



Ługowanie w złożach małej miąższości – kawerny poziome i ich modelowanie (Proces ługowania kawern solnych, część V)

Leaching caverns in thin-bedded deposits: horizontal cavern modelling (Salt-cavern leaching process, Part V)

Kazimierz URBAŃCZYK

ul. Kanadyjska 34, 32-087 Zielonki; e-mail: kazeku@poczta.onet.pl

STRESZCZENIE

W artykule została omówiona metoda ługowania kawern poziomych, stosowana w złożach o małej miąższości. Przedstawiono bazę empiryczną ługowania kawern poziomych, a następnie opis matematyczny procesu i model komputerowy, opracowany na jego podstawie, a także przykładowe wyniki, uzyskane przy testowaniu modelu.

Słowa kluczowe: kawerna solna, kawerna pozioma, modelowanie procesu ługowania

1. WSTĘP

Niniejszy tekst jest piątym z serii poświęconej procesowi ługowania, ukazującej się na łamach *Przeglądu Solnego*. Zamierzeniem autora jest podsumowanie wiedzy na ten temat. Poprzednie teksty omawiające bazę empiryczną (Urbańczyk, 2015), opis matematyczno-fizyczny (Urbańczyk 2017), model komputerowy procesu (Urbańczyk 2018) i jego praktyczne zastosowanie (Urbańczyk 2019/2020) dotyczyły kawern ługowanych z pojedynczego pionowego otworu. Aby ługowanie takich kawern było opłacalne, złożo powinno mieć odpowiednią miąższość.

Czy zatem złoża małej miąższości są w ogóle nieprzydatne do eksploatacji ługowniczej? I one są ługowane, gdy w danym rejonie brak innych złóż soli, a jest zapotrzebowanie na solankę, lub przestrzeń magazynową. Stosuje się jednak nieco inne metody, tworzy się **kawerny połączone** (z otworów pionowych) lub wykonuje z otworów poziomych **kawer-**

ABSTRACT

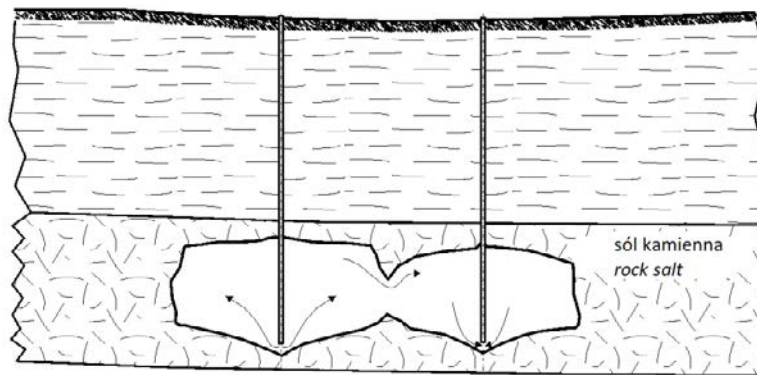
The method of horizontal cavern leaching, applied in thin-bedded deposits, is discussed in this paper. An empirical basis for horizontal cavern leaching is presented here, followed by a mathematical description of the process and of a computer model development, based on the description of the process, with selected model-testing results.

Key words: salt cavern, horizontal cavern, leaching process modelling

1. INTRODUCTION

This paper is the fifth in the series dedicated to the leaching process, published in the *Salt Review*. The author's intention here is to summarise the knowledge on the subject matter. Previous papers discussed the empirical sources of our knowledge (Urbańczyk 2015), the mathematical and physical descriptions (Urbańczyk 2017), a computer model of the process (Urbańczyk 2018), and the practical application of the model (Urbańczyk 2019/2020). Those papers concerned the caverns leached from a single vertical well. However, the salt deposit should have adequate thickness for vertical cavern leaching to be profitable.

Are, therefore, thin-bedded salt deposits useful for leaching operations at all? Such deposits are exploited by solution mining when no other salt deposits exist on the area, but still there is demand for brine or underground storage facilities. However, a different leaching technology should be applied



Ryc. 1. Ługowanie w systemie kawern połączonych.

Fig. 1. Coupled cavern leaching system (Kunstman et al. 2002).

ny poziome (tunelowe). Literatura na ten temat jest bardzo skąpa i niekompletna. Firmy ługujące złoża małej miąższości strzegą swych doświadczeń.

W metodzie kawern połączonych wykonuje się dwa lub więcej otworów w szeregu i po wylugowaniu w nich niskich wrębów, łączy się je hydraulicznie poprzez szczelinowanie lub torpedowanie hydrauliczne. Następnie jednym (skrajnym) otworem podaje się wodę, a drugim otworem odbiera się solankę. Ilustruje to ryc. 1.

Eksploatacja tą metodą jest łatwa do kontrolowania. Przez każdy z otworów można wprowadzać medium izolujące strop, można też mierzyć kształt przy użyciu echosondy. Pewną wadą tej metody jest to, że dno kawern nachylone jest pod granicznym kątem ługowania i przez to łączą się one sporo ponad spągami złoża. Sól poniżej połączenia jest „zarnowana”, nie do wydobycia. Stąd zainteresowanie alternatywną metodą ługowania kawerny z otworu poziomego. Temu tematowi poświęcona jest główna część niniejszego tekstu.

W metodzie ługowania kawerny poziomej otwór wierceny z powierzchni zakrzywia się w trakcie wiercenia tak, by w złożu biegł prawie poziomo, blisko spągu złoża. Zwykle (choć nie zawsze) przed odwierceniem otworu poziomego, wykonuje się w przyspągowej części złoża niewielką kawernę, tzw. kawernę inicjalną, do której musi trafić otwór główny. Kawerna pozioma ługowana jest z otworu poziomego, w którym jest podawane wodę. Solanka odbierana jest z kawerny inicjalnej, w której solanka się dosyca do stężenia przemysłowego (Ryc. 2.).

Rozwój kawerny odbywa się w sposób niekontrolowany, o ile nie wykona się ponad pierwszym tworem poziomym drugiego otworu, tam gdzie planuje się strop kawerny. Gdy kawerna doługuje się do tego otworu, zaczyna się podawać nim medium izolujące.

Innym wariantem tej technologii jest zapuszczenie do otworu poziomego pęku równoległych rur, różnej długości, którymi w kilku miejscach podaje się wodę tak sterując wydajnościami, aby strop ługował się równomiernie (Russo, 1995).

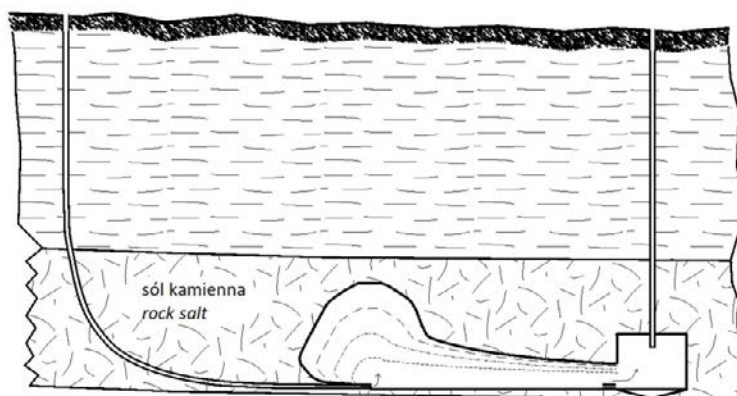
in such cases, involving either **coupled caverns** leached from vertical wells (multi-well system), or **horizontal caverns** (tunnel caverns), leached from horizontal wells. Presently, literature on the subject matter is in fact scarce and incomplete. The leaching companies operating on thin-bedded deposits protect their expertise.

Two or more wells are drilled in a row under the coupled cavern method and, once short notches have been made, the wells become interconnected by the hydraulic fracturing or torpeding method. Next, one outermost well is used to inject water and the opposite well to collect brine. That method is illustrated in Fig. 1.

That brine production method is easy to control. Each well can be fed with the blanket protecting the cavern roof, and the cavern shape can be surveyed, with the use of a sonar. However, the disadvantage consists in the fact that the bottoms of the caverns are sloped at the limiting angle of leaching and, consequently, the caverns become connected somewhere above the floor of the deposit. Salt at the cavern bottom is “lost” and cannot be extracted. That is why an alternative cavern leaching method, from a horizontal well, was considered. The main portion of this paper is dedicated to horizontal cavern leaching.

Under the horizontal cavern leaching method, the borehole drilled from the surface becomes bent at some point during drilling and then the borehole starts to run almost horizontally close to the floor of the salt deposit. Usually, although not always, before horizontal well is drilled, a small cavern is leached, called the initial cavern, close to the floor of the deposit. The initial cavern becomes the target for the main well. A horizontal cavern is leached from the horizontal well to which water is supplied. Brine is collected from the initial cavern where brine concentration rises up to the industrial saturation level (Fig. 2.).

The cavern development proceeds in an uncontrolled manner, unless another well is drilled above the first horizontal well, wherever the cavern roof is planned. Once the cavern shape reaches the top well, the blanket medium starts to be supplied.



Ryc. 2. Kawerna horyzontalna, ługowana z otworu biegnącego horyzontalnie, solanka odbierana jest poprzez dodatkową, niewielką kawernę.
Fig. 2. A horizontal cavern, leached by injecting water into the horizontal well, and producing the brine from an additional, vertical cavern (Kunstman et al. 2002).

Kontrola rozwoju kształtu kawerny ługowanej z otworu poziomego, przy użyciu echosondy, jest możliwa tylko wtedy, gdy kawernę udostępni się dodatkowym otworem pionowym.

Pierwsza licząca się publikacja o kawernach ługowanych z otworu poziomego pojawiła się w 1993 roku (Thoms i Gehle, 1993). Jednak stwierdzono w niej, że „niewiele wiadomo na temat kształtów kawern powstałych w wyniku horyzontalnego ługowania, dlatego też tutaj przedstawiono wyidealizowany kształt [...]” oraz „[...] zastrzeżony charakter danych związanych z ługowaniem kawern rozciągniętych wzdłuż złoża, oznacza, że prawdopodobnie dokonano postępów w tej technologii, które wykraczają poza zakres tego studium wykonalności [...]”.

W latach 90. badania w tej dziedzinie prowadził Gaz de France ze współpracującymi firmami, m.in. Chemkopem. Niektóre wyniki były prezentowane na zjeździe SMRI w San Antonio w 1995 roku (Kunstman i Urbańczyk, 1995, Saberian, 1995, Russo, 1995).

W ostatnich latach na temat komór poziomych publikują głównie (a może i jedynie) Chińczycy (Liu i inni, 2014; Xing i inni, 2015; Li i inni, 2020, Zhang i inni, 2020). Opisują badania laboratoryjne, rzeczywiste kawerny oraz model użyty do symulacji ługowania.

W dalszej części omówione zostaną kolejno: baza empiryczna na temat kawern poziomych, opis matematyczno-fizyczny procesu ich ługowania, algorytm modelu opartego na aproksymacji różnicowej oraz przedstawiony będzie przykład wyników uzyskanych w trakcie testowania modelu.

2. ŹRÓDŁA WIEDZY O ŁUGOWANIU KAWERN POZIOMYCH

Wiedza o ługowaniu kawern poziomych pochodzi z czterech źródeł:

- kawerny poziome ługowane z wyrobisk kopalń podziemnych,
- kawerny poziome ługowane z powierzchni,

Another version of that technology consists in setting of a bundle of pipes of various lengths into the horizontal well. Then, water is supplied to several places at a time, with water volumes being controlled so that the cavern roof is leached out evenly (Russo 1995).

Sonar control of the cavern shape development from the horizontal well is possible only when the cavern is accessed by an additional vertical well drilled to the cavern roof.

The first essential publication on the caverns leached from a horizontal well appeared in 1993 (Thoms and Gehle 1993). However, it was stated there that “Little appears known about cavern shapes resulting from horizontal solutioning, and so an idealized shape is depicted here [...]” and [...] “The proprietary nature of data related to solution mining of SACs [Strata aligned caverns] implies that advancements have likely been made in this technology that are beyond the scope of this “feasibility” paper.”

In the 1990’s, the relevant studies were conducted by the Gaz de France Company, jointly with the co-operating companies, including the Polish Chemkop. Certain study results were presented at the SMRI Meeting in San Antonio in 1995 (Kunstman and Urbańczyk 1995; Saberian 1995; Russo 1995).

In recent years, horizontal caverns were discussed mainly (or exclusively) by the Chinese (Liu et al. 2014; Xing et al. 2015; Li et al. 2020; Zhang et al. 2020). The authors described laboratory tests, actual caverns, and a model used in leaching simulations.

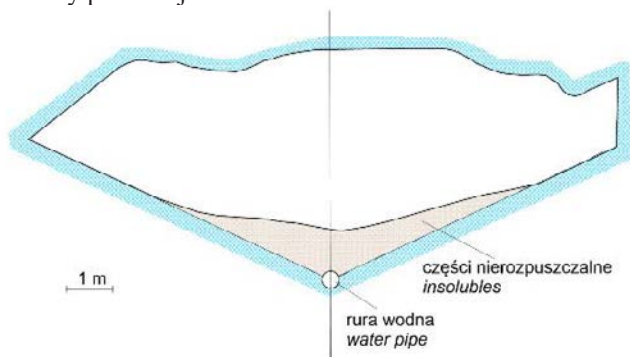
Our discussion below will concern the following: the empirical base regarding horizontal caverns, mathematical and physical descriptions of the horizontal cavern leaching process, an algorithm of the model based on differential approximation, and sample results obtained during the model testing.

2. SOURCES OF KNOWLEDGE ON HORIZONTAL CAVERN LEACHING

The knowledge on horizontal cavern leaching is derived from four processes:

- kawerny pionowe ługowane bez medium izolującego strop,
- eksperymenty laboratoryjne.

Kawerny ługowanych z podziemnych wyrobisk kopalniowych nie trzeba daleko szukać. Tego typu kawerny ługowane w Polsce. Po ukończeniu ługowania solanka była z nich spuszczone i można było wykonać wewnątrz pomiary geodezyjne. Przykładem może być komora Leona Pieprzyka w Wieliczce (Woyciechowski, 1956; Pieprzyk i Radomski, 1960). Schematyczne przekroje takiej kawerny przedstawiają Ryc. 3. i Ryc. 4. Były one ługowane z izolacją stropu poprzez poduszkę powietrzną, więc o rozwoju stropu kawerny horyzontalnych ługowanych bez medium izolacyjnego nie mówią nic, można za to stwierdzić, jak rozwijają się boczne ściany kawerny poziomej.



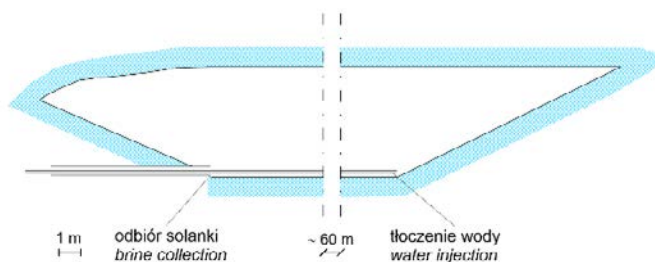
Ryc. 3. Schematyczny przekrój poprzeczny przez kawernę poziomą w kopalni Wieliczka.

Fig. 3. A schematic transverse cross-section of the horizontal cavern in the “Wieliczka” Salt Mine.

Na podstawie obserwacji tych komór można stwierdzić następujące cechy kawern poziomych:

- Nie zachodzi ługowanie w dół, blokuje je osiadanie na dnie części nierozpuszczalnych.
- Na poprzecznym przekroju przez taką kawernę widać po obu stronach od otworu początkowego, nachylenie spągu kawerny pod kątem 20–30°, związane z granicznym kątem ługowania (ryc. 3.). Podobne efekty można zaobserwować w osiowo symetrycznych kawernach „pionowych”.
- Na podłużnym przekroju przez kawernę widać z przodu i z tyłu podobne nachylenie o kącie granicznym (por. Ryc. 4.)

W pobliżu wlotu wody i odbioru solanki kształt kawerny jest z grubszy (półcylindryczny).



Ryc. 4. Schematyczny przekrój podłużny przez kawernę poziomą w kopalni Wieliczka.

Fig. 4. A schematic longitudinal cross-section of the horizontal cavern in the “Wieliczka” Salt Mine.

- horizontal caverns leached from underground mines,
- horizontal caverns leached from the surface,
- vertical caverns leached without blanked medium, and
- laboratory experiments.

The caverns leached from underground chambers can be found nearby. They were leached in Poland. After the completion of the leaching process, brine was drained and survey measurements could be conducted inside the caverns. The Leon Pieprzyk Chamber in the “Wieliczka” Salt Mine can be an example here (Woyciechowski 1956; Pieprzyk and Radomski 1960). Schematic cross-sections of that type of cavern are presented in Figs. 3 and 4. The caverns were leached with roof protection, using an air pad. Consequently, nothing can be said about the development of the horizontal cavern roof, when no blanked medium applied, although we can say how horizontal cavern walls are developing.

Based on cavern observations, one can establish the following properties of horizontal caverns:

- Downward leaching does not occur, as it is blocked by the sedimentation of insolubles at the cavern bottom.
- A transverse cross-section of the cavern shows cavern bottom sloped at the angle of 20–30°, at both sides of the initial borehole, associated with the limiting dissolution angle (Fig. 3.). Similar effects can be observed in the axisymmetrical vertical caverns.
- A longitudinal cross-section of the cavern shows similar slope at the limiting angle of leaching, both in the front and in the rear of the cavern (see Fig. 4.).

Close to the water injection and brine collection points, the cavern shape is approximately semi-cylindrical.

Even when blanket is not intentionally applied to protect the cavern roof (as it was in the case of the Leon Pieprzyk Chamber), gases contained in salt are released and they isolate the roof partially. Consequently, the main differences between caverns leached from underground excavations and those leached from the surface should be expected to occur in the shapes of the cavern roof. The caverns leached from the surface usually have a naked roof.

Classic vertical caverns leached without roof blanketing can provide us with the missing information about roof development in horizontal caverns leached from the surface. The top zone of such a cavern has a shape of an ellipsoidal dome whose proportions depend on the ratio between the vertical and horizontal leaching rates (Kunstman and Urbańczyk 1990). In addition, the cavern roof shape can be influenced by the course of geological layers and differentiation of their leaching properties.

As to other observations carried out in the caverns leached from the surface, we can mention Cavern HA4-5 in Huai’an (China), surveyed by sonar in July 2017 (Li et al. 2020). The sonar measurements were taken through the pipes in the bent well (HA-5) and within the initial cavern (HA-4). The

W komorach kopalnianych (np. w komorze Leona Pieprzyka), wydzielają się gazy zawarte w soli i częściowo izolują strop. Główną różnicą pomiędzy kawernami wykonywanymi z wyrobisk podziemnych a kawernami wykonywanymi z powierzchni należy więc oczekiwać w kształcie stropu. Kawerny ługowane z powierzchni najczęściej nie mają izolacji stropu.

Brakującą informację o kształcie stropu kawern poziomych, ługowanych z powierzchni bez izolacji stropu, mogą dostarczyć kawerny pionowe ługowane bez medium izolacyjnego. Górna strefa takiej kawerny ma kształt elipsoidalnej kopuły, której proporcje zależą od stosunku między stropowym i bocznym współczynnikiem szybkości ługowania (Kunstman i Urbańczyk, 1990). Dodatkowo na kształt stropu może wpłynąć przebieg warstw geologicznych oraz zróżnicowanie ich własności ługowniczych.

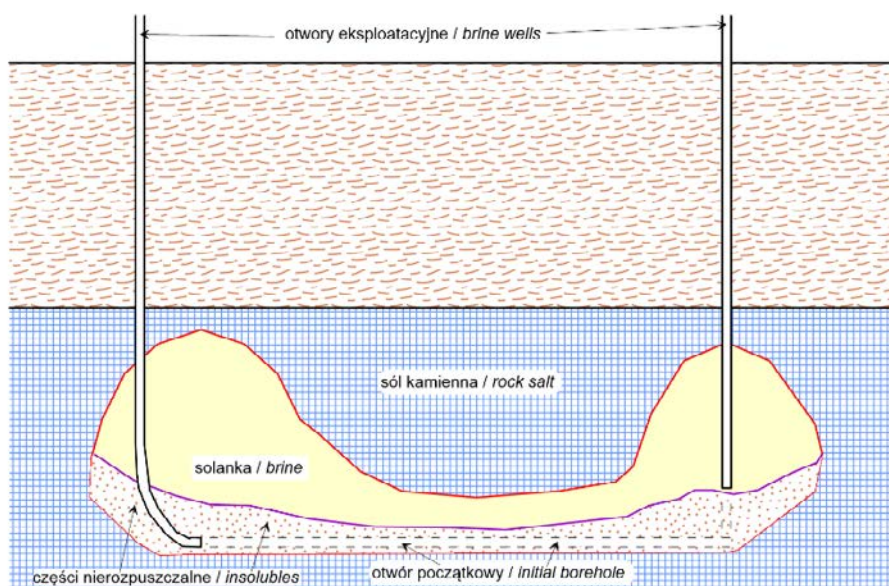
Jeżeli idzie o obserwacje w kawernach ługowanych z powierzchni, należy wspomnieć o kawernie HA4-5 w Huai'an (Chiny) mierzonej echosondą w lipcu 2017 (Li i inni, 2020). Echosonda mierzyła poprzez rury w otworze krzywionym (HA-5) i otworze kawerny inicjalnej (HA-4). Kawerna przypominała dużą literę „U”, dla echosondy dostępne były tylko jej górne odcinki. Dolne części i cała część środkowa nie były dostępne (udział części nierozpuszczalnych wynosił 45%). W celu zbadania środkowej części kawerny trzeba było odwiercić dodatkowy otwór. A zatem kawerna pozioma rozwija się przede wszystkim nad punktem podawania wody. Jeśli odwraca się obieg medium ługującego, otrzymuje się taki kształt podobny do „U”.

Ryc. 5. przedstawia schematyczny przekrój przez kawernę tego typu. Jeśli idzie o rzeczywistą kawernę HA4-5, to „ramiona” były węższe i wyższe oraz w 70% wypełnione częściami nierozpuszczalnymi, niezasypane były jedynie „czubki” kawerny oraz niewielka część pod stropem „łącznika”.

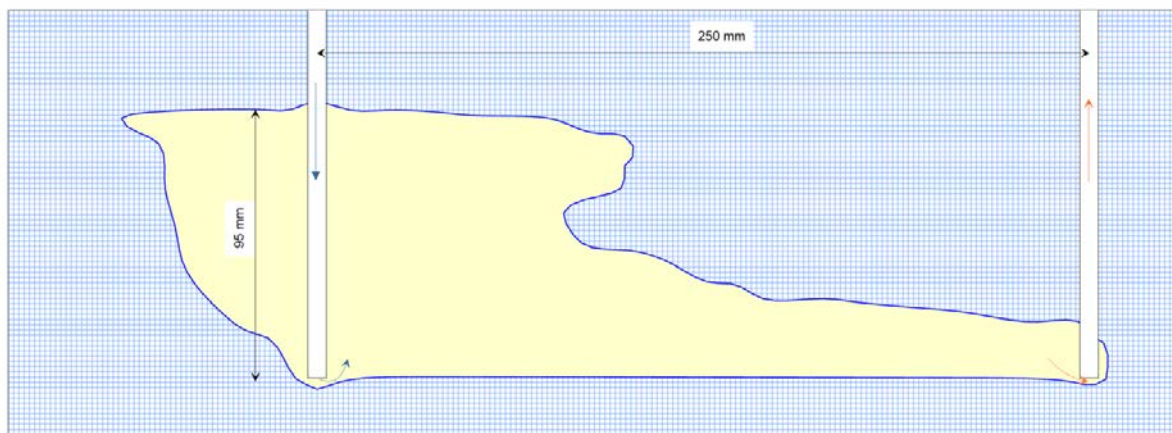
cavern was almost U-shaped. Only the top sections of both “arms” were accessible to the sonar. The lower sections and the whole central section were not accessible. The insolubles content amounted to 45%. It was necessary to drill another well to survey the central section of the cavern. Therefore, the horizontal cavern was leached primarily above the water injection point. Once the circulation of the leaching medium is reversed, leaching can produce a U-shaped cavern.

Fig. 5. presents a schematic cross-section of a horizontal cavern. As to actual Cavern HA4-5, its “arms” were narrow and high and filled with insolubles in 70%. Only the top sections of the cavern were not covered with any material, similarly to a small area under the roof of the “connector.”

Little useful information can be obtained from the previous laboratory experiments by Saberian (Saberian 1977; Saberian 1978). The only really essential information consists in the fact that the height of the cavern is decreasing in the section running from the water injection point to the brine collection point. Therefore, during cavern leaching, there occurs a significant horizontal gradient of brine concentration. Similarly to the caverns leached from underground mine excavations, the cavern roof shapes were influenced by the emission of air from water and of gases from rock salt. Besides, it was not possible to observe experimentally the development of a cavern in front of the water injection point or behind the brine collection point, which was possible in an underground salt mine. Owing to the size of a laboratory model, the influence of insolubles could not be revealed and no slope of cavern bottom with limiting angle of leaching, was visible, although those items are of key importance in the determination of the shape of the lower zone of a cavern.



Ryc. 5. Schematyczny przekrój podłużny przez kawernę poziomą w Huai'an (na podstawie Li i in. 2020).
Fig. 5. A schematic longitudinal cross-section of the horizontal cavern in Huai'an (based on Li et al. 2020).



Ryc. 6. Kształt poziomej mini-kawerny w bloku solnym (na podstawie Li i in. 2020).

Fig. 6. Shape of the horizontal mini-cavern leached in a rock-salt block (based on Li et al. 2020).

Niewiele użytecznej informacji wynika z dawnych eksperymentów laboratoryjnych Saberiana (1977, 1978). Jediną naprawdę istotną informacją, jakiej dostarczyły jest, na pozór oczywisty fakt, że wysokość kawerny znacznie maleje na odcinku od wlotu wody do poboru solanki. Istnieje zatem w kawernie, podczas jej ługowania, poziomy gradient stężenia. Podobnie jak w przypadku komór ługowanych z wyrobisk kopalnianych, na kształt stropu kawerny wpływało wydzielenie się powietrza z wody i gazów ze skały solnej. Dodatkowo w eksperymentach nie było możliwe obserwowania rozwoju kawerny przed wlotem wody ani za poborem solanki (co dało się obserwować w kopalniach). Z uwagi na rozmiary laboratoryjnego modelu wpływ części nierozpuszczalnych nie zdążył się ujawnić i nie pojawiło się nachylenie spągu o kącie granicznym, a przecież jest to jeden z kluczowych elementów determinujących kształt dolnej części kawerny.

Znacznie lepiej były zaplanowane eksperymenty chińskie, wykorzystujące już zgromadzoną wiedzę (Li i inni, 2020). Użyto bloku solnego o rozmiarach 450×250×320 mm. Było w nim 1,5% części nierozpuszczalnych. Bok 450×320 mm wygładzono, wyżłobiono w nim „otwory wiertnicze” i zaklejono szybą, która odpowiadała rzeczywistej płaszczyźnie symetrii kawerny. Przez 26 godzin zatłaczano wodę z wydajnością 2 cm³/min. Nad miejscem podawania wody strop szybko powędrował do góry (o 95 mm) aż powietrze wydzielające się z wody zaczęło go izolować. Nad punktem odbioru solanki strop podniósł się zupełnie nieznacznie (Ryc. 6.). Zaobserwowano też nachylenia spągu pod kątem granicznym oraz półobrotowy kształt kawerny z tyłu punktu podawania wody.

Podsumowanie

Kawerna pozioma powinna charakteryzować się następującymi cechami:

- zwierciadlana symetria (względem pionowej płaszczyzny przechodzącej przez wlot wody i pobór solanki),

Chinese experiments were much better planned, as they were based on the knowledge accumulated so far (Li et al. 2020). A rock-salt block, with the dimensions of 450×250×320 mm was used in the experiment. The block contained 1.5% of insolubles. The 450×320 side of the block was grinded, provided with “wells” and sealed with glass corresponding to the plane of symmetry of the actual cavern. Water was injected with the rate of 2 cm³/min. during 26 hours. The roof quickly moved up by 95 mm over the water injection point until the air separated from water started to isolate the roof. The roof was rising in a different manner over the brine collection point (Fig. 6.). Besides, it was observed that the cavern bottom was sloped at the limiting angle of leaching, together with a semi-rotational shape of the cavern in the back of the water injection point.

Summary

A horizontal cavern should be characterised by the following properties:

- mirror symmetry, in respect of the vertical plane, cutting through the water injection point and the brine collection point,
- no leaching below the water injection point and the brine collection point,
- limiting angle of leaching, resulting from the sliding angle of the insolubles, determining the slope of the cavern bottom,
- leaching of the cavern roof mainly over the water injection point when blanket medium is not applied, or when an insoluble layer is not reached by the cavern roof,
- cavern front extends before water injection point while cavern back extends behind brine collection point (both cavern sections are semi-cylindrical).

- brak ługowania poniżej poziomu wlotu wody i poboru solanki,
- graniczny kąt ługowania (wynikający z kąta zsypania części nierozpuszczalnych) określający nachylenie spągu kawerny,
- ługowanie stropu głównie nad miejscem podawania wody, o ile nie stosuje się medium izolacyjnego, lub strop nie trafia na warstwy nierozpuszczalne,
- przed wlotem wody ługuje się przód kawerny, a za poborem solanki tył (obydwa o kształtach półobrotowych).

2.1. OPIS MATEMATYCZNO-FIZYCZNY PROCESU ŁUGOWANIA KAWERN POZIOMYCH

Matematyczno-fizyczny opis procesu, który podał (Urbańczyk, 2017) stosuje się, jeśli idzie o postać ogólną również do kawern poziomych. Różnica pojawi się dopiero przy przejściu do jednowymiarowego modelu, który dla komór poziomych jest bardziej skomplikowany. Dlatego podstawowe równania opisujące proces zostaną poniżej wypisane bez ich dyskusji.

Szybkość ługowania

Stosują się tu wzory (13), (14) i (17) ze wspomnianej pracy:

$$\omega(C, T, \psi) = k(\psi)(1 + \beta(T - T_0)) \left(\frac{C_N(T) - C}{C_N(T_0)} \right)^\alpha \left(\frac{C_N(T)}{C_N(T_0)} \right)^{2-\alpha} \quad (1)$$

gdzie:

$\omega(C, T, \psi)$ – szybkość ługowania jako funkcja stężenia, temperatury i kąta nachylenia ługowanej powierzchni względem poziomu [mm/h],

$k(\psi)$ – współczynnik szybkości ługowania zależny od kąta nachylenia ługowanej powierzchni względem poziomu [mm/h],

C – stężenie ługującego medium [kg/m³],

C_N – stężenie solanki nasyconej [kg/m³],

T – temperatura ośrodka rozpuszczającego [°C],

T_0 – temperatura odniesienia [°C],

β – współczynnik temperaturowy [1/°C], o wartości zależnej od T_0 ,

α – wykładnik z przedziału <1,2>.

Przyjmując wartości współczynników: $\alpha = 1,5$; $\beta = 0,0262$, a $T_0 = 20^\circ\text{C}$ otrzymuje się:

$$\omega = k(\psi)[1 + 0,0262(T - 20^\circ)] \frac{(C_N - C)^{1,5} C_N^{0,5}}{(C_N(20^\circ))^2} \quad (2)$$

$$k(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{dla } 0 \leq \psi \leq \psi_B \\ k_h \frac{\sin^2 \psi - \sin^2 \psi_B}{1 - \sin^2 \psi_B} & \text{dla } \psi_B \leq \psi \leq \pi/2 \\ k_h \sin^2 \psi + k_v \cos^2 \psi & \text{dla } \pi/2 \leq \psi \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

k_h – współczynnik ługowania bocznego ($\psi = \pi/2$),

k_v – współczynnik ługowania stropowego ($\psi = \pi$),

2.1. MATHEMATICAL AND PHYSICAL DESCRIPTIONS OF THE HORIZONTAL CAVERN LEACHING PROCESS

The mathematical and physical descriptions of the process specified in (Urbańczyk 2017) are applied in general, also in the case of horizontal caverns. In case of the horizontal ones, the difference appears only when switching to a unidimensional model which is more complex in respect of the horizontal caverns. For that reason, the basic equations describing the process will be specified below, without any discussion.

Leaching rate

Formulas (13), (14), and (17), originating from my paper mentioned above, are applied:

$$\omega(C, T, \psi) = k(\psi)(1 + \beta(T - T_0)) \left(\frac{C_N(T) - C}{C_N(T_0)} \right)^\alpha \left(\frac{C_N(T)}{C_N(T_0)} \right)^{2-\alpha} \quad (1)$$

Where:

$\omega(C, T, \psi)$ – leaching rate, as a function of salt concentration, temperature, and the inclination angle of the surface being leached, in respect of the level [mm/h],

$k(\psi)$ – leaching rate coefficient, depending on the inclination angle of the surface being leached, in respect of the level [mm/h],

C – concentration of the leaching medium [kg/m³],

C_N – concentration of the saturated brine [kg/m³],

T – temperature of the dissolution medium [°C],

T_0 – reference temperature [°C],

β – temperature coefficient [1/°C], with the value depending on T_0 ,

α – exponent from the range of <1, 2>.

Assuming the following coefficient values: $\alpha=1.5$; $\beta=0.0262$ at $T_0=20^\circ\text{C}$, we obtain the following:

$$\omega = k(\psi)[1 + 0,0262(T - 20^\circ)] \frac{(C_N - C)^{1,5} C_N^{0,5}}{(C_N(20^\circ))^2} \quad (2)$$

$$k(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{dla } 0 \leq \psi \leq \psi_B \\ k_h \frac{\sin^2 \psi - \sin^2 \psi_B}{1 - \sin^2 \psi_B} & \text{dla } \psi_B \leq \psi \leq \pi/2 \\ k_h \sin^2 \psi + k_v \cos^2 \psi & \text{dla } \pi/2 \leq \psi \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

Where:

k_h – horizontal leaching coefficient ($\psi=\pi/2$),

k_v – vertical leaching coefficient ($\psi=\pi$),

ψ_B – limit angle of leaching; leaching ceases at small angles.

It is necessary to mention that the study (Li at al. 2020), referring to (Wu at al. 1992), described the leaching rate in a different way:

$$\omega = \begin{cases} \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} (\sin \psi)^{0,25} & (\psi < \pi/2) \\ \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} \frac{\psi}{\pi/2} & (\psi > \pi/2) \end{cases}$$

ψ_B – graniczny kąt ługowania, dla kątów mniejszych ługowanie ustaje.

Trzeba wspomnieć, że w pracy (Li i in. 2020) powołując się na (Wu i in. 1992) szybkość ługowania opisana została inaczej:

$$\omega = \begin{cases} \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} (\sin \psi)^{0,25} & (\psi < \pi/2) \\ \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} \frac{\psi}{\pi/2} & (\psi > \pi/2) \end{cases}$$

Wzór ten musi budzić zdziwienie. Nie podano w jakich jednostkach ma być temperatura T . Jeśli w stopniach Celsjusza, to w niskich temperaturach (np. 5°C) szybkość ługowania jest ujemna, jeśli zaś jest to temperatura bezwzględna, to zależność od temperatury jest prawie żadna. Także dla skali Fahrenheita zmienność jest nieznaczna. Wykluczone jest też, by rzeczywista zależność od stężenia była liniowa. Wątpliwa jest również linowa zależność od kąta, dla kątów powyżej $\pi/2$. Na dodatek nie podano dla jakiej temperatury wyznacza się ω_h – horyzontalną szybkość ługowania w czystej wodzie. Szybkość ługowania stropowego jest dwukrotnie wyższa niż szybkość ługowania bocznego.

2.2. TRANSPORT SOLI W KAWERNIE

Prawo to w postaci globalnej, która jest najogólniejsza, wygląda następująco:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V C dV = - \oint_{\Gamma} (C \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS + \oint_{\Gamma} (D_T \nabla C \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V (q_w C_w) dV + \int_A (p_s \rho_{zl} \omega) dA - \int_B (\omega_n (w_r - 1)) dB \quad (4)$$

gdzie:

A – fragment powierzchni Γ będący powierzchnią graniczną kawerny ze skałą solną [m^2] (może być zerowy, jeśli cała objętość V zawarta jest wewnątrz kawerny),

B – fragment powierzchni Γ będący dnem kawerny [m^2],

C – stężenie solanki [kg/m^3],

C_w – stężenie źródeł zewnętrznych (zatłaczanej wody i odbieranej solanki) [kg/m^3],

D_T – współczynnik dyfuzji turbulentnej [m^2/s],

\mathbf{n} – wektor normalny do powierzchni Γ skierowany na zewnątrz,

p_s – zawartość soli rozpuszczalnej w skałe solnej,

q_w – wydajność źródeł zewnętrznych na jednostkę objętości [$1/s$],

t – czas [s],

\mathbf{v} – lokalna średnia prędkość przepływu przez solankę [m/s],

w_r – współczynnik rozluźnienia części nierozpuszczalnych w zasypie [-],

V – rozpatrywana objętość [m^3] (należy zwrócić uwagę, że może ona być zmienna w czasie, jeśli obejmuje rozpuszczany ocios kawerny, lub zasypywane dno,

Γ – zamknięta powierzchnia brzegowa objętości V [m^2],

ρ_{zl} – gęstość skały solnej [kg/m^3],

That formula must raise astonishment. No units of the temperature T were given. If in Celsius, the leaching rate will be negative at low temperature (e.g. 5°C). If, however, absolute temperature is meant, the dependence on temperature is next to none. Insignificant temperature also occurs in the case of the Fahrenheit scale. Real linear dependence on brine concentration is impossible. Besides, linear dependence on the angle, for the angles exceeding $\pi/2$, is also doubtful. In addition, no temperature was specified for the determination of ω_h – horizontal leaching rate in fresh water. The vertical leaching rate is twice as high as the horizontal leaching rate.

2.2. SALT TRANSPORT IN THE CAVERN

The law is the following in its most general global form:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V C dV = - \oint_{\Gamma} (C \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS + \oint_{\Gamma} (D_T \nabla C \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V (q_w C_w) dV + \int_A (p_s \rho_{zl} \omega) dA - \int_B (\omega_n (w_r - 1)) dB \quad (4)$$

Where:

A – a fragment of surface Γ , being the cavern boundary surface, with the rock salt [m^2] (can be equal to zero for the volume V entirely contained within the cavern),

B – a fragment of surface Γ , being the cavern bottom (sump roof) [m^2],

C – concentration of brine [kg/m^3],

C_w – concentration of external sources (injected water and collected brine) [kg/m^3],

D_T – turbulent diffusion coefficient [m^2/s],

\mathbf{n} – versor normal to surface Γ , directed outside,

p_s – soluble content in rock salt,

q_w – capacity of external sources per unit of volume [$1/s$],

t – time [s],

\mathbf{v} – local average rate of flow in brine [m/s],

w_r – loosening coefficient (bulking factor) for the insolubles deposited in the sump [-],

V – considered volume [m^3] (note that the volume can change in time if it entails the cavern wall being leached or the cavern bottom covered with insolubles,

Γ – closed boundary surface of the volume V [m^2],

ρ_{zl} – rock salt density [kg/m^3],

ω – leaching rate [m/s],

ω_n – rate of sump level increase [m/s].

$\int_V q_w dV = Q_{WE}$ (water injection capacity) if the water pipe's outlet is placed within the volume V ; otherwise, it equals to zero,

$\int_V q_w dV = -Q_{WY}$ (brine collection capacity) if the brine pipe's outlet is placed within the volume V ; otherwise, it equals to zero.

ω – szybkość lugowania [m/s],

ω_n – szybkość narastania zasypu [m/s].

$\int_V q_w dV = Q_{WE}$ (wydajność zatłaczania wody), jeżeli wylot rury wodnej znajduje się wewnątrz objętości V , inaczej jest zerowa

$\int_V q_w dV = -Q_{WY}$ (wydajność odbioru solanki), jeżeli wylot rury solankowej znajduje się wewnątrz objętości V , inaczej jest zerowa.

2.3. POLE PRZEPLYWU WEWNĄTRZ KAWERNY

Pole przepływu w kawernie jest opisane równaniem zachowania pędu, które w postaci globalnej ogólnie ma postać (równanie (24) w Urbańczyk, 2017):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_r \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \rho \mathbf{G} dV + \oint_r \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \mathbf{a}_w dV \quad (5)$$

gdzie:

\mathbf{a}_w – wydajność źródeł pędu z zewnątrz [$\text{kg/m}^2\text{s}^2$] (związana z tłoczeniem wody i odbiorem solanki),

\mathbf{G} – pole grawitacyjne [m/s^2],

p – ciśnienie w kawernie [Pa],

\mathbf{v} – lokalna średnia prędkość przepływu solanki [m/s],

$\mathbf{\Pi}$ – tensor naprężeń (turbulentnych) [Pa],

ρ – lokalna średnia gęstość solanki [kg/m^3],

$\int_V \mathbf{a}_w dV = \rho_{WE} v_{WE} Q_{WE}$ wydajność dopływu pędu wody, jeżeli wylot rury wodnej znajduje się wewnątrz objętości V ,

$\int_V \mathbf{a}_w dV = -\rho_{WY} v_{WY} Q_{WY}$ wydajność odpływu pędu solanki, jeżeli wylot rury solankowej znajduje się wewnątrz objętości V .

2.4. RÓWNANIE CIĄGŁOŚCI

W przypadku cieczy mało ściśliwej, niejednorodnej, gdy pojawia się kontrakcja towarzysząca przechodzeniu soli z fazy stałej do roztworu, ogólna postać tego równania powinna być następująca:

$$-\oint_r (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_A \left(p_s \omega \left(1 - \frac{\rho_{zl}}{\rho_{sr}} \right) \right) dA + \int_V q_w dV \quad (6)$$

gdzie:

ρ_{zl} – efektywna gęstość soli w roztworze (solance) [kg/m^3], pozostałe oznaczenia jak we wzorze (4).

Sformułowany powyżej model nie jest kompletny bez opisu turbulencji, podobnie jak dla kawern pionowych. O ile w kawernach pionowych grawitacja jest skierowana równoległe (bądź antyrównoległe) do kierunku przepływu, o tyle w przypadku kawern poziomych grawitacja jest prostopadła do głównego kierunku przepływu. Nie można więc zakładać, że dochodzi do pełnego wymieszania solanki. Jednak ogólne opisu takiej turbulencji do tej pory brak.

2.3. FIELD OF FLOW WITHIN THE CAVERN

The field of flow within the cavern is described by the momentum preservation equation whose general global form is as follows (Equation (24) in (Urbańczyk 2017)):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_r \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \rho \mathbf{G} dV + \oint_r \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \mathbf{a}_w dV \quad (5)$$

Where:

\mathbf{a}_w – capacity of the outside momentum source [$\text{kg/m}^2\text{s}^2$] (associated with water injection and brine collection),

\mathbf{G} – gravity field [m/s^2],

p – pressure in the cavern [Pa],

\mathbf{v} – local average brine flow rate [m/s],

$\mathbf{\Pi}$ – tensor of turbulent stresses [Pa],

ρ – local average brine density [kg/m^3],

$\int_V \mathbf{a}_w dV = \rho_{WE} v_{WE} Q_{WE}$ the capacity of water momentum inflow if the water pipe outlet is placed within the volume V ,

$\int_V \mathbf{a}_w dV = -\rho_{WY} v_{WY} Q_{WY}$ the capacity of brine momentum outflow if the brine pipe outlet is placed within the volume V .

2.4. CONTINUITY EQUATION

In the case of hardly compressible and heterogeneous liquids, where contraction appears accompanying the transition of salt from the solid phase to solution, the general form of this equation should be as follows:

$$-\oint_r (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_A \left(p_s \omega \left(1 - \frac{\rho_{zl}}{\rho_{sr}} \right) \right) dA + \int_V q_w dV \quad (6)$$

Where:

ρ_{zl} – effective density of salt dissolved in brine [kg/m^3].

The meanings of the remaining symbols are the same as those in Formula (4).

The horizontal cavern model formulated above is not complete without a description of turbulence, analogously to the case of vertical caverns. Gravitation is directed parallel (or anti-parallel) to the direction of flow in vertical caverns; however, in the case of horizontal caverns, gravitation is perpendicular to the main direction of flow. Therefore, we may not assume that brine becomes fully mixed. A general description of such turbulence is not available yet.

2.5. SUMMARY

In the case of the horizontal cavern, the description of the leaching process is composed of the same equations as in the case of the vertical cavern, including the equations for leaching rate, salt transport, flow rate, and continuity with bound-

2.5. PODSUMOWANIE

W przypadku kawerny poziomej na opis procesu ługowania składają się te same równania, co w przypadku kawerny pionowej: wzór na szybkość ługowania, równanie transportu, równanie przepływu, równanie ciągłości z warunkami brzegowymi, do których powinno się dołączyć równania opisujące turbulencję. Niestety, brak do tej pory ogólnego opisu turbulencji dla przypadku ługowania soli.

3. PRZYJMOWANE PRZYBLIŻENIA

W kawernie poziomej można wyróżnić trzy strefy: strefę ługowania nad punktem podawania medium ługującego (wody), kawernę dosycającą, lub w razie jej braku strefę poza punktem odbioru solanki oraz położoną pomiędzy nimi strefę przepływu poziomego.

Nad punktem podawania wody rozwój kawerny odbywa się podobnie, jak w przypadku ługowania w prawym obiegu kawerny pionowej. Również w kawernie dosycającej ługowanie odbywa się, jak w przypadku kawerny pionowej. Obszar między punktem podawania wody a punktem odbioru solanki, dzieli się krokiem równomiernym na bloki aproksymacyjne. Wstecz, przed punktem podawania wody, wystarczy jeden blok półobrotowy. Podobnie poza punktem odbioru solanki, gdy brak kawerny dosycającej. Jednak ługowanie ponad wylotem rury wodnej przebiega na tyle szybko, że można rozpatrywać tę część kawerny, jako osiowo-symetryczną kawernę i w miarę wzrostu jej średnicy, zagarnięte przez nią bloki aproksymacyjne eliminować z modelu. Ilustrują to ryc. 7 i ryc. 8. Należy jednak w bilansie uwzględnić dodatkową objętość bloków zagarniętych niecałkowicie przez blok osiowo-symetryczny. Określenie zasięgu tego bloku, jego objętości oraz powierzchni podlegającej ługowaniu jest najtrudniejszym elementem uproszczonego modelu.

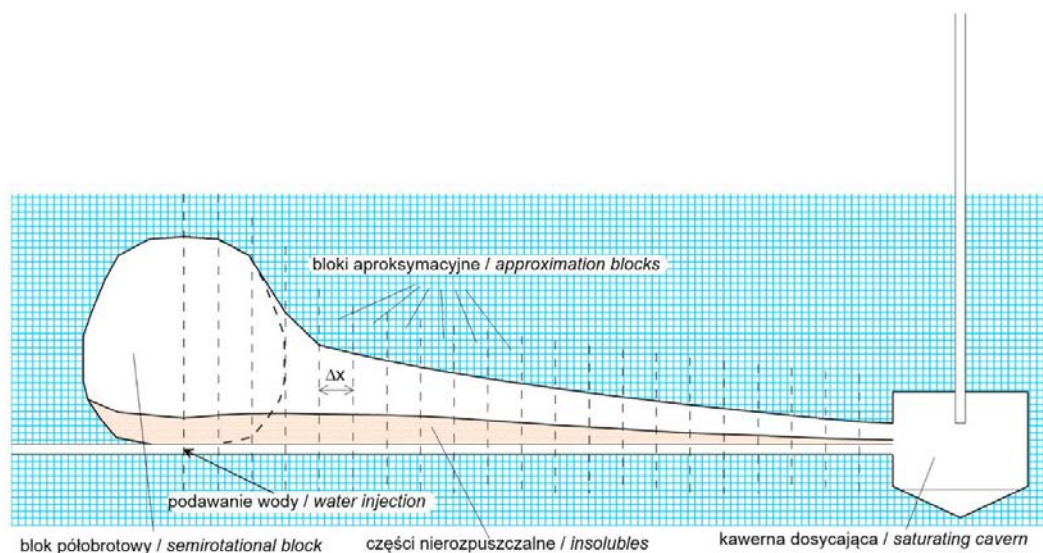
ary conditions, supplemented with the turbulence equations. Unfortunately, no general turbulence description is available for salt leaching.

3. ASSUMED APPROXIMATIONS

We can distinguish three zones in the horizontal cavern: the leaching zone above the leaching medium (water) injection point, the saturating cavern, or, when it is absent, the zone outside the brine collection point, and the horizontal flow zone situated between the previous two zones.

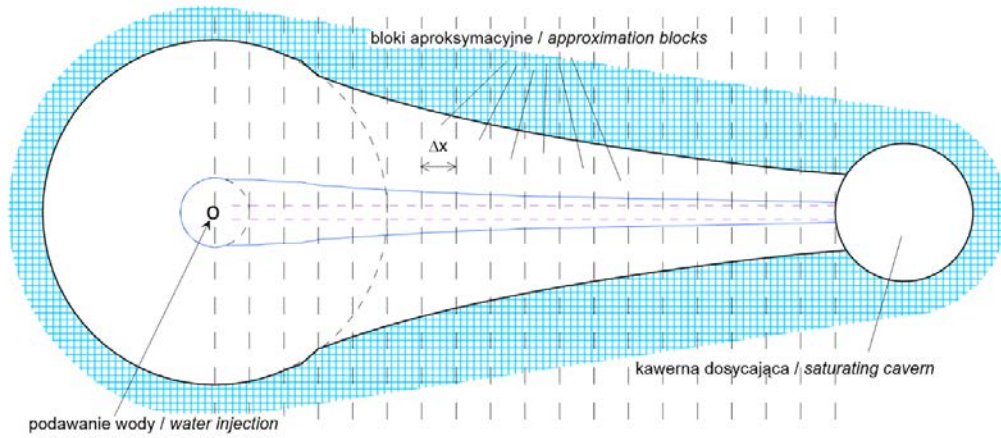
Above the water injection point, the cavern development process runs similarly to that of vertical cavern leaching with the direct circulation. Also in the saturation cavern, the leaching process is similar to that of the vertical cavern. The area between the water injection point and the brine collection point is subdivided into approximation blocks in even steps. In front of the water injection point, one semi-rotational block is sufficient. Similarly, behind the brine collection point when there is no saturation cavern. However, the leaching process runs fast enough above the water injection outlet and we can treat that section of the cavern as an axially symmetrical block. With the increase of the cavern diameter, the approximation blocks occupied by that section can be eliminated from our model. That is illustrated in Figs. 7 and 8. In our balance, we need to take into account additional volumes of the blocks only partially occupied by the axially symmetrical block. The determinations of the extent of that block, its volume, and surface subjected to the leaching process belong to the most demanding components of the simplified model.

The boundary of each block is approximated with a broken line (polyline), similarly to the case of the vertical cavern (Kunzman and Urbańczyk 2018). In each of the blocks, the boundary contour is displaced in accordance with the rules given there.



Ryc. 7. Schematyczny przekrój wzdłuż kawerny poziomej ze schematem aproksymacyjnym.

Fig. 7. A schematic longitudinal cross-section of a horizontal cavern, with an approximation scheme.



Ryc. 8. Schematyczny przekrój poziomy kawerny poziomej ze schematem aproksymacyjnym.
Fig. 8. A schematic horizontal cross-section of a horizontal cavern, with an approximation scheme.

Brzeg w każdym z bloków aproksymuje się łamaną, podobnie jak w kawernie pionowej (Kunstman i Urbańczyk, 2018). W każdym z bloków przemieszcza się kontur brzegu zgodnie z regułami tam podanymi.

W osiowo-symetrycznym bloku nad wylotem rury wodnej, można uśrednić stężenie, tak jak przy obiegu prawym w kawernie pionowej. Model osiowo-symetrycznego bloku nad wylotem rury wodnej będzie więc uproszczonym modelem kawerny pionowej, podobnie otoczenie miejsca poboru solanki. Model taki przedstawiony został w poprzednich tekstach. Pozostaje do opisu model przepływu poziomego. Jako pierwsze przybliżenie można przyjąć, że w każdym z takich bloków stężenie jest jednakowe. Wtedy równania znacznie się upraszczają, podobnie jak w jednowymiarowym modelu kawerny pionowej.

Równanie transportu soli otrzymuje postać:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} S(x,t)C(x,t)dx = S(x_2,t) \left(v(x_2,t)C(x_2,t) - D(x_2,t) \frac{\partial C(x_2,t)}{\partial x} \right) - S(x_1,t) \left(v(x_1,t)C(x_1,t) - D(x_1,t) \frac{\partial C(x_1,t)}{\partial x} \right) + \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{A}(x,t)dx - \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{B}(x,t)dx \quad (7)$$

gdzie:

$\mathcal{A}(x,t)$ – liniowa gęstość dopływu soli w efekcie ługowania ścian kawerny na odległości x w chwili t [kg/m s],

$\mathcal{B}(x,t)$ – liniowa gęstość pozostawiania soli w solance wypełniającej pory zasypu na dnie kawerny na odległości x w chwili t [kg/m s],

$C(x,t)$ – stężenie solanki na odległości x , w chwili t [kg/m³],

$D(x,t)$ – współczynnik dyfuzji turbulentnej na odległości x , w chwili t [m²/s],

$S(x,t)$ – pole przekroju kawerny (bez zasypu) na odległości x , w chwili t [m²],

$v(x,t)$ – prędkość średniego przepływu przez kawernę na odległości x , w chwili t [m/s].

x_1, x_2 – granice odcinka, w którym równanie bilansuje masę soli [m], $x \in (x_1, x_2)$.

$$\mathcal{A}(x,t) = \int_{\Lambda} \frac{\omega(x,l,t) p_s(l) \rho_{z1}}{\cos \zeta} dl \quad (8)$$

$$\mathcal{B}(x,t) = C(x,t)(w_r - 1) \int_{\Lambda} \frac{\omega(x,l,t) p_n(l)}{\cos \zeta} dl \quad (9)$$

In the axially symmetrical block above the water pipe's outlet, salt concentration can be averaged, just like in the case of the direct circulation in the vertical cavern. The model of the axially symmetrical block above the water pipe outlet will thus present a simplified model of the vertical cavern, and the same concerns the surrounding area of the brine collection point. Such a model was presented in the Author's previous papers. What is required here is a description of the horizontal flow model. We can assume, as the first approximation, that salt concentration is uniform in each of the blocks. In that case, the equations become much simplified, similarly to the case of the unidimensional model of the vertical cavern.

The salt transport equation will assume the following form:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} S(x,t)C(x,t)dx = S(x_2,t) \left(v(x_2,t)C(x_2,t) - D(x_2,t) \frac{\partial C(x_2,t)}{\partial x} \right) - S(x_1,t) \left(v(x_1,t)C(x_1,t) - D(x_1,t) \frac{\partial C(x_1,t)}{\partial x} \right) + \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{A}(x,t)dx - \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{B}(x,t)dx \quad (7)$$

Where:

$\mathcal{A}(x,t)$ – linear density of salt inflow, as a result of cavern wall leaching, at the distance of x and at the time of t [kg/m s],

$\mathcal{B}(x,t)$ – linear density of salt remaining in brine that fills the sump pores on the cavern bottom, at the distance of x and at the time of t [kg/m s],

$C(x,t)$ – concentration of brine at the distance of x and the time of t [kg/m³],

$D(x,t)$ – turbulent diffusion coefficient at the distance of x and the time of t [m²/s],

$S(x,t)$ – area of cavern cross-section (without sump) at the distance of x and the time of t [m²],

$v(x,t)$ – average flow rate across the cavern at the distance of x and the time of t [m/s].

x_1, x_2 – boundaries of the section in which the equation balances the salt weight [m], $x \in (x_1, x_2)$.

$$\mathcal{A}(x,t) = \int_{\Lambda} \frac{\omega(x,l,t) p_s(l) \rho_{z1}}{\cos \zeta} dl \quad (8)$$

$$\mathcal{B}(x,t) = C(x,t)(w_r - 1) \int_{\Lambda} \frac{\omega(x,l,t) p_n(l)}{\cos \zeta} dl \quad (9)$$

gdzie:

l – długość mierzona wzdłuż konturu rozpatrywanego przekroju [m],

p_n – udział części nierozpuszczalnych w skale solnej [-],

p_s – udział soli rozpuszczalnych w skale solnej [-],

w_r – współczynnik rozluźnienia części nierozpuszczalnych w zasypie [-],

ζ – kąt między przecięciem płaszczyzny XZ z konturem a osią X [-],

Λ – kontur rozpatrywanego poprzecznego przekroju [m],

ρ_{zI} – gęstość skały solnej [kg/m³],

$\omega(x, l, t)$ – szybkość ługowania na odległości x , w chwili t , na współrzędnej konturu l [m/s].

Ocios kawerny można opisać jako powierzchnię $Y(x, h, t)$, wyrażającą szerokość na danej odległości, na danej głębokości, zmieniającą się w czasie. Wtedy można wyrazić szybkość ługowania poprzez pochodne cząstkowe powierzchni $Y(x, h, t)$ po czasie. Tak samo można wyrazić kąty, czy parametr l . Zależności są jednak nie tylko skomplikowane, ale też, jak dotąd, bez praktycznego zastosowania.

Jako równanie przepływu przez kawernę w przypadku jednowymiarowym wystarczy równanie ciągłości. Sprawada się ono do bilansu objętości, w którym zaniedbuje się, jako nieistotne, zmiany objętości wywołane ściśliwością solanki oraz zmianami jej temperatury, pozostaje natomiast defekt objętości wywołany kontrakcją towarzyszącą przechodzeniu soli z krystalicznej skały solnej do roztworu.

Sprowadza się to do następującego równania:

$$\frac{\partial}{\partial x}(S(x, t)v(x, t)) = - \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_s(l) \left(1 - \frac{\rho_{zI}}{\rho_{sr}}\right) dl \quad (10)$$

gdzie:

$S(x, t)$ - powierzchnia przekroju poprzecznego kawerny [m²],

$v(x, t)$ - prędkość średniego przepływu przez kawernę [m/s],

$\omega(x, y, h, t)$ - szybkość ługowania skały solnej [m/s],

$p_s(z)$ - udział soli rozpuszczalnych w skale solnej [-],

ρ_{zI} - gęstość skały solnej [kg/m³],

ρ_{sr} - gęstość soli rozpuszczonej w solance, po kontrakcji (masa soli na różnicę objętości solanki i czystej wody) [kg/m³],

$\Lambda(x, t)$ - kontur przekroju poprzecznego kawerny [m].

Jeśli założyć, że części nierozpuszczalne nie są unoszone z wodą, ale opadają na dno, plus minus w przedziale, z którego się wzięły, to przyrost objętości zasypu na dnie, będzie wyrażał się wzorem:

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_z) = \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_n(l)w_r dl \quad (11)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorach (8-9).

Warunki brzegowe stanowią blok podawania wody i blok odbioru solanki. W bloku podawania wody strumień dopływającej soli jest niezerowy tylko wtedy, gdy woda zastąpiona jest półsolanką:

$$\frac{d(V_C)}{dt} = Q_0C_0 - S(x_2, t)(v(x_2, t)C(x_2, t) - D(x_2, t)\frac{\partial C(x_2, t)}{\partial x}) + \frac{dV}{dt}(\rho_{zI}p_s - Cp_n(w_r - 1)) \quad (12)$$

Where:

l – length measured along the contour of the cross-section under consideration [m],

p_n – insolubles content in rock salt [-],

p_s – soluble content in rock salt [-],

w_r – loosening coefficient (bulking factor) for the insolubles deposited in sump [-],

ζ – the angle between the crossing line of plane XZ with contour and axes X [-],

Λ – contour of the cross-section under consideration [m],

ρ_{zI} – rock salt density [kg/m³],

$\omega(x, l, t)$ – leaching rate at the distance of x and the time of t , on the coordinate of contour l [m/s].

The cavern wall can be described as the surface $Y(x, h, t)$, changing in time, expressing the cavern width at the given distance and at the given depth. Than, it is possible to express the leaching rate by partial derivatives of the surface $Y(x, h, t)$ over time. Angles or the parameter l can be expressed in the same way. However, the dependences are complicated and moreover, they have not found any practical application as yet.

The continuation equation is sufficient, as the equation of the flow in the cavern, in the unidimensional case. That equation is reduced to the volume balance where the changes in volume, caused by the compressibility of brine and the changes in brine temperature, can be neglected as non-essential. However, what remains is the volume defect, caused by the contraction accompanying the transition of salt from the crystalline phase to solution.

The process is reduced to the following equation:

$$\frac{\partial}{\partial x}(S(x, t)v(x, t)) = - \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_s(l) \left(1 - \frac{\rho_{zI}}{\rho_{sr}}\right) dl \quad (10)$$

Where:

$S(x, t)$ – cavern transverse cross-section surface area [m²],

$v(x, t)$ – average flow rate across the cavern [m/s],

$\omega(x, y, h, t)$ – leaching rate of rock salt [m/s],

$p_s(z)$ – soluble content in rock salt [-],

ρ_{zI} – rock salt density [kg/m³],

ρ_{sr} – density of salt dissolved in brine after contraction (salt mass per the difference in the volume of brine and fresh water) [kg/m³],

$\Lambda(x, t)$ – contour of the cavern cross-section [m].

If we assume that insolubles are not removed by water, but are deposited on the cavern bottom, more or less within the block from which they originated, the increase of the sump volume can be expressed by the following equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_z) = \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_n(l)w_r dl \quad (11)$$

The meanings of the symbols are the same as those in formulas (8) and (9).

W bloku odbioru, strumień odpływającej soli równy jest wydajności odbioru solanki przemnożonej przez jej stężenie.

$$\frac{d(VC)}{dt} = QC + S(x_1, t) \left(v(x_1, t)C(x_1, t) - D(x_1, t) \frac{\partial C(x_1, t)}{\partial x} \right) + \frac{dV}{dt} (\rho_{zl} p_s - Cp_n (w_r - 1)) \quad (13)$$

gdzie:

C_0 – stężenie medium ługującego, dla wody zero [kg/m³],

$C(x, t)$ – stężenie solanki na odległości x , w chwili t [kg/m³],

$D(x, t)$ – współczynnik dyfuzji turbulentnej na odległości x , w chwili t [m²/s],

p_n – udział części nierozpuszczalnych w skale solnej [-],

p_s – udział soli rozpuszczalnych w skale solnej [-],

Q_0 – wydajność zatłaczania medium ługującego (wody) [m³/s],

Q – wydajność odbioru solanki [m³/s],

$S(x, t)$ – pole przekroju kawerny (bez zasypu) na odległości x , w chwili t [m²],

$v(x, t)$ – prędkość średniego przepływu przez kawernę na odległości x , w chwili t [m/s],

V – objętość bloku brzegowego [m³] (dla każdego z bloków inna),

w_r – współczynnik rozluźnienia części nierozpuszczalnych w zasypie [-],

x_2 – współrzędna przekroju graniczącego z pierwszym blokiem liniowym [m],

x_1 – współrzędna przekroju graniczącego z ostatnim blokiem liniowym [m],

ρ_{zl} – gęstość skały solnej [kg/m³].

Strumień objętości jest równy wydajności odbioru solanki ze znakiem ujemnym. Różnica między obiema wydajnościami jest równa całkowitej kontrakcji soli przechodzącej ze skały solnej do solanki.

Aby model był kompletny, trzeba przyjąć jakiś współczynnik dyfuzji. Wydaje się, że nie powinno się jej pomijać, z uwagi na występowanie poziomego gradientu stężenia. Jedyną znaną autorowi propozycją w tej materii model dyfuzji turbulentnej zastosowany przez Sandia National Laboratories w modelu Sansmic (Russo, 1981; 1983). Oparty jest on na analizie niestabilności grawitacyjnych w (Morton i inni, 1956) oraz (Plesset i Whipple, 1974) ze współczynnikami empirycznymi dobranymi na podstawie obserwacji transportu soli w otworze wiertniczym i wnikania solanki do warstw wodonośnych (Knapp i Podio 1979, Russo 1983):

Zaproponowany tam współczynnik dyfuzji turbulentnej jest następujący:

$$D_{tur} = D_0 \left(\frac{1}{\rho_w} \frac{d\rho}{dx} \right)^{1/2} \min(y^2, l^2) \quad (14)$$

gdzie:

D_0 – stała empiryczna, wynosząca ok. 17,5 m²/s (31,7 ft²/s),

ρ_w – gęstość wody, ok. 1000 kg/m³,

y – lokalna pół-szerokość kawerny [m],

The boundary conditions constitute the water injection block and the brine collection block. In the water injection block, the stream of inflowing salt is not equal to zero only when water has been replaced by semi-brine:

$$\frac{d(VC)}{dt} = Q_0 C_0 - S(x_2, t) \left(v(x_2, t)C(x_2, t) - D(x_2, t) \frac{\partial C(x_2, t)}{\partial x} \right) + \frac{dV}{dt} (\rho_{zl} p_s - Cp_n (w_r - 1)) \quad (12)$$

In the brine collection block, the stream of outflowing salt is equal to the capacity of brine collection multiplied by brine concentration.

$$\frac{d(VC)}{dt} = QC + S(x_1, t) \left(v(x_1, t)C(x_1, t) - D(x_1, t) \frac{\partial C(x_1, t)}{\partial x} \right) + \frac{dV}{dt} (\rho_{zl} p_s - Cp_n (w_r - 1)) \quad (13)$$

Where:

C_0 – concentration of leaching medium; zero for water [kg/m³],

$C(x, t)$ – concentration of brine at the distance of x and the time of t [kg/m³],

$D(x, t)$ – turbulent diffusion coefficient at the distance of x and the time of t [m²/s],

p_n – insolubles content in rock salt [-],

p_s – soluble content in rock salt [-],

Q_0 – injection capacity of leaching medium (water) [m³/s],

Q – brine collection capacity [m³/s],

$S(x, t)$ – area of the cavern cross-section (without sump) at the distance of x and the time of t [m²],

$v(x, t)$ – average flow rate through the cavern at the distance of x and the time of t [m/s],

V – boundary block volume [m³] (different for each block),

w_r – loosening coefficient (bulking factor) for the insolubles deposited in the sump [-],

x_2 – coordinate of the cross-section adjacent to the first linear block [m],

x_1 – coordinate of the cross-section adjacent to the last linear block [m],

ρ_{zl} – rock salt density [kg/m³].

The stream of volume is equal to the capacity of brine collection, but with the negative sign. The difference between both capacities is equal to the total contraction of salt, passing from rock salt to brine.

For our model to be complete, it is necessary to assume a diffusion coefficient. It seems that diffusion should not be omitted, owing to the occurrence of a horizontal gradient of salt concentration. The only relevant proposal known to the Author is the turbulent diffusion model applied by the Sandia National Laboratories in the Sansmic Model (Russo 1981, 1983). That model is based on the analysis of gravitational instabilities of (Morton et al. 1956) and (Plesset and Whipple 1974), with the empirical coefficients selected on the basis of the investigation of salt transport in vertical boreholes and brine inflow into fresh water aquifers (Knapp and Podio 1979, Russo 1983):

l – lokalny zasięg turbulencji [m], określony poniższym wzorem:

$$l = \left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^{3/4} \left(\frac{2v^2\rho}{g\frac{d\rho}{dx}}\right)^{1/4} \quad (15)$$

gdzie:

α – współczynnik empiryczny przyjęty dla Sansmic jako równy 0,064, z zastrzeżeniem, że bywa też podawany jako bliski 0,08,

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²],

v – kinematyczna lepkość solanki w kawernie [m²/s].

W warunkach panujących w kawernie poziomej, lokalny zasięg turbulencji wyliczony wzorem (15) jest rzędu 10-20 cm, czyli jest stale mniejszy od pół-szerokości kawerny. Można więc wzór (14) uprościć następująco:

$$D_{tur} = D_0 v \left(\left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^3 \frac{2\rho}{g\rho_w}\right)^{1/2} \quad (16)$$

Wyliczone w ten sposób wartości są rzędu 0,06 m²/s, a więc znacznie wyższe, niż stała dyfuzji molekularnej. Czy jednak wzór (14) jest stosowalny w warunkach przepływu poziomego? Intuicyjnie się wydaje, że turbulencja wywołana gradientem stężenia powinna mieć większe znaczenie niż pochodząca od burzliwości przepływu. Współczynnik dany wzorem (16) jest niemal stały. W praktyce efekt jego działania wydaje się taki, jakby przepływ soli odbywał się z nieco niższą prędkością niż przepływ wody. Może więc rola dyfuzji turbulentnej mimo wszystko nie jest aż tak istotna?

Należy ostrzec, że w pracy (Li i inni, 2020) podano równanie transportu w następującej postaci:

$$C_{i-1}Q_{i-1} - C_iQ_i + \rho \frac{dV_i}{dt}(1 - u_i) = \frac{d(C_iQ_i)}{dt}$$

gdzie:

C – stężenie [kg/m³],

Q – przepływ [m³/s],

u – udział części nierozpuszczalnych (p_n) [-]

V – objętość plastra kawerny (łącznie z zasypem) [m³],

ρ – gęstość skały solnej [kg/m³],

wskaźnik $i-1$ odnosi się do solanki wpływającej z poprzedniego plastra, wskaźnik i dotyczy bieżącego plastra.

Wzór jest ewidentnie błędny, choćby z uwagi na niezgodność jednostek prawej i lewej strony równania. Powinno się go poprawić, zastępując po prawej stronie pochodną Q_i przez V_i . Warto zauważyć, że dyfuzja turbulentna jest w nim pominięta.

Błędna jest również podana tam formuła dla brzegowego bloku z zatłaczaniem:

$$\frac{\partial(V_{in}C_{in})}{\partial t} = QC_0 + \rho \frac{\partial V_{in}}{\partial t}(1 - u_{in}) - \left(Q - \frac{\partial V_{in}}{\partial t}\right)C_{in}$$

gdzie:

V_{in} , C_{in} – objętość i stężenie w brzegowym bloku zatłaczania,

Q , C_0 – wydajność i stężenie zatłaczanego medium ługującego,

The turbulent diffusion coefficient proposed by Russo is the following:

$$D_{tur} = D_0 \left(\frac{1}{\rho_w} \frac{d\rho}{dx}\right)^{1/2} \min(y^2, l^2) \quad (14)$$

Where:

D_0 – empirical constant, amounting to ca. 17.5 m²/s (31.7 ft²/s),

ρ_w – water density, ca. 1,000 kg/m³,

y – local semi-width of the cavern [m],

l – local length of turbulent mixing [m], determined by the following formula:

$$l = \left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^{3/4} \left(\frac{2v^2\rho}{g\frac{d\rho}{dx}}\right)^{1/4} \quad (15)$$

Where:

α – empirical coefficient assumed for the Sansmic Model, equal to 0.064, with the reservation that some authors claim that it is rather close to 0.08,

g – gravity acceleration [m/s²],

v – kinematic viscosity of brine in the cavern [m²/s].

In the conditions existing in the horizontal cavern, a local length of turbulence, calculated by Formula (15) amounts to the order of 10-20 cm, so it is constantly shorter than a half width of the cavern, maybe except for the initial moments of leaching. Thus, Formula (14) can be simplified as follows:

$$D_{tur} = D_0 v \left(\left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^3 \frac{2\rho}{g\rho_w}\right)^{1/2} \quad (16)$$

The values calculated in that way amount to the order of 0.06 m²/s, so they are much higher than the value of the molecular diffusion constant. Is, however, Formula (14) applicable in the conditions of horizontal flow? It seems intuitively that turbulence evoked by the salt concentration gradient should be more significant than that originating from flow turbulence. The coefficient described by Formula (16) is almost constant. In practice, however, the effect of its operation seems to be such as if salt flow was running at a slightly lower rate than the water flow rate. So maybe, the role of turbulent diffusion is not that essential, after all?

We should warn the readers here that (Li at al. 2020) quoted the transport equation in the following form:

$$C_{i-1}Q_{i-1} - C_iQ_i + \rho \frac{dV_i}{dt}(1 - u_i) = \frac{d(C_iQ_i)}{dt}$$

Where:

C – salt concentration [kg/m³],

Q – flow rate [m³/s],

u – insolubles content (p_n) [-]

V – cavern block (“slice”) volume (including sump) [m³],

ρ – rock salt density [kg/m³],

$i-1$ – refers to brine outflowing from the previous cavern slice, while i concerns the current slice.

The above formula is obviously wrong, at least owing to the inconsistency of the units on both sides of the equation. The formula should be corrected by the replacement of Q_i by

u_m – udział części nierozpuszczalnych [-],
 ρ – gęstość skały solnej [kg/m³].

Główny błąd polega na nieprzemnożeniu pochodnej w ostatnim wyrazie przez współczynnik kontrakcji, w efekcie kontrakcja jest 1, czyli 100%. Prócz tego i tutaj dyfuzja turbulentna jest pominięta, zaś pochodne powinny być zwyczajne, a nie cząstkowe.

Podsumowanie:

W modelu jednowymiarowym równania się znacznie upraszczają. W każdym bloku aproksymacyjnym obowiązują dwa równania: równanie transportu, z którego wynika stężenie w bloku i równanie ciągłości, z którego wynika wydajność odpływu z bloku.

W modelu zaniedbano transport części nierozpuszczalnych wzdłuż kawerny.

Aproksymacyjne bloki są liniowe, z wyjątkiem brzegowych bloków.

Blok brzegowy nad punktem podawania wody jest sumą osiowo-symetrycznego bloku z dodatkową objętością pochodzącą z plastrów rozługowanych zanim je zagarnęła część osiowo-symetryczna.

Blok brzegowy nad punktem odbioru solanki, o ile nie jest to kawerna dosycająca, jest na ogół blokiem półobrotowym, rozługowuje się wolniej, niż przylegające do niego plastry.

Otwarta pozostaje rola dyfuzji turbulentnej, jak też formuł ją opisujących.

4. ALGORYTM MODELU KAWERNY POZIOMEJ

Kawerna składa się z bloków aproksymacyjnych. Poza blokami brzegowymi są to pionowe bloki płaskie („plastry”) o jednakowej grubości określonej przez krok aproksymacyjny Dx . Kontur każdego takiego bloku, a ściślej dwa półkontury, aproksymuje się linią łamaną, podobnie jak półkontur kawerny pionowej. Bloki brzegowe są częściowo półobrotowe, w części zaś są kombinacją bloków płaskich z blokiem półobrotowym.

Rozwój kawerny odbywa się w krokach czasowych. Krok czasowy musi spełniać dwa warunki stabilności. Pierwszy z nich to typowy warunek Couranta-Friedrichsa-Lewy’ego:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_i} = \frac{V_i}{Q_i} \quad (17)$$

gdzie:

Δt - krok czasu,

Δx - krok długości,

v_i - prędkość przepływu w i -tym plastrze,

V_i - objętość i -tego plastra,

Q_i - natężenie przepływu przez i -ty plaster.

Drugi warunek to warunek stabilności szybkości ługowania w pojedynczym kroku czasowym. Wymaga on ograniczenia zmienności stężenia. Można go zapisać następująco:

V_i on the right hand side under the derivative. It is worth noticing that turbulent diffusion is missing in that formula.

Besides, the formula of the boundary block, with water injection, is also wrong in the paper in question:

$$\frac{\partial(V_{in}C_{in})}{\partial t} = QC_0 + \rho \frac{\partial V_{in}}{\partial t} (1 - u_{in}) - \left(Q - \frac{\partial V_{in}}{\partial t}\right) C_{in}$$

Where:

V_{in}, C_{in} – volume and concentration in the boundary block of water injection,

Q, C_0 – capacity and concentration of the injected leaching medium,

u_m – insolubles content [-],

ρ – rock salt density [kg/m³].

The main error there consists in the failure to multiply the derivative of the last term by the contraction coefficient, and, as a result, contraction equals to 1, or 100%. In addition, also here, turbulent diffusion was omitted, while derivatives should be ordinary, not partial.

Summary

In the unidimensional model, equations are considerably simplified. Two equations apply to each approximation block: salt transport equation, from which salt concentration in the block results, and continuity equation, from which the capacity of the outflow from the block results.

In the model under discussion, transport of insolubles along the cavern has been neglected.

Approximation blocks are linear, with the exception of boundary blocks.

The boundary block situated above the water injection point is a total of axially symmetrical block, plus the additional volume originating from the linear blocks (slices) leached before the blocks have been covered by the axially symmetrical portion.

The boundary block situated above the brine collection point is generally a semi-rotational block if it is not the saturating cavern. Leaching there is slower than in the adjacent slices.

The role of turbulent diffusion remains open, similarly to the relevant formulas.

4. HORIZONTAL CAVERN MODEL ALGORITHM

The horizontal cavern model is composed of approximation blocks. In addition to the boundary blocks, there are also linear blocks (slices) of uniform thickness, determined by the approximation step Dx . The contour of each such block, or to be exact: two semi-contours, is approximated by the broken line (polyline), similarly to the situation in the semi-contour of the vertical cavern. The boundary blocks are partly semi-rotational and partly a combination of linear and semi-rotational block.

The development of the cavern takes place in time steps. Each time step must satisfy two stability conditions. The first one is a typical Courant-Friedrichs-Lewy condition:

$$\alpha (C_N - C) \leq (C_N - C') \leq (C_N - \alpha C) \quad (18)$$

gdzie:

C_N – stężenie solanki nasyconej [kg/m³],

C, C' – stężenie na początku i na końcu kroku czasowego Δt w plastrze zawierającym but rury wodnej [kg/m³],

α – współczynnik ograniczający, pomiędzy zero a jeden, blisko zera ograniczenie jest słabe, blisko jedynki bardzo silne; w algorytmie UBRO zastosowano 0,5.

Prawa nierówność jest praktycznie zawsze spełniona, jeśli spełniony jest warunek (17). Lewa nierówność daje istotne ograniczenie, zwłaszcza gdy przepływ przez kawernę jest niewielki lub go brak (przerwa w zatłaczaniu). Ponieważ C' nie jest znane a priori, trzeba posłużyć się przybliżeniem. Warunek (18) wystarczy zbadać w bloku brzegowym. Jeśli zaniedbać przepływ przez kawernę i dyfuzję turbulentną, otrzyma się przybliżenie:

$$C' \approx \frac{C + \frac{\Delta V}{V}(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1))}{1 + \frac{\Delta V}{V}(1 - w_r p_n)} \quad (19)$$

gdzie oznaczenia, jak we wzorach (9-13).

Lewa nierówność z (18) przy podstawieniu (19) prowadzi do warunku:

$$\Delta t \leq \frac{V}{\omega S} \frac{(C_N - C)(1 - \alpha)}{(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1) - C_N(1 - \alpha)(1 - w_r p_n) - \alpha C(1 - w_r p_n))} \quad (20)$$

gdzie:

ω – szybkość ługowania w kierunku stropowym, przy stężeniu C [m/s],

S – powierzchnia podlegająca ługowaniu [m²].

Ponieważ dokładne wyznaczenie S jest w praktyce uciążliwe, dla ograniczenia kroku czasowego od góry, można zastosować:

$$\frac{H}{8} \leq \frac{V}{S} \quad (21)$$

gdzie:

H – wysokość kawerny w bloku brzegowym (zatłaczania) [m].

Kolejne ograniczenie na krok czasowy wynika ze schematu aproksymacyjnego dyfuzji. Ma ono postać:

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{2 D_{tur}} \quad (22)$$

Jak się okazuje, dla komór poziomych, zastosowanie wzoru (16) na współczynnik dyfuzji, prowadzi do decydującej roli warunku (22), a kroki czasowe, do jakich prowadzi są zwykle poniżej minuty (choć zależy to od wielkości kroku przestrzennego). Warunek (17) najczęściej dopuszcza kroki czasowe rzędu kilkunastu minut (choć zależy to od wydajności i rozmiarów kawerny). Natomiast rozpatrywanie warunku (20) chyba można pominąć, jego ograniczenia są od pół godziny do kilku godzin.

W każdym kroku czasowym, w każdym z plastrów i bloków brzegowych, najpierw wyznacza się przemieszczenie

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_i} = \frac{V_i}{Q_i} \quad (17)$$

Where:

Δt – time step,

Δx – length step,

v_i – flow rate at the i -th slice,

V_i – volume of the i -th slice,

Q_i – rate of flow through the i -th slice.

The second condition consists in the stability of leaching rate, in a single time step. The condition imposes a limitation on the concentration change over a time step. It can be written down as follows: follows:

$$\alpha (C_N - C) \leq (C_N - C') \leq (C_N - \alpha C) \quad (18)$$

Where:

C_N – concentration of the saturated brine [kg/m³],

C, C' – concentration at the beginning and at the end of the time step Δt in the slice containing the water pipe shoe [kg/m³],

α – limiting coefficient between zero and one; if the coefficient is close to zero, the limitation is poor; if the coefficient is close to one, the limitation is strong; the UBRO algorithm uses the value of 0.5.

The right hand side inequality is practically almost always satisfied provided that condition (17) has been satisfied. The left hand side inequality provides an essential limitation, especially when the rate of flow through the cavern is low, or none (interrupted water injection). Since C' is not known a priori, an approximation is required. It is sufficient to check condition (18) in the boundary block. If we neglect the rate of flow through the cavern and turbulent diffusion, we can obtain the following approximation:

$$C' \approx \frac{C + \frac{\Delta V}{V}(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1))}{1 + \frac{\Delta V}{V}(1 - w_r p_n)} \quad (19)$$

Where the symbols are the same as those in Formulas (9)–(13).

Upon substitution of formula (19), the left hand side inequality of formula (18) leads to the condition:

$$\Delta t \leq \frac{V}{\omega S} \frac{(C_N - C)(1 - \alpha)}{(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1) - C_N(1 - \alpha)(1 - w_r p_n) - \alpha C(1 - w_r p_n))} \quad (20)$$

Where:

ω – leaching rate directed towards the cavern roof, at the concentration of C [m/s],

S – surface area subjected to leaching [m²].

Since an exact determination of S is practically hard to attain, the following can be applied for an upper limit of the time step:

$$\frac{H}{8} \leq \frac{V}{S} \quad (21)$$

Where:

H – cavern height in the boundary block of the injection side [m].

konturów kawerny. Jest to procedura identyczna, jak w przypadku kawerny osiowo-symetrycznej, szczegółowo omówiona w (Urbańczyk, 2018).

Kolejną procedurą w kroku czasowym jest bilans objętości. Wykonuje się go dla każdego z plastrów kawerny oddzielnie. Dla bloków brzegowych przebiega on podobnie, jak dla kawerny osiowo-symetrycznej. W innym przypadku, objętość plastra, wylicza się mnożąc pole powierzchni poprzecznej plastra S przez jego grubość Dx .

Zaproksymowany pojedynczy przekrój poprzeczny kawerny składa się z szeregu trapezów złączonych podstawami jeden nad drugim.

Pole każdego trapezu liczy się wzorem:

$$S_i = (Y_i + Y_{i+1})(H_{i+1} - H_i) \quad (23)$$

gdzie:

H_i, Y_i – współrzędne (głębokość i półszerokość) górnej krawędzi trapezu

H_{i+1}, Y_{i+1} – współrzędne dolnej krawędzi trapezu

S_i – pole powierzchni tego trapezu

Ponieważ w profilu pionowym kawerny dopuszcza się zaleganie warstw soli o różnej zawartości części nierozpuszczalnych, dla umożliwienia właściwego bilansu tych części trzeba znać przyrosty objętości kawerny w poszczególnych warstwach solnych (na każdym profilu). Z tego powodu najlepiej w momencie obliczania objętości plastrów, uzupełnić łamaną $\{H(i), Y(i)\}$ punktami leżącymi na przecięciu się tej łamanej z granicami warstw solnych.

Przyrosty objętości poszczególnych plastrów liczone będą wzorem:

$$\Delta V_j = V'_j - V_j = \Delta x (\sum_{i=1}^{M'} S'_i - \sum_{i=1}^M S_i) \quad (24)$$

gdzie:

V_j - objętość przekroju j w chwili t ,

V'_j - objętość przekroju j w chwili $t + \Delta t$,

S_i - pole i -tego trapezu w przekroju j w chwili t ,

S'_i - pole i -tego trapezu w przekroju j w chwili $t + \Delta t$,

M - ilość odcinków łamanej aproksymującej kontur j (trapezów) w chwili t , powiększona o dodane punkty (h_a, y_a) ,

M' - ilość odcinków łamanej aproksymującej kontur j (trapezów) w chwili powiększona o dodane punkty (h_a, y_a) ,

Całkowita objętość kawerny wyrazi się wzorem:

$$V = V_{in} + \sum_{j=2}^{N-1} V_j + V_{out} \quad (25)$$

gdzie:

V_j - objętość przekroju j w chwili t ,

V_{in} - objętość pierwszego plastra (liczona inaczej),

V_{out} - objętość ostatniego plastra (liczona inaczej),

N - ilość plastrów aproksymujących kawernę.

Aby rozwiązanie równań zaproksymowanych było zbliżone ze ścisłym rozwiązaniem, potrzeba, aby dodatkowo schemat aproksymacji był zachowawczy, tzn. by prawa zachowa-

Another limitation imposed on the time step results from the approximation scheme of diffusion. Its form is the following:

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{2 D_{tur}} \quad (22)$$

It turns out that if formula (16) of the diffusion coefficient was applied in the case of horizontal caverns, condition (22) would usually play a decisive part, with consequential time steps amounting to less than one minute usually (although that would depend on the size of the spatial step as well). Condition (17) usually allows for time steps of the order of a dozen of minutes (although that would depend on the cavern capacity and size). However, consideration of condition (20) may probably be omitted, as its limitation ranges from half an hour to several hours.

First, the displacement of cavern contours is determined in each time step, for all slices, and boundary blocks. That procedure is the same as in the case of the axially symmetrical cavern, discussed in detail in (Urbańczyk 2018).

The volume balance is the next procedure performed in the time step. That is carried out for each of the cavern slices separately. In the case of boundary blocks, the procedure is similar to that in the case of the axially symmetrical cavern. Otherwise, the slice volume is calculated by multiplying the area S of the transverse surface of slice by its thickness Dx .

A single approximated transverse cross-section of the cavern is composed of a series of trapezoids, connected with their bases, one on top of the other.

The field of each trapezoid is calculated by the following formula:

$$S_i = (Y_i + Y_{i+1})(H_{i+1} - H_i) \quad (23)$$

Where:

H_i, Y_i – coordinates of the upper edge of the trapezoid (depth and semi-width),

H_{i+1}, Y_{i+1} – coordinates of the lower edge of the trapezoid,

S_i – area of the trapezoid surface,

Since it is admissible for the vertical profile of the cavern to contain salt layers with various content of insolubles, to obtain a proper balance of those parts, one must know the cavern volume increases in particular salt layers, in each profile. For that reason, it is the best to supplement the broken line (polyline) $\{H(i), Y(i)\}$ with the points lying on the intersection of the polyline with the salt layer boundaries.

The volume increases of the particular slices are calculated by the following formula:

$$\Delta V_j = V'_j - V_j = \Delta x (\sum_{i=1}^{M'} S'_i - \sum_{i=1}^M S_i) \quad (24)$$

Where:

V_j – volume of the cross-section j at the moment t ,

V'_j – volume of the cross-section j at the moment $t + \Delta t$,

S_i – area of the i -th trapezoid in the cross-section j at the moment t ,

S'_i – area of the i -th trapezoid in the cross-section j at the moment $t + \Delta t$,

wania masy i objętości były po aproksymowaniu spełnione równie ściśle jak przed nią. Stąd zaproksymowane równania muszą stanowić odpowiednie bilanse soli i natężenia przepływu.

Równanie (7) prowadzi do następującego bilansu masy soli:

$$C'_j(V_j + \Delta V_j) = C_j V_j + (Q_{j-1} C_{j-1} - Q_j C_j) \Delta t + D V_j \Delta t \frac{C_{j-1} - 2C_j + C_{j+1}}{\Delta x^2} + \sum_{k=1}^L \rho_{zL,k} \Delta V_{kj} (1 - p_{n,k}) \quad (26)$$

gdzie:

C'_j – stężenie w plastrze j w chwili $t + \Delta t$,

C_j – stężenie w plastrze j w chwili t ,

V_j – objętość plastra j w chwili t ,

ΔV_j – przyrost objętości plastra j w kroku czasowym Δt ,

Q_j – natężenie przepływu z plastra j do plastra $j+1$,

D – współczynnik dyfuzji turbulentnej,

$p_{n,k}$ – zawartość części nierozpuszczalnych w skale solnej w warstwie k ,

$\rho_{zL,k}$ – gęstość skały solnej w warstwie k ,

ΔV_{kj} – przyrost objętości j -go plastra kawerny w obrębie k -tej warstwy solnej,

j – wskaźnik numerujący plastry kawerny (ilość - N),

k – wskaźnik numerujący warstwy solne (ilość - L),

Równanie (10) prowadzi do następującego bilansu natężenia przepływu:

$$Q_j = Q_{j-1} - \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} (1 - p_{n,k}) \left(1 - \frac{\rho_{zL,k}}{\rho_{sr}}\right) \quad (27)$$

gdzie:

ρ_{sr} – gęstość soli rozpuszczonej w solance (masa soli na różnicę objętości solanki i czystej wody).

W każdym kroku czasowym z wyługowanej w obrębie danego plastra kawerny skały solnej uwalniane są również części nierozpuszczalne. Części te, jeżeli nie założy się inaczej, odkładają się na dnie kawerny, w tym samym plastrze, z pewnym rozluźnieniem. Zanedbuje się przy tym ich transport poziomy.

Objętość części nierozpuszczalnych odkładających się na dnie plastra j , w kroku czasowym można wyrazić wzorem:

$$\Delta V_{N,j} = w_r \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} p_{n,k} \quad (28)$$

gdzie oznaczenia jak w poprzednim wzorze.

Na podstawie tej objętości, w każdym kroku czasowym wyliczać się będzie w poszczególnych plastrach aktualny poziom zasypu.

W oparciu o powyższe równania opracowano algorytm obliczeń, działający wg następującego schematu:

- 1° określa się początkowy kształt kawerny (otwór wiertniczy lub kawernę już nieco rozlęgowaną),
- 2° określa zasięg modelu, zadaje się krok aproksymacji długości i tym samym dzieli model na „plastry”, a także krok

M – number of the sections of the polyline that approximates the contour j of the trapezoids at the moment t , increased by added points (h_a, y_a) ,

M' – number of the sections of the polyline that approximates the contour j of the trapezoids at the moment, increased by added points (h_a, y_a) ,

The total volume of the cavern is expressed by the following formula:

$$V = V_{in} + \sum_{j=2}^{N-1} V_j + V_{out} \quad (25)$$

Where:

C'_j – concentration in the slice j at the moment $t + \Delta t$,

C_j – concentration in the slice j at the moment t ,

V_j – volume of the slice j at the moment t ,

ΔV_j – volume growth of the slice j at the time step Δt ,

Q_j – flow intensity from the slice j to the slice $j+1$,

D – turbulent diffusion coefficient,

$p_{n,k}$ – insolubles content in rock salt in the layer k ,

$\rho_{zL,k}$ – rock salt density in the layer k ,

ΔV_{kj} – volume increase of the j -th cavern slice, within the k -th salt layer,

j – index numbering the cavern slices (quantity: N),

k – index numbering the salt layers (quantity: L),

Equation (10) leads to the following flow intensity balance:

$$Q_j = Q_{j-1} - \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} (1 - p_{n,k}) \left(1 - \frac{\rho_{zL,k}}{\rho_{sr}}\right) \quad (27)$$

Where:

ρ_{sr} – density of salt dissolved in brine (salt mass per the difference of brine volume minus fresh water volume).

In each time step, insolubles are released out of rock salt of the cavern being leached, within the given slice. When no other assumption is made, the insolubles are deposited on the cavern bottom, within the same slice, with a certain loosening. Thus, horizontal transport of the insolubles between slices is neglected here.

The volume of insolubles, deposited on the bottom of the slice j , at the time step, can be expressed by the following formula:

$$\Delta V_{N,j} = w_r \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} p_{n,k} \quad (28)$$

The meanings of the symbols are the same as those in the previous formula.

Based on this volume, a current level of the sump filed with the insolubles will be calculated in each slice and at each time step.

Based on the equations given above, a calculation algorithm was developed. It works in accordance with the following scheme:

1° Determine the initial cavern shape (the well or the cavern being partially leached).

2° Determine the range of the model; select the step for length approximation, and thus divide the model into slices;

aproxymacji wysokości, w którym zróżnicowane mogą być własności soli,

- 3° zadaje się początkowy rozkład stężenia (w przypadku startu od otworu jest on mało istotny),
- 4° zadaje się własności ługownicze skały solnej i związane z nimi parametry, jak temperatura, gęstość skały solnej, udział części nierozpuszczalnych oraz współczynnik ich rozluźnienia podczas depozycji na dnie kawerny,
- 5° zadaje się dodatkowe parametry empiryczne modelu,
- 6° wprowadza się parametry etapu ługowania: wydajność tłoczenia medium ługującego, jego stężenie, ew. położenie punktu tłoczenia wody, oraz warunek określający długość etapu ługowania,
- 7° wykonuje się wielokrotnie, aż do spełnienia warunku długości etapu następujące kroki:
 - 7.1 wyznacza się długość kroku czasowego spełniającego warunki (17) i (22), nie przekraczającego jednak zadanego z góry maksimum,
 - 7.2 wyznacza się przemieszczenie brzegu kawerny w danym kroku czasowym, na podstawie stężenia sprzed danego kroku czasowego, stosując reguły opisane w cz. III (Kunzman, Urbańczyk, 2018),
 - 7.3 wykonuje się bilans objętości i ustala objętości wyługowane w poszczególnych segmentach plastrów kawerny w ciągu danego kroku czasowego, wg (24),
 - 7.4 wykonuje się bilans soli i części nierozpuszczalnych, wg (26)–(28) w poszczególnych plastrach kawerny i na tej podstawie ustala rozkład stężenia wzdłuż kawerny panujący po danym kroku czasowym,
- 8° punkty 6° i 7° powtarza się w miarę potrzeby, aż cały proces ługowania zostanie zasymulowany.

Podsumowanie

Aproxymacja prowadzi do bilansów masy soli, objętości solanki i części nierozpuszczalnych.

Bilanse są podobne, jak w przypadku kawerny osiowo symetrycznej, jest ich jednak więcej, objętości typowych plastrów składają się z szeregu segmentów o konturze trapezu i grubości kroku aproxymacyjnego.

Kolejność bilansów w kroku czasowym jest podobna, jak dla kawerny osiowo-symetrycznej. Występują podobne ograniczenia na długość kroku czasowego.

select the step for height approximation, where rock salt properties can be diversified.

3° Determine the initial distribution of salt concentration (it is not important if the initial shape is the well).

4° Determine the leaching properties of rock salt and the related parameters, e.g. temperature, rock salt density, insoluble content, and the loosening coefficient for insolubles deposition in the sump.

5° Determine the additional empirical parameters of the model.

6° Introduce the leaching stage parameters: leaching medium injection capacity, leaching medium concentration, possibly the location of the water injection point, and the condition determining the leaching stage duration.

7° Perform the following steps repeatedly until the leaching stage duration condition has been satisfied:

7.1 Determine the time-step duration that satisfies conditions (17) and (22); however, not exceeding the predetermined maximum value.

7.2 Determine the displacement of the cavern contours in the given time step, on the basis of salt concentration preceding that time step, applying the rules described in Part III of the paper (Kunzman and Urbańczyk 2018).

7.3 Complete the volume balance and determine the volumes leached in particular slice segments during the given time step, in accordance with formula (24),

7.4 Complete the balance of salt and of insolubles, in accordance with formulae (26)–(28) in particular slices of the cavern, and, on that basis, determine the distribution of concentration along the cavern, after the given time step.

8° Repeat Items 6° and 7° as necessary until the entire leaching process has been fully simulated.

Summary

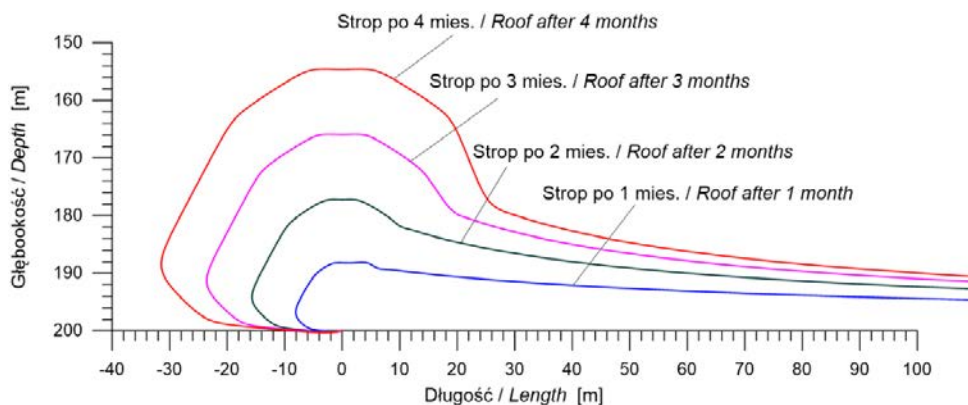
Approximation leads to obtaining the balances of salt mass and of brine, as well as of insolubles volumes.

The balances are similar to those of the axially symmetrical cavern; however, there are more of them here since the volumes of typical slices are composed of a number of segments, with trapezoidal contour, and the thickness of the approximation step.

The sequence of balances in a time step is similar to that of the axially symmetrical cavern. Similar limitations of the time step duration also apply here.

5. SELECTED RESULTS OF THE HORIZONTAL CAVERN LEACHING ACCORDING TO THE HORSALT MODEL

The model described above is called the HORSALT model. To learn how it operated, the model was practically implemented in 2004. However, it was not possible to compare the model prediction with an actual leaching process, since hori-



Ryc. 9. Przekrój wzdłuż kawerny poziomej dla 4 chwil wg modelu HORSALT.

Fig. 9. Longitudinal cross-section of the horizontal cavern, for 4 moments of leaching, according to the Horsalt model.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI ŁUGOWANIA KAWERNY HORYZONTALNEJ WG MODELU HORSALT

Opisany powyżej model nazwano HORSALT. Dla zorientowania się, jak model działa, wykonano w 2004 roku roboczą implementację modelu. Nie było możliwości porównania przewidywań modelu z rzeczywistym ługowaniem, gdyż nie wykonuje się w Polsce kawern poziomych. Z tego też powodu zaniechano wówczas dalszych prac.

Poniżej będą pokazane wyniki jednego z testów modelu.

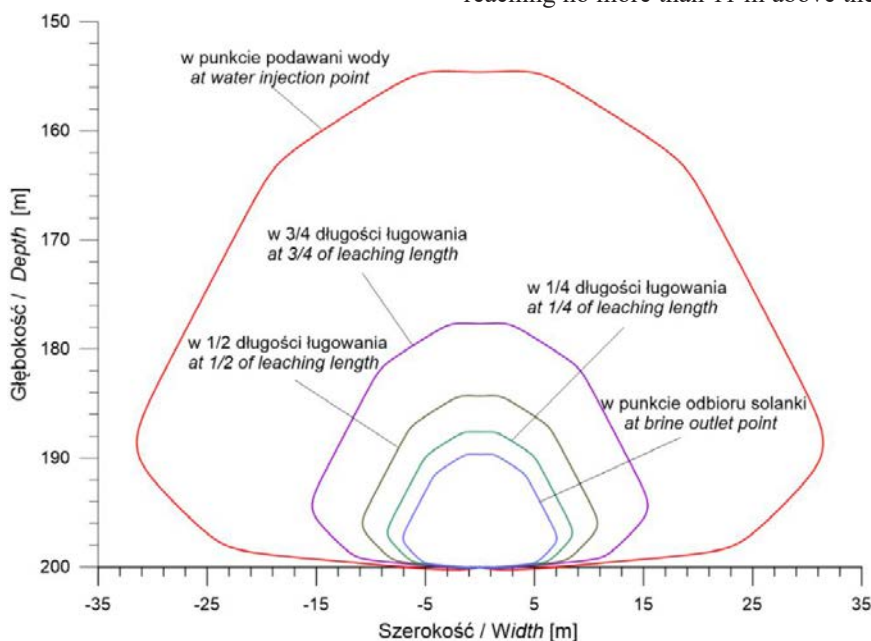
Przyjęto, że wysokość kawerny nie może przekraczać 50 m, zaś ługowany odcinek poziomego otworu będzie miał długość 100 m. Zastosowano aproksymacyjny krok 2 m wzdłuż osi poziomej kawerny. Przyjęto również, że pokład soli ma jednorodne własności ługownicze, przy czym nominalna szybkość ługowania w kierunku poziomym wynosi 8 mm/h, zaś w kierunku pionowym - 12 mm/h. Udział części

zonalnej kawerny nie było leżonej w Polsce w tym czasie. W związku z tym prace zostały przerwane.

Wyniki jednego z testów modelu są przedstawione poniżej.

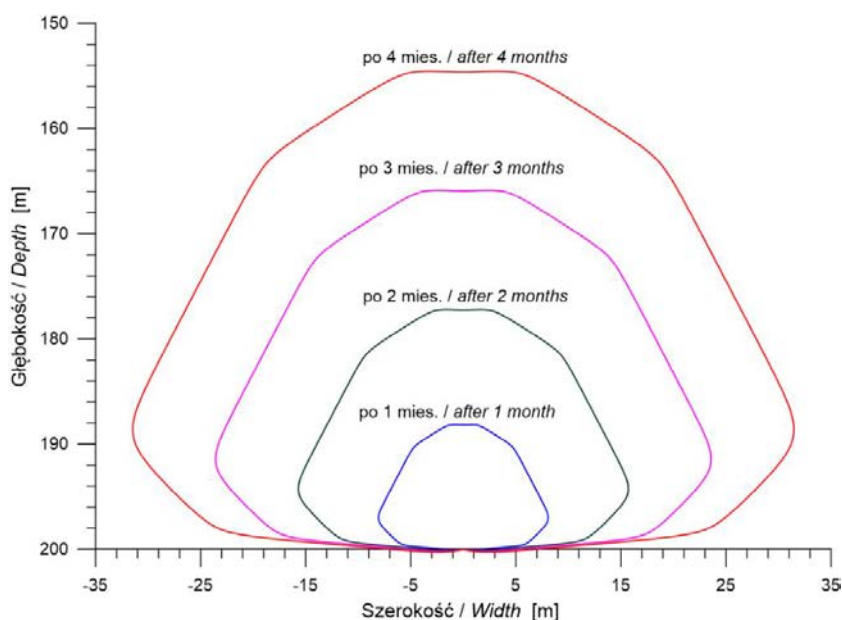
Przyjęto, że wysokość kawerny nie może przekraczać 50 m, zaś ługowany odcinek poziomego otworu będzie miał długość 100 m. Zastosowano aproksymacyjny krok 2 m wzdłuż osi poziomej kawerny. Przyjęto również, że pokład soli ma jednorodne własności ługownicze, przy czym nominalna szybkość ługowania w kierunku poziomym wynosi 8 mm/h, zaś w kierunku pionowym - 12 mm/h. Udział części

Water injection was modelled with the capacity of 120 m³/h. It was found that the cavern roof reached a 50 m height after only 142 days, although above the water injection point only. Farther beyond, the cavern roof dropped quickly, reaching no more than 11 m above the brine collection point.



Ryc. 10. Dysproporcja rozwoju kawerny poziomej. Przekroje poprzeczne w różnych odległościach od podawania wody po 120 dniach ługowania, wg modelu HORSALT.

Fig. 10. Disproportions in the horizontal cavern development. Transverse cross-sections at several distances from the water injection point after 120 days of leaching, according to the HORSALT model.



Ryc. 11. Rozwój kawerny poziomej w przekroju poprzecznym przez położenie punktu podawania wody wg modelu HORSALT.
Fig. 11. Horizontal cavern development in the cross-section through the water injection point, according to the HORSALT model.

nierozpuszczalnych w skale solnej przyjęto za 2%. Dyfuzję turbulentną w tym teście, dla uproszczenia, pominięto.

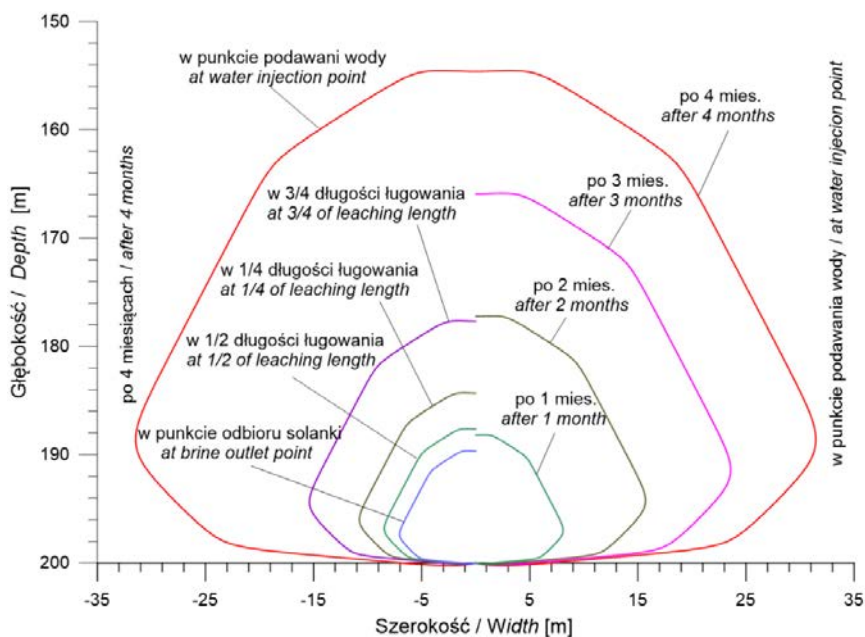
Zamodelowano tłoczenie wody z wydajnością 120 m³/h. Okazało się, że strop już po 142 dniach osiągnął 50 m, ale jedynie ponad punktem podawania wody. Dalej strop dość szybko opada, a nad miejscem poboru solanki kawerna ma wysokość jedynie 11 m. Widać to na Ryc. 9, przedstawiającej przekrój wzdłuż kawerny w wybranych chwilach lugowania.

Widać, że model numeryczny oddaje (co najmniej jakościowo) nierównomierność rozwoju kształtu kawerny, jaka jest w praktyce obserwowana i która jest głównym problemem przy lugowaniu komór poziomych, o czym wiadomo

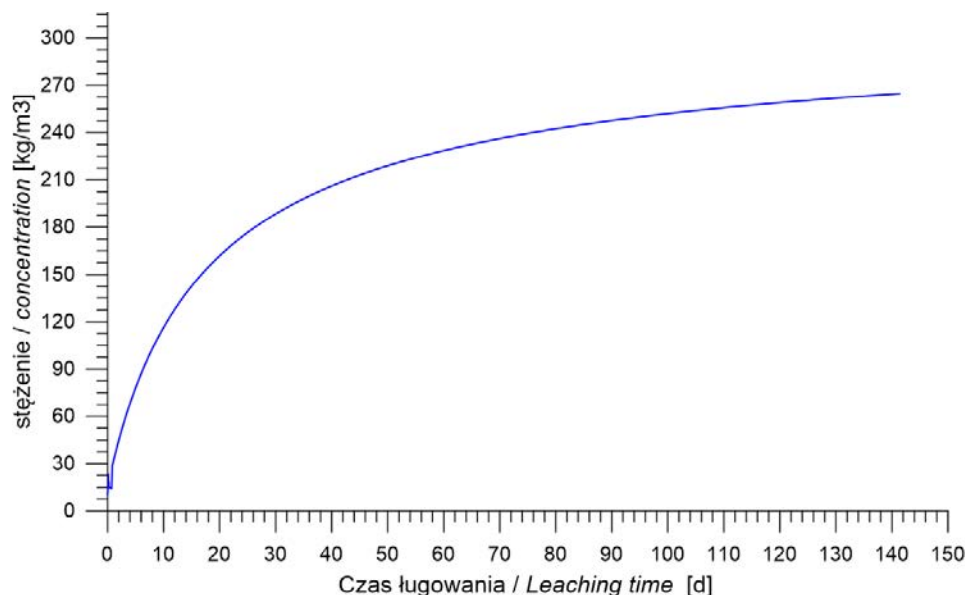
That can be noticed in Fig. 9, presenting the longitudinal cross-section of the cavern at the selected moments of leaching.

It can be noticed that the numerical model reflects the uneven development of the cavern shape (at least qualitatively), which is also observed in real leaching and that presents the main problem in horizontal cavern leaching of which we know from private communications with the representatives of the companies that have attempted to leach such a type of cavern.

The disproportions in the horizontal cavern development are even more distinct in the next figure (Fig. 10), presenting the transverse cross-sections of the cavern, projected on one



Ryc. 12. Porównanie: rozwój kawerny wzdłuż a rozwój w czasie.
Fig. 12. Comparison: longitudinal cavern development vs. development in time.



Ryc. 13. Stężenie solanki otrzymywanej z kawerny horyzontalnej wg modelu HORSALT.

Fig. 13. Concentration of brine obtained from the horizontal cavern leaching, according to the HORSALT model.

z nieoficjalnych rozmów z przedstawicielami firm próbujących ługować takie kawerny.

Jeszcze wyraźniej można dysproporcję rozwoju kawerny zaobserwować na kolejnym rysunku (Ryc. 10) przedstawiającym w rzucie na jedną płaszczyznę przekroje poprzeczne przez kawernę w czterech miejscach: przez punkt podawania wody, w 1/4 długości ługowania, w połowie długości ługowania, w trzech czwartych długości ługowania i w punkcie odbioru solanki.

Natomiast ogólny kształt poszczególnych konturów jest typowy i nie odbiega od tego, jakiego należałoby oczekiwać w jednorodnym złożu soli. Warto też zauważyć, że w konkretnym przekroju poprzecznym kawerna przyrasta w czasie dość równomiernie, co pokazuje ryc. 11.

Różnice między rozwojem kawerny w czasie, widać najlepiej, gdy zestawia się półprofile obu rozwojów obok siebie (ryc. 12). Widać, że po czterech miesiącach ługowania, rozmiary kawerny w jej końcowej części są mniejsze, niż w strefie podawania wody po miesiącu.

Stężenie solanki otrzymywanej z kawerny poziomej narasta w czasie, jak pokazano na ryc. 13. Ogólnie w dalszej części kawerny jest ono zbyt wysokie, by wyrównać dysproporcje kawerny, ale też nie dosyć się do stężenia przemysłowego, gdyż powierzchnia kawerny w dalszych sektorach jest zbyt mała.

Wyniki obliczeń zgadzają się jakościowo z tym, co wiadomo na temat ługowania kawern poziomych. Zgodności ilościowej autor nie jest w stanie określić, nie dysponując danymi empirycznymi z przebiegu ługowania konkretnych kawern.

plane, at four places: across the water injection point, at 1/4 of the leaching length, in the middle of the leaching length, at 3/4 of the leaching length, and at the brine collection point.

The shape of contour is typical and does not differ from that which could be expected to develop in a uniform salt deposit. It is worthwhile mentioning that the cavern grows quite evenly in time on a particular transverse cross-section, as visible in Fig. 11.

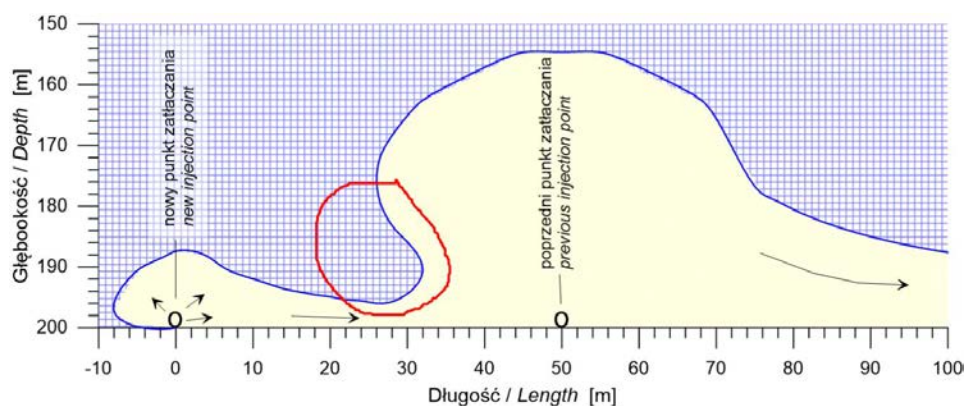
Such differences between the longitudinal cavern development and the cavern development in time can be seen the best when we juxtapose the semi-profiles of both types of development (Fig. 12). One can see that the size of the cavern in its rear section after four months of leaching is smaller than the cavern size at the water injection point after a month of leaching.

The concentration of brine, obtained from the horizontal cavern, grows in time, as shown in Fig. 13. Generally, the concentration is too high in the rear sections of the cavern to equalise the cavern shape disproportions, although the saturation does not reach the industrial salt concentration level because the cavern surface area is too small in its rear sections.

The results of our calculations comply, in respect of quality, with our knowledge about horizontal cavern leaching. The Author is unable to determine the quantitative compliance, without obtaining empirical data concerning the course of leaching in specific caverns.

Summary

Our model reflects properly the properties of horizontal caverns, especially the strong upward development above the water injection point.



Ryc. 14. Sytuacja, której nie da się zamodelować modelem HORSALT.

Fig. 14. The case that cannot be modelled with the HORSALT model.

Podsumowanie:

Model oddaje we właściwy sposób cechy kawern poziomych, zwłaszcza silny rozwój kawerny w górę, ponad miejscem podawania wody.

Do stwierdzenia ilościowej zgodności z przebiegiem ługowania kawern rzeczywistych, konieczne są dane empiryczne z ługowania kawern poziomych.

6. OGRANICZENIA OPISANEGO MODELU

Niewielkie są możliwości manewrowania rurami ługowniczymi poziomo-leżącymi, gdyż zostają one przysypane częściami nierozpuszczalnymi. Można próbować odwracania obiegu, a także w wariacie z kawerną dosycającą, cofania rury podającej wodę. Przez stopniowe cofanie buta rur wodnych można uzyskać bardziej równomierny strop kawerny.

Opisany tu model natrafi jednak na problemy, przy próbie użycia go do tego typu przypadków. Ilustruje to ryc. 14. Poza blokami półobrotowymi/obrotowymi, czyli pierwszym i ostatnim, strop kawerny ma być funkcją długości, nie może tej samej wartości współrzędnej odpowiadać parę wartości wysokości stropu. Na Ryc. 14. niedopuszczalne miejsce oznaczono czerwoną pętlą.

Prócz tego, podobnie jak w modelu kawerny ługowanej w otworze pionowym, w każdym z plasterów aproksymacyjnych półkontur musi być jednoznaczna funkcją głębokości (wysokości). Nie mogą w nim pojawiać się kominy ani kieszenie (por. Ryc.1. Urbańczyk, 2018).

7. UWAGI KOŃCOWE

Technologia ługowania kawerny poziomej nie jest jeszcze do końca rozpracowana.

Śledzenie rozwoju kawerny z użyciem echosondy najprawdopodobniej wymaga odwiercenia co najmniej jednego dodatkowego otworu.

Kontrola stropu kawerny przy użyciu medium izolacyjnego również wymaga dodatkowego otworu.

Empirical data concerning the course of actual horizontal cavern leaching are required to identify the quantitative compliance of the leaching process.

6. LIMITATIONS OF THE DESCRIBED MODEL

There is a limited possibility to handle the freely-lying leaching pipes because the pipes are covered by the insolubles. One can try to reverse the circulation, or withdraw the water injection pipe, in the option with a saturating cavern. A more even cavern roof can be obtained by gradual retraction of the water pipe shoe.

The model described here may, however, face certain problems when an attempt is made at applying it to the cases mentioned above. That is illustrated in Fig. 14. Apart from the semi-rotational/rotational blocks, i.e. the first and the last blocks, the cavern roof is to be a function of length. Several values of the roof height may not correspond to the same value of the coordinate. An inadmissible area is marked with red line in Fig 14.

Besides, similarly to the model of the vertically leached cavern, in each of the approximation slices, the semi-contour must represent a definitive function of depth (or height). No “chimneys” or “pockets” may appear there (cf. Fig. 1. in (Urbanczyk 2018)).

7. FINAL REMARKS

The horizontal cavern leaching technology has not been fully developed.

Cavern development monitoring by sonar will most probably require drilling at least one more well.

Cavern roof monitoring, with the use of blanket medium, also requires an additional well.

The cavern development process can be modelled with computer software, although to a limited degree as yet.

It is not clear to what extent it is necessary to take into account turbulent diffusion in a model, or what formulas should be used to describe such diffusion.

Tab. 1. Porównanie kawern pionowych i poziomych.

TYP KAWERNY	PIONOWA	POZIOMA
Kierunek sił ciężkości	równoległy do osi rozługowywanego otworu	prostopadły do osi rozługowywanego otworu
Rozwój kawerny	we wszystkich kierunkach wokół otworu, stanowiącego środek kawerny	jedynie w górę, otwór początkowy tworzy dno kawerny, szybko ulga zasypaniu przez części nierozpuszczalne
Symetria kawerny w złożu jednorodnym	osiowa	jedynie lustrzana
Dostęp do kawerny	od góry	z boku, na poziomie spągu
Manewry rurami	rury wolnowiszzące mogą być podnoszone lub opuszczane	rury "wolno-leżące", w razie przysypania można je jedynie cofnąć
Medium izolacyjne	można je dowolnie dotłaczać i spuszczać	na ogół można je dodać, ale nie można upuścić
Typy obiegu	obieg prawy lub lewy, zależnie którejdy tłoczy się wodę	jeden typ obiegu
Rozkład stężenia	gradient stężenia skierowany w dół, w obiegu lewym rzadzi nim adwekcja	zarówna pionowa jak i pozioma składowa jest możliwa
Części nierozpuszczalne	osadzają się na dnie	mogą być unoszone i przemieszczane w poziomie
Pomiary echosondą	łatwe	trudne, o ile w ogóle możliwe

Tab. 2. Porównanie modeli kawern pionowych i poziomych

TYP KAWERNY	PIONOWA	POZIOMA
Współrzędne przestrzenne	r - promień φ - azymut z - wysokość	x - długość y - szerokość z - wysokość
Ograniczenie	$r \geq 0$	
W przypadku symetrii	φ - bez znaczenia	$y \geq 0$
Kształt opisany jest przez	$r = R(z)$ pojedyncza funkcja dla danego czasu	$y_i = Y_i(z)$ szereg funkcji, w każdym przekroju dla danego czasu inna
Odcięta funkcji kształtu	równoległa do kierunku przepływu	normalna do kierunku przepływu
Współrzędna aproksymowana	z	x
Blok aproksymacyjny jest opisany przez	fragment konturu (czasem pojedynczy promień)	pełny kontur w danym przekroju
Kształt bloku	obrotowy	Translacyjny, pierwszy blok pół-obrotowy
Adwekcja jest istotna	tylko przy lewym obiegu	zawsze
Dyfuzja turbulentna	ukryta w regułach mieszania	w jawnej formule?

Tab. 1. Similarities and differences of vertical and horizontal caverns

CAVERN TYPE:	VERTICAL	HORIZONTAL
Direction of gravitational forces	parallel to axis of original well	perpendicular to axis of original well
Cavern development	in all directions around original well in its geometrical centre	upward only, with original well at cavern bottom, later covered by insolubles
Cavern symmetry in homogeneous deposits	axial	mirror image only
Access to cavern	from cavern top	from cavern side at bottom level
Pipe handling	free-hanging pipes, i.e. raised and lowered at will	"free-lying" pipes, i.e. once under sump, they can be withdrawn only
Blanket medium	can be added and removed at will	can be added only, but not removed
Circulation type possible	both direct and reverse (depending on reciprocal injection and production pipe positioning)	one type only
Concentration distribution	in reverse circulation, governed by advection	both vertical and horizontal gradient components possible, governed by turbulent diffusion
Insoluble part transport	falling down and settling	can be transported horizontally
Temperature diversification	practically nonexistent	temperature gradient possible
Sonar surveying	easy	difficult or hardly feasible

Tab. 2. Different features of both cavern type models

CAVERN TYPE:	VERTICAL	HORIZONTAL
Spatial coordinates	r - radius φ - azimuth z - height	x - length y - width z - height
Boundaries, limitation	$r \geq 0$	
In case of symmetry	φ - insignificant	$y \geq 0$
Shape described by	$r = R(z)$ single function for the given time	$y_i = Y_i(z)$ different function in any cross-section for the given time
Abscissa of shape function	parallel to flow direction	normal to flow direction
Finite-difference coordinate	z	x
Block described by	contour fragment (sometimes a single radius)	complete contour of the given cross-section
Block shape	rotational	translational front block semi-rotational
Advection is essential	in reverse circulation only	always
Turbulent diffusion	hidden in mixing rules	in an explicit formula

Proces rozwoju kawerny można modelować komputerowo, choć, jak na razie w ograniczonym zakresie.

Nie jest wyjaśnione, w jakim stopniu należy w modelu uwzględniać dyfuzję turbulentną i jakimi wzorami ją opisać.

Zarówno sam proces ługowania, jak i jego model dla kawern poziomych są bardziej skomplikowane niż dla kawern pionowych. Najlepiej ilustrują to dwie tablice, przytoczone za (Kunstman, Urbańczyk, 1995)

The horizontal cavern leaching process and its model are more complex in comparison to the leaching process and model of the vertical cavern, respectively. That is illustrated in the best way by two Tables quoted here after (Kunstman and Urbańczyk 1995).

LITERATURA/REFERENCES

- KNAPP R.M., PODIO A.L. 1979. Investigation of Salt Transport in Vertical Boreholes and Brine Invasion into Fresh Water Aquifers. Report ONWI-77.
- KUNSTMAN A. S., URBAŃCZYK K. M., 1990. UBRO A Computer Model for Designing Salt Caverns Leaching Process Developed at CHEMKOP, SMRI Meeting Paper, Paris 15-18 X 1990
- KUNSTMAN A. S., URBAŃCZYK K. M., 1995. Modelling of horizontal cavern leaching: main aspects and perspectives. SMRI Meeting Paper, San Antonio, 22-25 X 1995
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYŃNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2002. Zarys otworowego ługownictwa solnego. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków. Eng. Ed. 2007.
- LI J.L., YANG C.H., SHI X.L., Xu W.J., Li Y.P., DAEMEN J.J.K., 2020. Construction modeling and shape prediction of horizontal salt caverns for gas/oil storage in bedded salt. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 190, 107058.
- LIU J., JIANG D., CHEN J., et al. 2014. Similar experiments of the flow field in cavity construction of underground saliferous rock horizontal petroleum gas storage. *Environment, Energy and Sustainable Development – Sung, Kao & Chem (eds) Taylor & Francis Group, London.*
- MORTON B. R., TAYLOR G. I., TURNER J. S., 1956. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. R. Soc. Lond. A* 234:1–23.
- PIEPRZYK L., RADOMSKI A. 1960. *Ługowanie złoża soli w Wieliczce otworami wierconymi z wyrobisk podziemnych. Przegląd Górniczy* 16 (2):90-94.
- PLESSET M.S., Whipple C.G., 1974. Viscous Effects in Rayleigh-Taylor Instability. *Phys. Fluids* 17 (1):1-7.
- RUSSO A. J., 1981. A solution mining code for studying axisymmetric salt cavern formation. Sandia Report SAND81-1231, 1-32.
- RUSSO A. J., 1983. Solution Mining Calculations for Strategic Petroleum Reserve Caverns. *Proc. Sixth Salt Symposium Toronto 1983, Vol. II, 101-109.*
- RUSSO A. J., 1995. HORSMIC Solution Mining Code for Horizontal Caverns. SMRI Meeting Paper, San Antonio, 22-25 X 1995,
- SABERIAN A., 1977. Salt Dissolution in Horizontal Conduits, SMRI File No. 77-0005-SMRI (A. Saberian & Associates report no. 773)
- SABERIAN A., 1978. Experimental Studies of Salt Dissolution in Horizontal Fractures, SMRI File No. 78-0007-SMRI (A. Saberian & Associates report no. 7879-1)
- SABERIAN A., 1995. A Preliminary Model for Horizontal Well Leaching. SMRI Meeting Paper, San Antonio, 22-25 X 1995
- THOMS R. L., GEHLE R. M., 1993. Feasibility of Controlled Solution Mining from Horizontal Wells, SMRI Meeting Paper, Lafayette, October 24-27, 1993
- URBAŃCZYK K., 2015. Źródła wiedzy o procesie ługowania kawern solnych (Proces ługowania kawern solnych cz. I). *Przegląd Solny*, 11: 32–43
- URBAŃCZYK K., 2017. Matematyczno-fizyczny opis procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. II). *Przegląd Solny*, 13: 47-66.
- URBAŃCZYK K., 2018. Model numeryczny procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. III). *Przegląd Solny*, 14: 54-69.
- URBAŃCZYK K., 2019/2020. Między teorią a praktyką (Proces ługowania kawern solnych cz. IV). *Przegląd Solny*, 15: 75-85
- WU G., XIAO C. F., QIU X. D., 1992. Study on the dissolution rate of rock salt (po chińsku / in Chinese). *Chem. Min. Tech.* 01, 19-22 (1992).
- WOYCIECHOWSKI J., 1956. Komora ługownicza Leona Pieprzyka. *Przegląd Górniczy* 12 (7-8): 308-313
- XING W., ZHAO J., HOU Z. et al. 2015. Horizontal natural gas caverns in thin-bedded rock salt formations. *Environ Earth Sci* 73: 6973–6985.
- ZHANG G., WANG Z., LIU J. et al. 2020. Stability of the bedded key roof above abandoned horizontal salt cavern used for underground gas storage. *Bull Eng Geol Environ*, 79: 4205–4219.