznym. Struktury solne wykorzystywane są do wydobycia soli kamiennej (np. kopalnia Kłodawa) lub do magazynowania węglowodorów (np. Mogilno).

W trakcie prac poszukiwawczych przeprowadzonych w drugiej połowie XX w. odkryto nie tylko złoża soli kamiennej, ale także złoża soli potasowych i magnezowych. Złoża te z różną intensywnością były dalej eksplorowane. Wiedza na temat ogólnej struktury geologicznej tych złóż jest jednak minimalna. Otwory poszukiwawcze przecinały sole potasowe i magnezowe na głębokościach od 700 do 1800 m. Sylwin, karnalit, polihalit i również niewielkie ilości kizerytu (MgSO- $_4$ ·H<sub>2</sub>O), kainitu, heksahydrytu (MgSO $_4$ ·6H<sub>2</sub>O) i langbainitu (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·2MgSO<sub>4</sub>) zostały zidentyfikowane jako minerały zawierające potas i magnez (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020). Źródła historyczne, oszacowane zgodnie ze standardami stosowanymi w czasie eksploracji, 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 km<sup>2</sup>. Złoże jest pokładowe z warstwami ułożonymi prawe poziomo, z minimalnym wpływem tektoniki. Głównym minerałem zawierającym potas i magnez jest polihalit (15,6% K<sub>2</sub>O) z karnalitem obecnym w niewielkich ilościach. Dla całego złoża zgłoszono źródła historyczne wynoszące od 600 milionów ton z minimalną zawartością 7,7% K2O do maksymalnej zawartości 13,7% K<sub>2</sub>O (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. Karnalit zawierający kieseryt (8,5% K<sub>2</sub>O; 8,1% MgO) w cyklu PZ3 może mieć grubość od 15 do 30 m. Na podstawie badań geologicznych zgłoszono źródła historyczne wynoszące około 90 milionów ton karnalitu (Czapowski, Bukowski, 2010).

Oprócz tych intensywniej eksplorowanych złóż, w ramach poszukiwań historycznych zidentyfikowano dalsze potencjalne złoża soli potasowych na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej (np. Żelazna Góra), w Antyklinorium Środformed the basis of rock salt mining, which was active over a long period of time.

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. Salt structures are used for rock salt mining (e.g. Kłodawa Mine) or for hydrocarbon storage (e.g. Mogilno).

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 (MgSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O), kainite, hexahydrite (MgSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O) and langbeinite (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·2MgSO<sub>4</sub>) 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 km<sup>2</sup>. The deposit is considered to be horizon-tally layered with minimal tectonic overprint. The main potassium- and magnesium-bearing mineral is polyhalite (15.6%  $K_2O$ ) with carnallite present in minor amounts. For the whole 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 carnallitite (8.5% K<sub>2</sub>O; 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 carnallitite 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 Anticlinokowopolskim (np. Inowrocław, Góra, Mogilno), a także na monoklinie przedsudeckiej (np. Zielona Góra-Kożuchów, Nowa Sól-Otyń).

Dla złóż pokładowych z poziomo zalegającymi warstwami soli o minimalnym lub umiarkowanym wpływie tektoniki, 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 sole potasu i magnezu wynosi od 2 do 7 m, podczas gdy średnia zawartość K<sub>2</sub>O waha się od 4 do 9%.

Podczas gdy istnieje obszerna wiedza na temat konwencjonalnego wydobycia podziemnego i wydobycia otworowego soli kamiennej, złoża potasowo-magnezowe nie były dotąd eksplorowane ani wykorzystywane do celów górniczych. Dlatego też zaleca się korzystanie z doświadczenia w eksploatacji i przetwarzaniu podobnych złóż znajdujących się w sąsiednich Niemczech.

Jak w przypadku każdego innego rodzaju złoża, najważniejszymi czynnikami umożliwiającymi bezpieczną, ekonomiczną i, co nie mniej ważne, zrównoważoną eksploatację złoża są:

- sytuacja geologiczna i hydrogeologiczna złóż i otaczających je formacji skalnych (sekwencja litostratygraficzna, warunki depozycji, mineralizacja, klasyfikacja hydrogeologiczna i strukturalno-geologiczna warstw),
- fizyczne i mechaniczne właściwości poszczególnych horyzontów skalnych (skały horyzontu górniczego, skały hydrogeologicznych barier w ściance wiszącej i ściance horyzontu wydobywczego, skały leżącego nad nimi masywu skalnego),
- różnice w gradientach temperatury w różnych lokalizacjach, stany naprężenia, dynamika wód gruntowych itp.,
- ramy polityczne i prawne: np. przepisy górnicze, BHP, Ochrona środowiska i ochrona przyrody, przepisy dotyczące podatków, opłat i ceł, ale także stabilność systemów politycznych, akceptacja społeczna czy czynniki logistyczne, takie jak np. dostępność szlaków energetycznych, wodnych i transportowych.

Oprócz tych czynników, które dotyczą wszystkich złóż, należy uwzględnić konkretne czynniki dotyczące złóż soli kamiennej, a zwłaszcza złóż soli potasowych i magnezowych. Do tych czynników należą wysoka rozpuszczalność soli, specyficzne właściwości mechaniczne i reologiczne soli potasowych i magnezowych, wybór metody przeróbki, na którą duży wpływ ma forma wydobywanej soli (stała kontra ciekła), oraz zarządzanie płynnymi i stałymi odpadami, które gromadzą się podczas przetwarzania (Rauche, 2015). rium (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 km<sup>2</sup> (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<sub>2</sub>O content varies between 4 and 9%.

While extensive experience is available for the conventional underground mining and solution mining of rock salt, the existing potassium-magnesium deposits have not been developed or used for mining, so that it is advisable to fall back on experience in the extraction and processing of the fundamentally comparable deposits in neighbouring Germany.

Like for any other type of deposit, the most important factors that enable safe, economical and, last but not least, sustainable exploitation of a deposit are:

- the geological and hydrogeological situation of the deposits and the rock formations surrounding the deposits (lithostratigraphic sequence, depositional conditions, mineralisation, hydrogeological and structural-geological classification of the strata),
- physical and rock mechanical properties of the relevant rock horizons (rocks of the mining horizon, rocks of the hydrogeological barriers in the hanging wall and footwall of the extraction horizon, rocks of the overlying rock mass),
- the locally differing temperature gradients, stress states, groundwater dynamics, etc.,
- political and legal framework: e.g. mining regulations, health and work safety, envi-ronmental protection and nature conservation, regulations on taxes, levies and customs duties, but also the stability of the political systems, social acceptance or logistical factors, such as e.g. the availability of energy, water and transport routes.

In addition to these factors, which apply to all deposits, specific factors must be taken into account for rock salt deposits and, in particular for potassium-magnesium salt deposits. These include the high water solubility of the salt rocks, the specific rock mechanical and rheological behaviour of the potassium-magnesium salts, the selection of the processing method, which is strongly influenced by the form of the extracted salt (solid vs liquid), and the management of the liquid and solid residues that accrue during processing (Rauche, 2015).

W związku z kosztami i stratami górniczymi, jakich należy się spodziewać w przypadku konwencjonalnego górnictwa podziemnego, może powstać domniemanie, że wiele złóż potasowych jest predystynowanych do wydobywania techniką otworową, między innymi ze względu na korzystniejsze warunki rozpuszczania w głębokościach większych niż 800 m i związane z tym temperatury in situ wynoszące około 40 do 60°C. Jednakże, aby przeprowadzić precyzyjną ocenę wykonalności i ekonomicznej opłacalności procesu wydobycia, nie jest uzasadnione podejmowanie szybkich decyzji opierających się na odosobnionych czynnikach, takich jak głębokość złoża czy początkowe inwestycje kapitałowe (CAPEX).

Zamiast tego zaleca się przeprowadzenie kompleksowej oceny opartej na wpływie wszystkich czynników i dziedzin specjalistycznych, zwykle również opartej na badaniach materiałowych. Podczas gdy społeczno-ekonomiczne warunki można określić i opisać bez dodatkowych badań technicznych, określenie hydrogeologicznych warunków i właściwości materiałowych skał wiąże się z dużym wysiłkiem, który przynosi pozytywne rezultaty tylko wtedy, gdy prowadzona jest ukierunkowana na cel i profesjonalna eksploracja złoża.

Zważywszy na założenia wynikające z lub oparte na regionalnych badaniach geologicznych, konieczne jest ustalenie odpowiedniego programu rozpoznawania dostosowanego do charakterystyki złoża. Zgodnie z typowymi procedurami międzynarodowymi jest to realizowane głównie poprzez etapowe badanie złoża, przy czym badania powinny odpowiadać wymaganiom norm międzynarodowych (np. NI 43-101<sup>1</sup>, Kod JORC<sup>2</sup>, Kod PERC<sup>3</sup>):

CSA (2016): Krajowy Instrument 43-101. Standardy Ujawniania Projektów Mineralnych. Kanadyjscy Administratorzy Papierów Wartościowych (CSA). Wprowadzenie w życie 9 maja 2016 roku.

CSA (2011): Formularz 43-101F1 Raport Techniczny. Kanadyjscy Administratorzy Papierów Wartościowych (CSA). Wprowadzenie w życie 30 czerwca 2011 roku.

CSA (2016): Polityka Towarzysząca 43-101CP do Krajowego Instrumentu 43-101. Standardy Ujawniania Projektów Mineralnych. Kanadyjscy Administratorzy Papierów Wartościowych (CSA). Wprowadzenie w życie 9 maja 2016 roku. In connection with the costs and mining losses to be expected for conventional underground mining, the presumption may arise that many potash deposits are predestined for solution mining, not least because of the more favourable dissolution conditions at depths greater than 800 m and the associated in situ temperatures of approx. 40 to 60°C. However, in order to comprehensively assess the feasibility and economic viability of extraction, hasty decisions regarding the extraction method made by considering isolated assessment factors (e.g. depth, initial CAPEX) are not expedient.

Instead, a comprehensive assessment based on the influence of all factors and specialist disciplines, which is usually also based on material investigations, is recommended. While socio-economic framework conditions can generally be determined and described without additional technical investigations, the determination of the geological-hydrogeological framework conditions and the material properties of the rocks is associated with a considerable effort, which only leads to success if there is a target-oriented and professional exploration of the deposit.

Taking into consideration the assumptions to be expected or based on regional geological conclusions, an exploration programme adapted to the formation of the deposit must be determined. In accordance with typical international procedures, this is mostly realised by a phased exploration of the deposit, whereby the investigations should correspond to the requirements of international standards (e.g. NI 43-101<sup>1</sup>, JORC Code<sup>2</sup>, PERC Code<sup>3</sup>):

- prospecting (usually already carried out as part of a comprehensive, state-initiated country-wide survey),
- preliminary exploration (by concentrating the exploration measures in a potentially promising area),
- detailed exploration (focusing of suitable exploration measures on a pre-selected part of the deposit,
- underground exploration during mining.

In general, during all phases of exploration, the use of drill holes combined with borehole geophysical methods and/or geophysical surface investigations (gravimetry, geoelectrics, 2D and 3D seismic) is possible (Rauche, 2015). The knowledge gained in each case must be evaluated with regard to fur-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> CSA (2016): National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

CSA (2011): Form 43-101F1 Technical Report. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 30 June 2011.

CSA (2016): Companion Policy 43-101CP to National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> JORC (2012): Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves – The JORC Code 2012 Edition.- The Joint Ore Reserves Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy and the Australian Institute of Geoscientists and the Minerals Council of Australia. 20 December 2012.

JORC (2012): Kodeks Wykazywania Wyników Prac Geologicznych i Zasobów Złóż Rud Metali Australii i Oceanii– Kodeks JORC, wydanie 2012. -Wspólny Komitet Rezerw Złoża Kopalni Instytutu Górnictwa i Hutnictwa Australii i Oceanii, Australijski Instytut Specjalistów z Dziedziny Nauk o Ziemi, Rada Surowców Mineralnych [kopalin stałych] Australii. 20 grudnia 2012 roku

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> PERC (2015): Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> CSA (2016): National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

CSA (2011): Form 43-101F1 Technical Report. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 30 June 2011.

CSA (2016): Companion Policy 43-101CP to National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> JORC (2012): Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves – The JORC Code 2012 Edition.- The Joint Ore Reserves Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy and the Australian Institute of Geoscientists and the Minerals Council of Australia. 20 December 2012.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> PERC (2015): Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC)

- poszukiwania (zwykle przeprowadzane już w ramach kompleksowego, zainicjowanego przez państwo badania ogólnokrajowego),
- wstępne rozpoznanie (poprzez skoncentrowanie działań poszukiwawczych na potencjalnie obiecującym obszarze),
- szczegółowe rozpoznanie (skupienie odpowiednich działań rozpoznawczych na wcześniej wybranej części złoża),
- eksploracja podziemna podczas wydobycia.

Ogólnie rzecz biorąc, w trakcie procesu rozpoznania możliwe jest wykorzystanie odwiertów oraz różnych technik geofizycznych, zarówno w odwiertach jak i badaniach powierzchniowych, takich jak grawimetria, geoelektryka oraz sejsmika 2D i 3D, na wszystkich etapach eksploracji (Rauche, 2015). Wiedza zdobyta w każdym przypadku musi być oceniana pod kątem dalszego rozwoju projektu i, jeśli to konieczne, brana pod uwagę przy planowaniu dalszych działań rozpoznawczych.

W celu uzyskania odpowiednich tj. w dużej mierze nienaruszonych próbek do niezbędnych badań materiałowych, w złożu zwykle wierci się otwory. Podczas pobierania próbek rdzeni wiertniczych, należy uwzględnić warunki dotyczące przeprowadzanych badań. Należą do nich analizy chemiczno--mineralogiczne, które najlepiej jest wykonywać za pośrednictwem odpowiednio doświadczonych i akredytowanych instytucji, badania laboratoryjne mające na celu określenie właściwości fizycznych i mechanicznych skał oraz specjalne testy rozpuszczania, które pozwalają sprawdzić możliwość wydobycia metodą ługowania. Dodatkowo przeprowadza się testy dotyczące przetwarzania soli. Ze względu na wysoką rozpuszczalność soli potasowych w roztworach wodnych, należy przywiązywać dużą wagę do zapewnienia wystarczającego nasycenia stosowanej płuczki wiertniczej. Stosunkowo niska wytrzymałość skał solnych wymaga użycia odpowiedniego sprzętu i metod wiercenia. Aby chronić wody gruntowe i osady soli, w otwory wiertnicze należy włożyć osłonę/ ochronę i ją zacementować. Nawet jeśli wokół wywierconych otworów pozostanie strefa bez wydobycia, to w przypadku późniejszego tradycyjnego wydobycia podziemnego, będą one zabezpieczone i odpowiednio uszczelnione.

Sama interpretacja wyników badań geologicznych nie jest wystarczająca do dalszego planowania wydobycia. Oprócz tego, na podstawie modelu stratygraficznego złoża i parametrów geofizycznych określonych przy użyciu próbek ze złoża należy wyprowadzić następujące elementy:

- model geologiczno-hydrogeologiczny barier / warstw ochronnych w ścianie wiszącej i ściance złoża,
- opracowanie parametrów wydobycia podziemnego, w tym wybór odpowiedniej metody wydobycia,
- model mechanicznych właściwości skał do obliczeniowego potwierdzenia integralności warstw ochronnych,

ther project development and, if necessary, taken into account when planning further exploration measures.

In order to obtain adequate, i.e. largely intact samples for the necessary material investigations, drill holes are usually drilled into the deposit. When extracting drill cores, the requirements of the investigations to be carried out, such as chemical-mineralogical analyses, preferably by appropriately experienced and accredited institutions, laboratory investigations to determine physical and rock mechanical properties, special dissolution tests to check the possibility of solution mining as well as tests for the processing of the salt need to be taken into account. Due to the high solubility of potash salts in aqueous solutions/suspensions, great importance must be attached to ensuring sufficient saturation of the drilling fluid used. The comparatively low strength of salt rocks requires the use of suitable equipment and drilling methods. To protect the groundwater and the salt deposits, casing needs to be inserted into the drill holes and cemented. Even if a no-extraction zone is left around the drill holes, at least in the case of subsequent conventional underground mining of the deposit, they must always be documented and properly sealed.

A mere interpretation of the geological exploration results is not sufficient for further ex-traction planning. Instead, the following should be derived based on a stratigraphic model of the deposit and on the geophysical parameters determined using samples from the deposit:

- a geological and hydrogeological model of the barriers/ protective layers in the hanging wall and footwall of the deposit,
- a dimensioning of the underground mining parameters, including the selection of an appropriate extraction method,
- a rock mechanical model for the computational proof of the integrity of the protective layers,
- a subsidence forecast, for the operational and post-operational phase.

This is for the protection of:

- Employees from a rock fall or major failure events or even a rock burst,
- Aquifers from serious damage or even unfitness for use or pollution,
- the earth's surface and its inhabitants against impermissible subsidence or shocks in the form of seismic events or rock bursts,
- the deposit from a failure of the protective layers and the associated inflow of gas or brines into the deposit, as well as from the resulting restrictions on mining or even the abandonment of the deposit.

Since the beginning of potash mining, there have been signs of failure from pillars or even rock bursts or seismic events due to the incorrect dimensioning of the underground mining parameters or insufficient knowledge of the geophysical properties (John, Schicht, 2022; Gimm, Pforr, 1961;

PERC (2015): Kodeks Raportowania Wyników Poszukiwań, Zasobów Mineralnych i Złóż Rudy. Paneuropejski Kodeks Rezerw i Zasobów (PERC).

 prognoza osiadania się terenu, na etapie operacyjnym i pooperacyjnym.

Podejmuje się te działania w celu zapewnienia odpowiedniego zabezpieczenia:

- pracowników przed obrywem skał, poważnymi awariami lub nawet wybuchem,
- warstw wodonośnych przed poważnymi uszkodzeniami, zanieczyszczeniem lub nawet niezdolnością do użytkowania,
- powierzchni ziemi i jej mieszkańców przed niepożądanym osiadaniem się, lub wstrząsami w postaci zdarzeń sejsmicznych, lub wybuchów skalnych,
- złoża przed awarią warstw ochronnych i związanym z nią wnikaniem gazu lub solanek do złoża, a także przed wynikającymi z tego ograniczeniami wydobycia lub nawet zakończeniem eksploatacji złoża.

Od początku wydobycia soli potasowych obserwowane były problemy z filarami, a nawet wybuchy skalne lub zdarzenia sejsmiczne, wynikające z niewłaściwego określenia parametrów wydobycia podziemnego oraz braku wystarczającej wiedzy na temat właściwości geomechanicznych (John, Schicht, 2022; Gimm, Pforr, 1961; Ahorner, 1989; Minkley, 1998; Malovichko et al., 1999; Malovichko et al., 2001). Oprócz nieodwracalnego uszkodzenia złoża i zagrożenia dla pracowników i ludności zamieszkującej w okolicy eksploatowanego złoża, warstwy ochronne mogą być również narażone na nadmierne naprężenia z powodu awarii lub nadmiernego osiadania na podstawie niewłaściwego wymiarowania, co może prowadzić do napływu wody lub solanki do złoża, co z kolei może prowadzić do całkowitego zakończenia działalności górniczej. Niektóre spektakularne przypadki powodzi kopalni miały miejsce w Niemczech (Bergmannsverein "Staßfurt, Wiege des Kalibergbaus"e. V., 2002), Kanada (Minkley, 2004) lub górna Kama (Rosja); (Van Sambeek, 2000; ERCOSPLAN, 2007).

Wbrew założeniu, że zjawiska sejsmiczne lub awarie wyrobisk górniczych, a nawet zapadliska, są zwykle związane z przekroczeniem granic wymiarowania tradycyjnych kopalni podziemnych, istnieją przypadki awarii związanych z zapadliskami nad kawernami wydobywczymi, które sięgają nawet głębokości 1000 m (Monaghan, 2014; Minkley, Lüdeling, 2020). Tych sytuacji można było uniknąć, stosując odpowiednie planowanie i wymiarowanie.

Cechą szczególną skał solnych, którą należy wziąć pod uwagę podczas określania parametrów geofizycznych, jest ich nieliniowe zachowanie wytrzymałościowe i wytrzymałość resztkowa, przy czym wytrzymałość zależy w dużej mierze od minimalnego naprężenia głównego, prędkości odkształcenia i temperatury.

Ponadto ważnym punktem jest pojawienie się mikropęknięć, którym towarzyszy wzrost przepuszczalności. Rozwój mikropęknięć mierzy się wzrostem objętości (dylatacja), któAhorner, 1989; Minkley, 1998; Malovichko et al., 1999; Malovichko et al., 2001). In addition to the irreparable damage to the deposit and the danger to the employees and the inhabitants on the surface, the protective layers can also be subjected to excessive stress due to failure or excessive subsidence based on incorrect dimensioning, which can lead to water or brine inflow into the deposit, which can in turn lead to the complete loss of the mining operation. Some spectacular cases of mine flooding have occurred in Germany (Bergmannsverein "Staßfurt, Wiege des Kalibergbaus" e. V., 2002), Canada (Minkley, 2004) or the Upper Kama (Russia) (Van Sambeek, 2000; ERCOSPLAN, 2007).

Contrary to the assumption that seismic events or failure phenomena of mining cavities or even sinkholes are a phenomenon of exceeding the dimensioning limits of conventional underground mining, there are prominent examples of failure cases with sinkholes above solution mining caverns that are at up to 1,000 m depths (Monaghan, 2014; Minkley, Lüdeling, 2020), which could have been prevented with sound planning and dimensioning.

A special feature of the salt rocks that must be taken into account when determining the geophysical parameters: they have a non-linear strength and residual strength behaviour, in which the strength depends heavily on the minimum principal stress, the strain rate and the temperature.

In addition, an important point is the appearance of microcracks, which are accompanied by an increase in permeability. The development of microcracks is measured by an increase in volume (dilatancy), which occurs well before the maximum strength is reached.

These characteristics are examined in a suitable testing facility in a deformation-controlled triaxial compression test (TCC test). This is done at a high, constant strain rate until the residual strength is reached, which typically occurs with axial deformations of around 20% at different confining pressures.

The test temperature must be adjusted to the in-situ temperature, e.g.  $T = 50^{\circ}$ C. However, if a hot solution mining is desired, the test can also be carried out with a  $T_{brine}$  of 80°C. A typical test series consists of approx. 7 tests between 0.2 MPa and 20 MPa confining pressure.

The focus here is on the low confining pressures, since the strength is lowest and the dilatancy sets in early under such conditions. The strength and dilatancy parameters required for the material models for describing the changes in the rock mechanical behaviour can be obtained from the test curves.

The so-called steady-state creep is required for the timedependent deformations.

Creep can be divided into 3 phases, which must be taken into account when designing the test (presented below).

1. Primary creep, which is irrelevant in solution mining and only plays a role in conventional underground mining-in-

ry następuje na długo przed osiągnięciem maksymalnej wytrzymałości.

Te cechy są badane w laboratorium w teście trójosiowego ściskanie z kontrolowanym przyrostem odkształceń (test TCC). Odbywa się on z wysoką, stałą szybkością odkształcania, aż do osiągnięcia wytrzymałości resztkowej, która zwykle występuje przy odkształceniach osiowych wynoszących około 20% przy różnych ciśnieniach otaczających.

Przyjmuje się, że temperatura testu musi być dostosowana do temperatury in situ, na przykład T = 50°C. Jednakże, jeśli pożądane jest gorące wydobycie solanki, test można również przeprowadzić przy temperaturze  $T_{brine}$  wynoszącej 80°C. Typowa seria testowa składa się z około 7 testów przy ciśnieniu okólnym wynoszącym od 0,2 MPa do 20 MPa.

Główny nacisk kładzie się tu na niskie ciśnienie okólnym, ponieważ wytrzymałość jest najniższa, a w takich warunkach dylatacja zaczyna się wcześnie. Parametry wytrzymałości i dylatacji wymagane do opisania zmian w mechanicznej charakterystyce skał można uzyskać na podstawie krzywych testowych.

Do odkształceń zależnych od czasu wymagane jest tak zwane pełzanie w stanie ustalonym.

Pełzanie można podzielić na trzy fazy, które należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu testu (fazy poniżej).

- Pełzanie pierwotne, które nie ma znaczenia w wydobyciu otworowym i odgrywa rolę tylko w przypadku gwałtownych zmian naprężenia wywołanych tradycyjnym wydobyciem podziemnym (np. filarowo-komorowym systemie eksploatacji).
- Druga faza pełzania, zwana również pełzaniem ustalonym, jest istotna dla wszystkich długotrwałych procesów deformacji, takich jak konwergencja kawern czy zapadliska pod ziemią i na powierzchni.
- Pełzanie trzeciorzędowe, nazywane także pełzaniem progresywnym, opisuje związek między dylatacją a uszkodzeniem, np. filarów.

Dla pełnego określenia parametrów konieczne jest przeprowadzenie około 6-10 testów TCC przy różnicy naprężeń między 4 a 20 MPa. Pomiar najlepiej przeprowadza się przy użyciu technologii wieloetapowej, aby zwiększyć liczbę wyników testów przy tej samej liczbie próbek testowych. Zwiększając liczbę wyników, możliwe staje się dokładniejsze formułowanie stwierdzeń, ponieważ testy pełzania zazwyczaj zawsze wykazują rozbieżność wyników (Karimi-Jafari et al., 2008).

Ponieważ pełzanie w stanie ustalonym jest silnie zależne od temperatury, zazwyczaj określa się także energię aktywacji. W tym celu zmianę temperatury przeprowadza się przy stałym obciążeniu po okresie testowym wynoszącym około 60 dni. Energię aktywacji można uzyskać z oceny szybkości pełzania w 2 różnych temperaturach (Salzer i in., 2015). duced rapid stress shifts (e.g. extraction faces in room & pillar mining).

- Secondary creep, also called stationary creep, is relevant for all long-term deformation processes, e.g. cavity convergence or underground subsidence and subsidence at the surface.
- Tertiary creep, also called creep rupture, for describing the connection between dilatancy and the failure of e.g. pillars.

Approx. 6-10 TCC tests at differential stresses between 4 and 20 MPa are required for a complete parameter determination. The measurement is ideally carried out using multistage technology in order to increase the number of test results with the same number of test specimens. With an increasing number of results, more accurate statements are possible, since creep tests usually always show a scatter (Karimi-Jafari et al., 2008).

Since steady-state creep is also strongly temperature-dependent, the activation energy is usually also determined. For this purpose, a temperature change is carried out at a constant load after a test period of around 60 days. The activation energy can be derived from the evaluation of the creep rates at the 2 different temperatures (Salzer et al., 2015).

The geophysical parameters determined in this way are used to set up a mine dimensioning, and subsequently a rock mechanical model. It should be noted that the subsequent rock mechanical modelling requires numerical models that are able to reproduce the specific characteristics of potash salt. In the past decades, highly abstract, manually adjusted 2D models have been used for this purpose. Even if these enable a 3D representation, the results may quickly be overestimated, which can lead to misinterpretations.

In Germany, integrated 3D numerical models that are based on a realistic prediction of the deformation and stress development and the associated assessment of the stress redistribution, stress on the pillar and hanging wall barriers, seismic events and surface subsidence, have been developed over the past 15 years. The basic prerequisite for this is that the material model used for the geomechanical analysis appropriately depicts the phenomena of creep, dilatancy, damage, fracture and post-fracture behaviour and takes them into account in a closed approach. At the same time, for example, rock salt and carnallitite differ in terms of in-situ deformation behaviour in that rock salt exhibits plastic behaviour at high levels of restraint, while carnallitite tends towards brittle fracture. The state-of-the-art material approaches used at Institut für Gebirgsmechanik meet these complex requirements in a unique way (Günther et al., 2015; Günther, 2009).

With the help of the procedure explained, it is possible to plan a safe and sustainable extraction of potash and salt deposits using modern planning methods that are based on experience from more than 170 years of potash mining and Określone w ten sposób parametry geomechaniczne są wykorzystywane do ustalenia wymiarowania kopalni, a następnie modelu mechanicznego skały. Należy zauważyć, że późniejsze modelowanie mechaniczne skał wymaga użycia modeli numerycznych zdolnych do odtworzenia specyficznych cech soli potasowych. W ostatnich dziesięcioleciach wykorzystywano do tego celu wysoce abstrakcyjne, ręcznie dostosowywane modele 2D. Nawet jeśli umożliwiają one prezentację 3D, wyniki mogą zostać szybko przeszacowane, co może prowadzić do błędnych interpretacji.

W Niemczech, w ciągu ostatnich 15 lat, opracowano kompleksowe modele numeryczne 3D. Modele te opierają się na realistycznych prognozach dotyczących odkształceń i rozwoju naprężeń. Obejmują również oceny przekształcenia naprężeń. Dodatkowo uwzględniają naprężenia występujące na filarach oraz bariery w stropie, ponadto analizują zjawiska sejsmiczne i osiadanie powierzchni. Podstawowym warunkiem jest, aby model używany do analizy geomechanicznej odpowiednio odwzorowywał zjawiska pełzania, dylatacji, uszkodzeń oraz pękania. Model ten powinien także uwzględniać zachowanie materiału po wystąpieniu uszkodzeń i integrować te elementy w zamkniętym podejściu. Na przykład, porównując sól kamienną i karnalit, wykazują one różne zachowanie deformacyjne w miejscu występowania. Sól kamienna ma tendencję do wykazywania plastycznego zachowania pod wysokim naprężeniem, podczas gdy karnalit skłania się ku kruchemu pękaniu. Zastosowane podejścia materiałowe w Instytucie Mechaniki Górskiej zostały zaprojektowane w sposób unikalny, aby sprostać tym skomplikowanym wymaganiom (Günther et al., 2015; Günther, 2009).

Dzięki opisanej procedurze można zaplanować bezpieczne i zrównoważone wydobycie złóż soli i soli potasowych przy użyciu nowoczesnych metod planowania, które opierają się na doświadczeniach zdobytych przez ponad 170 lat wydobycia soli potasowych i ponad 500 lat wydobycia soli kamiennej w Niemczech (Rauche, 2015). Planowanie skoncentrowane na celach, uwzględniające geologiczne i geomechaniczne cechy złóż soli potasowych, jest zalecane niezależnie od wybranej metody wydobycia. Aby ustalić optymalne parametry wydobycia złoża, konieczne jest takie wszechstronne podejście, które uwzględnia wymiarowanie filarów oraz modelowanie mechaniczne skał. To jest niezbędne zarówno w przypadku tradycyjnych metod górnictwa, jak i przy wydobyciu za pomocą kawern w metodzie otworowej. more than 500 years of rock salt mining in Germany (Rauche, 2015). Such target-oriented planning, taking into account the geological and geotechnical characteristics of potash deposits, is recommended regardless of the choice of extraction method, since pillar dimensioning and rock mechanical modelling are also required for solution mining caverns to determine the optimal extraction parameters of the deposit.

#### LITERATURA/REFERENCE

AHORNER L., 1991. Entstehung und Ablauf des Gebirgsschlages bei Völkershausen am 13. März 1989 aus seismologischer Sicht. Kali '91 - Second International Potash Technology Conference. Hamburg, 26 – 29 May 1991. BERGMANNSVEREIN "STAßFURT, WIEGE DES KALIVERG-BAUS" E.V., 2002. Geschichte des Staßfurter Salzbergbaus und der Staßfurter Kaliindustrie in der Zeit von 1952 – 2002.

- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2010. Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art. *Geological Quarterly* 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., Szuflicki M., Mizerski W.): 218–232. PIG-PIB, Warszawa.
- ERCOSPLAN, 2007. Expert statement on the environmental impact of flooding Mine BKPRU-1. In: LSE (ed.): Prospectus Initial Public Offering (IPO) JSC URALKALI. London Stock Exchange Group, Alternative Investment Market, Exhibit B, Executive Summary, English Version 12-18, London, 12 October 2007.
- GIMM W., PFORR H., 1961. Gebirgsschläge im Kalibergbau unter Berücksichtigung von Erfahrungen des Kohle und Erzbergbaus. FFH Freiberger Forschungshefte, A 173, Akademie Verlag Berlin, 1961.
- GÜNTHER R.-M., 2009. Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz - Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens (Dissertation). TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- GÜNTHER R.-M., SALZER K., POPP T., LÜDELING C. (2015). Steady state-creep of rock salt – Improved Approaches for Lab Determination and Modelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48 (6): 2603-2613.
- JOHN S., SCHICHT T., 2022. Kombinierte VSP- und Oberflächenhybridseismik zur Salzhangerkundung am Fallbeispiel von zwei Kavernenstandorten in den Niederlanden. 70 Years of Potash Engineering Made in Erfurt – 30 Years of Experience Worldwide International Symposium, Erfurt, 06 – 08 October 2022.
- KARIMI-JAFARI M., BÉREST P., BROUARD B., 2008. Subsidence, Sinkholes and Craters above Salt Caverns. SMRI Spring 2008 Technical Conference, Porto, Portugal.
- MALOVICHKO A.A., SHULAKOV D.Y., SABIROV R.H., GHI-LYOV M.V., FOMINYKH V.I., 1999. Ground and seismic control of a large-scale emergency at a potash mine. Proc. 101st An-

nual Gen. Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Calgary, 02 – 05 May 1999.

- MALOVICHKO A.A., SABIROV R.H., MYNKA Y.V., 2001. Seismological monitoring in the system of comprehensive control at Upper Kama Potash Mines. Exkurs.f. u. Veröffentl. GGW, 211, Berlin, 2001, 5-27 - 5-35.
- MINKLEY W., 1998. Zum Herdmechanismus von großen seismischen Ereignissen im Kalibergbau. Geologisches Jahrbuch E 55, 1998, 69 - 84.
- MINKLEY W., 2004. Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbrucherscheinungen im Carnallitit. Schriftenreihe des Instituts für Gebirgsmechanik GmbH, Heft 1, Shaker Verlag, Aachen, 2004, 200 Seiten.
- MINKLEY W., LÜDELING C., 2020. Sinkholes over Deep Caverns. In: Konietzky, H. (Hrsg.), 49. Geomechanik-Kolloquium. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2020-4.
- MONAGHAN J., 2014. Images of Giant Russian Sinkhole Linked to Uralkali Mining Accident Published Online. The Moscow Times. https://www.themoscowtimes.com/2014/11/21/imagesof-giant-russian-sinkhole-linked-to-uralkali-mining-accidentpublished-online-a41611; Last accessed: 14 June 2023.
- PAŃSTWOWA SŁUŻBA GEOLOGICZNA, 2022. BILANS ZA-SOBÓW ZŁÓŻ KOPALIN W POLSCE wg stanu na 31 XII 2021 r. PIG-PIB, Warszawa.
- RAUCHE H., 2015. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- SALZER K., GÜNTHER R.-M., MINKLEY W., NAUMANN D., POPP T., HAMPEL A., LUX K.-H., HERCHEN K., DÜSTER-LOH U., ARGÜELLO J.G., HANSEN F., 2015. Joint project III on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt II: Extensive laboratory test program with clean salt from WIPP. Mechanical Behaviour of Salt VIII, Ed.: L. Roberts, CRC Press 2015, pp. 3–12.
- VAN SAMBEEK L.L., 2000. An introduction to subsidence over salt and potash mining facilities. In: Proceedings, Fall 2000 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, San Antonio, Texas, 15 – 18 October 2000, 10p.