



## Między teorią a praktyką (Proces ługowania kawern solnych cz. IV)

*Between theory and practice. (Salt cavern leaching process p. IV)*

Kazimierz URBAŃCZYK

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

### STRESZCZENIE

Omówione są praktyczne zastosowania modelu komputerowego przy projektowaniu kawern solnych oraz przy monitorowaniu procesu ich ługowania. Poruszono takie zagadnienia, jak zgodność prognozy z rzeczywistym ługowaniem, uzgodnienie modelu z historią ługowania tj. dopasowanie modelu do wydobywania soli oraz dopasowanie do kształtu zmierzonego przez echosondę.

**Słowa kluczowe:** kawerna solna, modelowanie procesu ługowania.

### ABSTRACT

Application of the computer model in the mining practice is presented in the paper. Designing of salt caverns and monitoring of the actual leaching process are discussed. Such issues as agreement of simulation with the leaching process, history match i.e. adjustment to the salt production and adjustment to the sonar survey are mentioned.

**Key words:** salt cavern, modeling of leaching process.

### WSTĘP

Niniejszy tekst jest czwartym z serii poświęconej procesowi ługowania, ukazującej się na łamach *Przeгляdu Solnego*. Zamierzeniem autora jest podsumowanie wiedzy na ten temat, zwłaszcza jeśli idzie o opis matematyczno-fizyczny, jego stosowalność oraz implementacje w postaci modeli komputerowych.

W poprzednich częściach omówiono bazę empiryczną (Urbańczyk, 2015), teoretyczną (Urbańczyk, 2017) i numeryczną komputerowego modelu procesu ługowania (Urbańczyk, 2018). Model jest sformułowany we współrzędnych cylindrycznych (głębokość, azymut, promień). W modelu nie ma jawnej zależności od promienia. Z uwagi na grawitację, w kawernie dochodzi do uwarstwienia solanki według stężenia. Głębokość aproksymowana jest jednorodnym krokiem, azymut dzielony jest na sektory, czas aproksymowany krokiem zmiennej długości, dobieranym według kryteriów zbieżności. Zastosowano schemat jawny sprzężenia czasu i głębokości. Kształt kawerny, czyli jej brzeg, jest opisywany niezależnie od aproksymacji, jako półprofile w sektorach azymutalnych, każdy półprofil aproksymowany łamaną o malejących głębokościach punktów węzłowych.

Jeśli idzie o własności górotworu na zewnątrz kawerny, to:

- o współczynniki ługowania – boczny i stropowy, mogą być zróżnicowane z głębokością i azymutem,
- o udział części nierozpuszczalnych – może być zróżnicowany z głębokością.

Gęstość halitu i zależność między stężeniem, temperaturą i gęstością solanki są w opisanym modelu stałe.

Niniejszy tekst ma na celu ukazanie zastosowań, jakie ów model znajduje w praktyce.

Można tu wyróżnić dwa główne typy symulacji:

- Prognozowanie przebiegu ługowania (które nastąpi w przyszłości). Stosuje się je przy:
  - o projektowaniu technologii ługowania
  - o korekcie technologii ługowania

- Śledzenie przebiegu ługowania (które już się odbyło), stosuje się je przy:
  - kontroli przebiegu ługowania,
  - uzgadnianiu modelu z historią ługowania, obejmującym:
    - dopasowanie do wydobycia,
    - dopasowanie do kształtu.

Użycie modelu komputerowego przy projektowaniu jest czymś oczywistym i gdy przedstawia się projekty nowych kawern i technologię ich ługowania, podawane kształty są wynikiem modelowania komputerowego. Rzadko można znaleźć porównania prognozy z rzeczywistym ługowaniem (nieliczne przykłady to: Kunstman, Urbańczyk, 1994a i 1994b; van Vliet, 1990; Charnavel, Lubin, 2002; Charnavel, Eyerann, 2008). Natomiast praktycznie brak przykładów posłużenia się modelem komputerowym przy monitorowaniu procesu ługowania (Urbańczyk, Kunstman, 1997).

Ługowanie kawerny zwykle odbywa się etapami, które charakteryzują się stałym poziomem medium izolacyjnego. Etap może się składać z kilku faz, różniących się położeniem rur ługowniczych (wolnowiszących). Jak wspomiano w pierwszej części niniejszego cyklu (Urbańczyk, 2015) podczas ługowania kawerny mierzy się regularnie (np. co 8 godzin):

- wydajność zatłaczania medium ługującego,
- stężenie (lub gęstość) medium ługującego, jeśli zamiast wody używa się półsolanki,
- wydajność odbioru solanki,
- stężenie (lub gęstość) wydobywanej solanki,
- ciśnienia i temperatury (na głowicy) medium ługującego i solanki,
- ciśnienie medium izolacyjnego (na głowicy).

Co kilka dni wykonuje się analizę chemiczną solanki. W każdym etapie notuje się położenia rur ługowniczych i medium izolacyjnego. Nie rzadziej, niż na koniec etapu wykonuje się pomiary kształtu kawerny echosondą.

#### PROGNOZOWANIE PRZEBIEGU ŁUGOWANIA

W zasadzie można wyróżnić trzy typy prognozowania:

- na etapie koncepcji lub studium wykonalności,
- na etapie projektu technicznego kawerny,
- kontynuacja ługowania już rozpoczętego.

Na poziomie studium koncepcyjnego lub wykonalności zwykle znany jest orientacyjnie strop i spąg złoża, a w związku z tym projektowana wysokość kawerny. Z reguły prognozę wykonuje się w symetrii osiowej, zakłada się jednorodne własności ługownicze górotworu, rozpatruje się różne warianty technologii ługowania, związane z różnymi możliwościami zagospodarowania solanki.

Na podstawie symulacji określa się czas ługowania kawerny, ilość solanki do zagospodarowania, harmonogram czasowy inwestycji i koszty związane z ługowaniem oraz za-

gospodarowaniem solanki (projekt odpowiedniej infrastruktury).

Projekt techniczny kawerny sporządza się, gdy już jest odwiercony otwór pod kawernę i przebadany laboratoryjnie rdzeń solny. Jest możliwość zróżnicowania części nierozpuszczalnych i współczynników ługowania z głębokością, nadal jednak model będzie osiowo-symetryczny, ponieważ rdzeń wiertniczy jest zbyt mały, by pozwalał na uchwycenie azymutalnego zróżnicowania.

Na tym etapie prognoza musi być bardziej szczegółowa. Jest już ustalony sposób zagospodarowania solanki i związane z tym wymagania – stężenie solanki i jej ilość. Jest też dokładniej określony kształt kawerny zweryfikowany przez obliczenia geomechaniczne.

Sprecyzowane są ograniczenia narzucane na technologię ługowania, takie jak:

- ilość wody dostarczanej przez ujęcie,
- ilość solanki odbieranej przez odbiorcę (lub dopuszczonej do zrzutu),
- wymagane stężenie solanki – techniczne nasycenie, gdy jest odbiorca przemysłowy, lub maksymalne dopuszczalne stężenie, gdy następuje zrzut do morza, rzeki itp.

Prognozę wykonuje się dla wielu wariantów, z których wybiera się najkorzystniejszy. Warianty mogą się różnić takimi elementami, jak:

- ilość etapów ługowania, czyli zmian poziomu izolacji stropu,
- głębokości kolejnych poziomów izolacji,
- głębokości butów rur ługowniczych w poszczególnych etapach,
- obieg i wydajności zatłaczania medium ługującego.

Dąży się do kompromisu między precyzją w uzyskaniu planowanego kształtu a ilością operacji technologicznych generujących koszty.

Prognozowanie przebiegu dalszego ługowania kawerny, której ługowanie już się rozpoczęło, zwykle wiąże się z aktualizacją technicznego projektu ługowania. Powinno ono być poprzedzone uzgodnieniem modelu z historią ługowania, tak aby w modelu kształt kawerny, wydobycie soli oraz ostatnio uzyskiwane stężenia zgadzały się z rzeczywistymi. Model nie musi być osiowo-symetryczny – można wystartować z niesymetrycznego kształtu kawerny, jaki zmierzyła echosonda, można współczynniki ługowania zróżnicować azymutalnie, również na podstawie pomiarów echosondą.

Często aktualizacja projektu ługowania wynika z faktu, że:

- wyniki ługowania są inne, niż pierwotnie przewidywano,
- jest większa wiedza o warunkach geologicznych,
- zmieniła się koncepcja wykorzystania przyszłej kawerny,
- zmieniły się ceny i koszty operacji technologicznych.

**Podsumowanie:**

Gdy podczas projektowania kawerny wykonuje się prognozę ługowania znane są, lub założone:

- współczynniki ługowania,
- zamierzony kształt kawerny,
- symetria osiowa.

Warunki kończenia podetapów ługowania dyktuje kształt kawerny.

Poszukiwane są:

- technologia ługowania (scenariusz),
- stężenie solanki.

Podczas aktualizacji projektu ługowania kawerny model może nie być osiowo-symetryczny, zróżnicowanie azymutalne wynika z dostrojenia modelu do pomiaru echosondą.

#### KONTROLA PROCESU ŁUGOWANIA - ZGODNOŚĆ PROGNOZY Z REZULTATAMI ŁUGOWANIA

Można znaleźć przykłady, gdy rzeczywiste ługowanie dość dobrze się zgadza z prognozą (Charnavel, Lubin, 2002; Charnavel, Eyermann, 2008), przy czym ta zgodność jest potwierdzona jedynie dla UBRO (w wersji WinUbro 2.nn), PROSACAV oraz SIMLESS. Nie zawsze jednak prognoza musi odpowiadać rzeczywistości. Przyczyn rozbieżności może być wiele. Mogą być natury geologicznej – inny udział części nierozpuszczalnych, inna szybkość ługowania, pojawienie się w obrębie kawerny warstw niewystępujących w rdzeniu. Mogą być natury technologicznej – ługowanie niedokładnie odpowiada założeniom prognozy: wydajność zatłaczania wody nieregularna, inna temperatura w kawernie, niedokładnie ustalona głębokość izolacji.

Należy szczególnie uważnie analizować dane dotyczące wydajności zatłaczanej wody. Nie powinno się używać chwilowych danych z przepływomierzy, ale raczej opierać się na odczytach liczników wody i solanki. Należy sprawdzać, czy są one zgodne – wydajność solanki powinna być mniejsza od wydajności wody o kontrakcję. Jeśli wydajność solanki jest wyraźnie mniejsza, może to świadczyć o nieszczelności kawerny. Zdarza się też, że liczniki ulegną „rozstrojeniu” i zacząć mierzyć z systematycznym błędem. Warto od czasu do czasu sprawdzić ich dokładność.

Stężenie solanki najczęściej wyznacza się mierząc jej gęstość i weryfikując stężenia wyliczone z gęstości poprzez analizy chemiczne. Przy odpowiednio starannym opomiarowaniu można mieć pewność co do ilości wydobytej soli, która dostarcza najlepszą z możliwych ocenę objętości komory.

Pomiar kształtu komory echosondą może mieć nieścisłości wynikające z następujących przyczyn:

- niedokładności w pomiarze prędkości dźwięku (kalibracja sonaru),
- niedokładności w pozycji sonaru (głębokość lub azymut),
- ewentualne niedokładności wywołane przechodzeniem sygnału przez rury ługownicze,

- trudność wyboru właściwego echa przy licznych wtórnych odbiciach.

Wartość z pomiaru jest najdokładniejsza, gdy ultradźwięk pada prostopadłe na ścianę kawerny, mniej dokładna, gdy pada on niemal płasko. Wtedy też często pojawiają się wtórne echa. Podobnie pomiar przy wyciągniętych kolumnach eksploatacyjnych jest dokładniejszy, niż pomiar poprzez rury.

Trzeba też mieć na uwadze, że nawet najlepszy pomiar echosondą (z powyższymi niedokładnościami zmniejszonymi do minimum) może okazać się niewystarczająco wiarygodny, gdy istnieją „boczne kieszenie” niewidoczne z osi komory. Kolejny problem może wystąpić, jeśli otwór w osi kawerny nie jest dokładnie pionowy. W tym przypadku oś pomiaru może się przesunąć przy kolejnych badaniach. Ze względu na wyżej wymienione powody, wyniki echosondy nie powinny być traktowane jako absolutne, bez porównania ich z produkcją soli i poprzednimi pomiarami.

Zgodność prognozy dalszego przebiegu ługowania już rozpoczętego, z jego rzeczywistym dalszym przebiegiem, zależy od tego, na ile dokładny był pomiar echosondą, przyjęty do uściślenia modelu oraz na ile można ekstrapolować własności soli, które uwidoczniły się podczas dotychczasowego ługowania na obszar, w który ługowanie dopiero wejdzie.

#### PODSUMOWANIE

Tylko trzy programy (UBRO, PROSACAV oraz SIMLESS) przeszły sprawdzian zgodności symulacji z rzeczywistym ługowaniem.

Liczne są przyczyny, dla których nawet poprawna prognoza może odbiegać od rzeczywistości – mogą to być czynniki geologiczne lub technologiczne. Ale mogą też pojawić się błędy i niedokładności w opomiarowaniu rzeczywistego procesu.

Uzgodnienie modelu z historią ługowania jest warunkiem, by prognozy dalszego przebiegu ługowania, już rozpoczętego, dawały właściwe wyniki.

#### KONTROLA PROCESU ŁUGOWANIA – SYMULACJA ŚLEDZĄCA PROCES RZECZYWISTY

Monitorowanie rozwoju kawerny ługowniczej (bieżąca kontrola ługowania) jest innym zastosowaniem modelu ługowania. Wykorzystuje się tu śledzenie procesu ługowania. Różni się ono od projektowania tym, że na komputerowym modelu symuluje się operacje technologiczne dokładnie tak, jak miały miejsce w rzeczywistości. Na podstawie zapisów ługowania przygotowuje się scenariusz ługowania. Składa się on z ciągu podetapów. W każdym z podetapów położenie izolacji, rur ługowniczych oraz wydajność zatłaczania są stałe. Czas trwania każdego z podetapów zależy głównie od tego, na ile nieregularna jest wydajność zatłaczania. Wydajność odcinkami uśrednia się, tak aby chwilowe wydajności nie

odbiegały nadmiernie od średniej. Ważne jest, by scenariusz uwzględniał przerwy w zatłaczaniu, zwłaszcza trwające jeden dzień, lub więcej.

Ryc. 1 przedstawia przykład bardzo nieregularnego zatłaczania i jego uśrednienie tak, by odchylenie chwilowych wartości od średniej nie przekraczało kilku procent.

Stężenie uzyskiwane przy takim śledzeniu procesu ługowania na modelu komputerowym porównuje się ze stężeniem rzeczywistym. Jeśli pojawia się różnica systematyczna, model wymaga korekty. Pierwszą z nich jest dopasowanie współczynników do wydobywania soli, drugą dopasowanie do kształtu zmierzonego przez echosondę.

Bieżąca kontrola procesu ługowania wsparta symulacją komputerową:

- gdy zachodzi zgodność stężenia solanki i wydobywania soli między symulacją a rzeczywistością, dostarcza rzeczywistych danych o stanie kawerny i jej kształcie, które mogą być najlepszym punktem wyjścia do ewentualnej aktualizacji projektu ługowania,
- gdy zachodzi rozbieżność, kontrola ta sygnalizuje wystarczająco wczesne okoliczności prowadzące do zagrożeń w ługowaniu kawerny,

Gdy dysponuje się programem komputerowym do symulacji ługowania, śledzenie procesu nie jest kosztowne, a wzbogaca wiedzę o sytuacji w kawernie, zawsze lepiej wiedzieć więcej niż mniej. Daje też możliwość podjęcia szybkich decyzji, jak prowadzić dalsze ługowanie.

### Podsumowanie:

Przy symulacji śledzącej przebieg rzeczywistego ługowania znane są, lub założone:

- scenariusz ługowania,
- współczynniki ługowania,
- stężenie solanki,
- asymetria kawerny,

Warunki kończenia podetapów ługowania dyktuje czas (rzeczywista długość trwania podetapów).

Poszukiwane są:

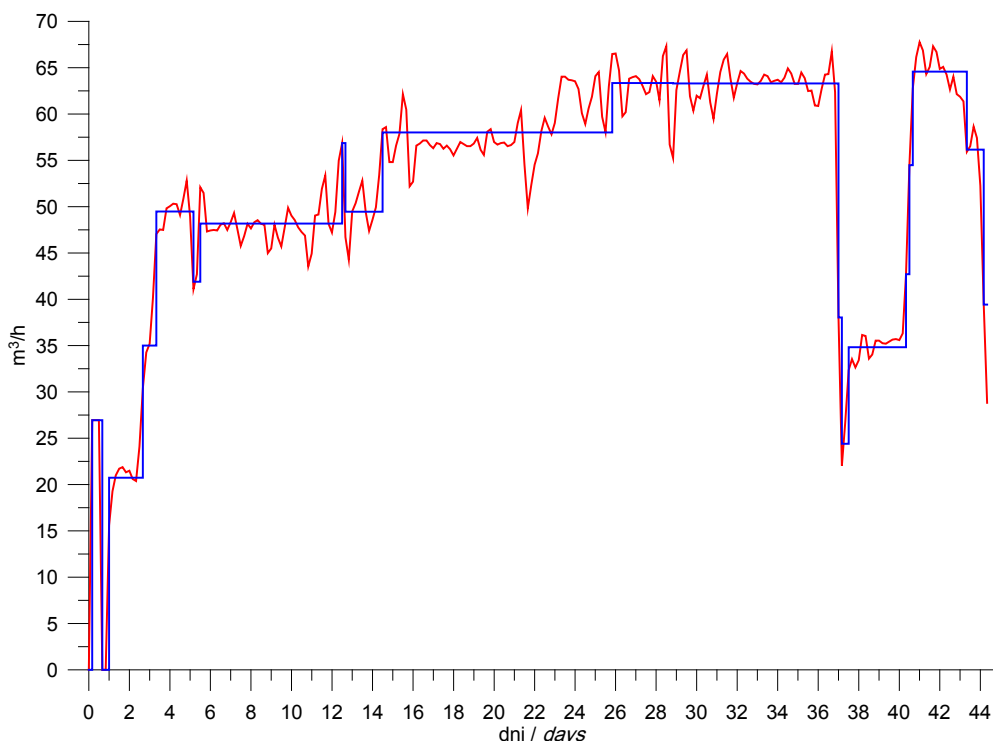
- kształt kawerny,
- stężenie solanki (dla porównania modelu z rzeczywistością).

Modelowanie śledzące przebieg rzeczywistego ługowania łączy się z dopasowywaniem współczynników modelu do wydobywania soli oraz do kształtu zmierzonego przez echosondę.

### DOPASOWANIE DO WYDOBYCIA SOLI

Dopasowanie do wydobywania soli pozwala zweryfikować średnie (lub globalne) wartości współczynników ługowania. Procedura ta powinna być stosowana, gdy brak informacji o współczynnikach ługowania, kiedy nie jest możliwe wykonanie badań laboratoryjnych z uwagi na zły stan rdzenia lub jego brak, a także kiedy laboratoryjne współczynniki ługowania okazują się nieadekwatne.

Posiadane informacje dotyczą historii ługowania, tj. położenia rur ługowniczych, ilości zatłaczanej wody, stężenia



Ryc. 1. Przykład podziału nieregularnej wydajności zatłaczania wody na podetapy

Fig. 1. An example of dividing irregular water injection onto sub-stages.

otrzymywanej solanki (lub wydobywania soli) w funkcji czasu. Jeśli choćby przybliżonych współczynników ługowania brak, pierwsza symulacja powinna użyć współczynników typowych. Stężenie solanki jest jedną z głównych danych dostarczonych przez model. Porównuje się je ze stężeniem zmierzonym podczas rzeczywistego ługowania.

Kiedy współczynniki modelu są dobrze dobrane, a model jest poprawny, oba ciągi wartości - zmierzone oraz wyznaczone na komputerowym modelu - powinny być podobne. Systematyczna różnica oznacza, że współczynniki modelu są błędne, a więc globalne współczynniki ługowania trzeba przeliczyć i powtórzyć symulację scenariusza ługowania. Zwykle potrzeba paru symulacji do wystarczająco dobrego ustalenia współczynników. Oprócz nominalnych wartości współczynników ługowania, można też manipulować (w rozsądnych granicach) temperaturą w kawernie.

Najlepiej, jeśli można zacząć dopasowanie do wydobywania od samego początku ługowania, od dobrze znanego „początkowego kształtu kawerny” którym jest otwór wiertniczy. Przykład takiego dopasowania przedstawiony jest na ryc. 2. Dotyczą ługowania wrębu o wysokości 20 m (520-510 m p.p.t.), w prawym obiegu. Wydajność zatłaczania wody była taka, jak na ryc. 1.

Symulację wykonano programem UBRO. Pierwszy przebieg (linia niebieska na ryc. 2) wykonano przy domyślnych współczynnikach: 12,986 mm/h dla ługowania bocznego i 18,7 mm/h dla ługowania stropowego. Jako temperaturę w kawernie przyjęto 30°C. Wydobywanie soli na koniec etapu wyniosło 6839 ton, przy rzeczywistym wydobywaniu 3062 ton.

Porównując z rzeczywistymi zmierzonymi stężeniami (x na ryc. 2) zmniejszono współczynniki ługowania odpowiednio do 8,65 mm/h i 12,4 mm/h, oraz zmniejszono temperaturę w kawernie do 10°C. Uzyskano dobrą zgodność w początkowym okresie ługowania, później jednak pojawiła się systematyczna różnica. Uzyskano na koniec etapu wydobywanie 2911 ton soli. Dlatego w trzecim przebiegu (czerwona linia na ryc. 2) zwiększono w końcowym odcinku temperaturę do 20°C. Tym razem wydobywanie na koniec etapu wyniosło 3050 ton soli.

W podobny sposób wydobywanie soli podczas późniejszego etapu lub wydobywanie od ostatniego pomyślnego dopasowania współczynników modelu stanowi podstawę dopasowania, gdy okres ługowania brany pod uwagę nie jest początkowy.

### Podsumowanie:

Gdy podczas śledzenia przebiegu ługowania kawerny wykonuje się dopasowanie do wydobywania znane są, lub założone:

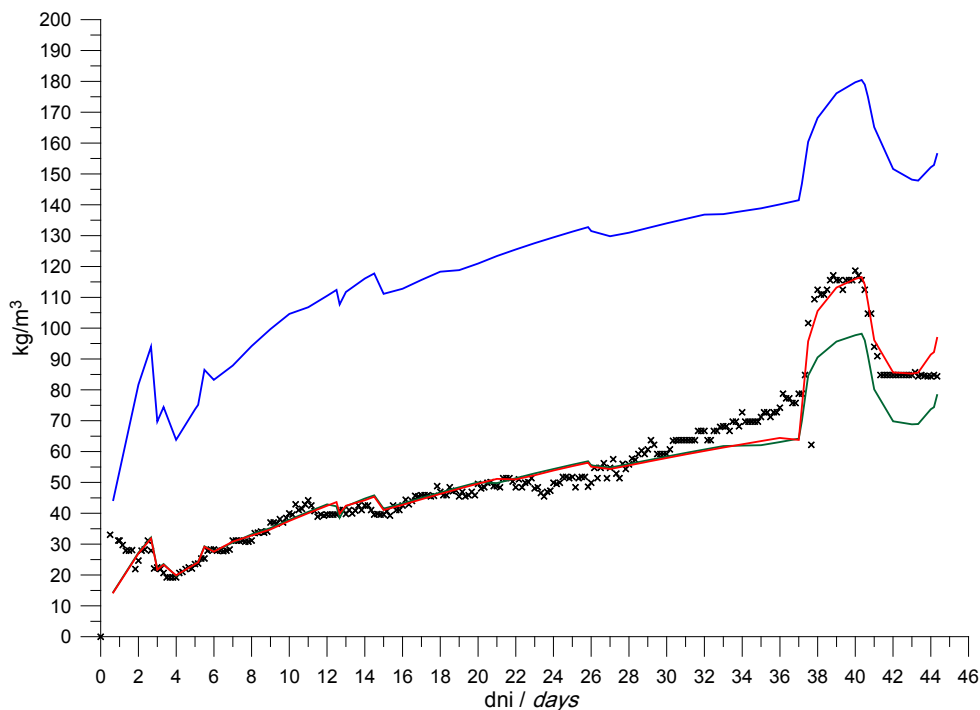
- współczynniki ługowania,
- stężenie solanki,
- symetria osiowa.

Warunki kończenia podetapów ługowania dyktuje czas (rzeczywista długość trwania podetapów).

Poszukiwane są:

- współczynniki ługowania (wartości globalne)
- stężenie solanki (dla porównania modelu z rzeczywistością).

Najlepiej śledzić przebieg ługowania od momentu jego rozpoczęcia.



Ryc. 2. Dopasowanie do wydobywania soli – stężenie solanki w funkcji czasu.

x – pomiary, — pierwszy przebieg, — drugi przebieg, — trzeci przebieg.

Fig. 2. Match to salt production - brine concentration vs. time. x – measurements, — first run, — second run, — third run.

## DOPASOWANIE DO KSZTAŁTU ZMIERZONEGO PRZEZ ECHOSONDĘ

Ponieważ rzadko złoża soli jest dostatecznie jednorodne, kształt kawerny staje się nieregularny, czasem nieznacznie, czasem znacznie, zwłaszcza w wysadzie solnym, gdzie kawerna podczas ługowania może trafić na warstwy niewystępujące w profilu otworu. Jeśli symulacja na modelu komputerowym ma odzwierciedlać rzeczywiste ługowanie, należy po każdym pomiarze echosondą poprawiać kształt kawerny w modelu, tak by odpowiadał kształtowi zmierzonym. Porównując kształt otrzymany z modelu z kształtem zmierzonym, można również zróżnicować lokalnie współczynniki ługowania dla różnych głębokości i azymutów. Model z tak zróżnicowanymi współczynnikami będzie ekstrapolował tendencje, które pojawiły się w poprzednim etapie ługowania.

Zanim zacznie się poprawiać w modelu kształt kawerny i współczynniki, trzeba sprawdzić, jak się mają do siebie trzy objętości, a ściślej rzecz biorąc, ich przyrosty od poprzedniego pomiaru echosondą:

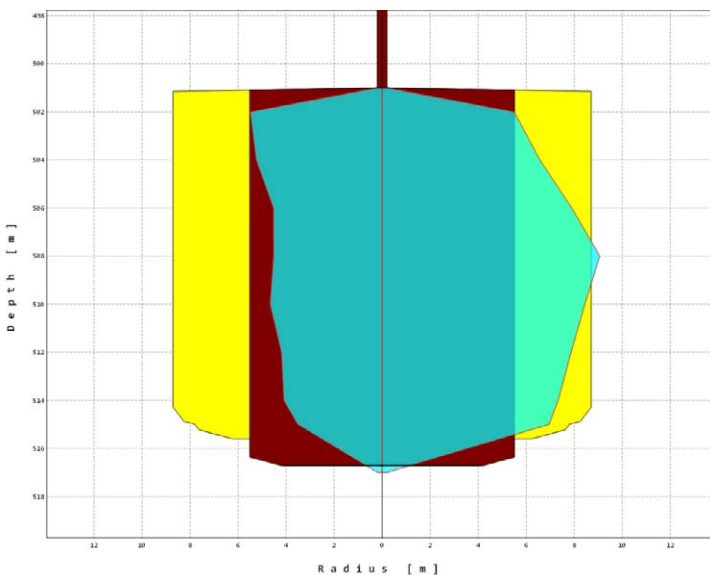
- przyrost objętości według pomiarów echosondą,
- przyrost objętości obliczony z wydobycia soli (z uwzględnieniem solanki pozostającej w kawernie, udziału części nierozpuszczalnych i przyrostu objętości strefy zasypanej przez nie),
- przyrost objętości wynikający z symulacji na modelu komputerowym.

Jeśli różnice są niewielkie, można nimi się nie przejmować, zniweluje je procedura dopasowywania. Natomiast trzeba uważnie przeanalizować duże różnice, jeśli się pojawiają. Nie powinno być dużych różnic pomiędzy objętością wyliczoną z wydobycia soli oraz w modelu, gdyż w tym celu wykonuje się dopasowanie do wydobycia.

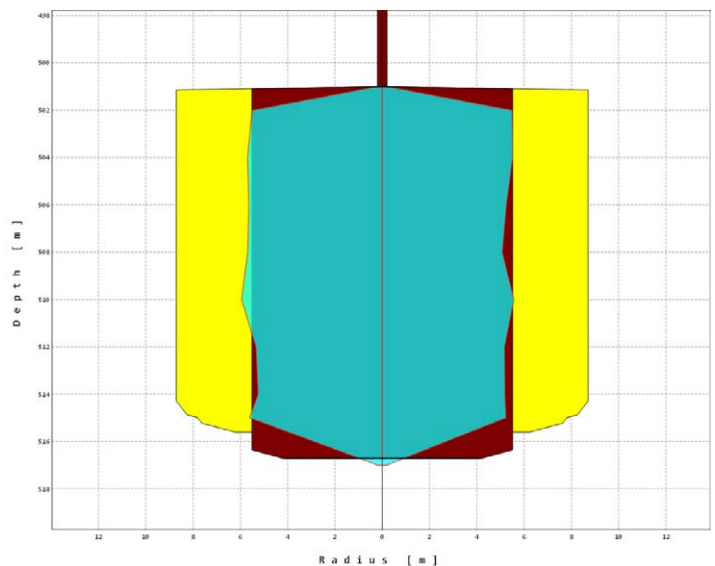
Jeśli objętość kształtu zmierzonego przez echosondę odbiega nieznacznie od pozostałych, można pomiar przekalibrować i poprawić jego zgodność z wydobyciem soli. Nie zdarza się, by objętość według echosondy była wyraźnie zbyt wielka. Świadczyłyby to, że w dokumentacji ługowania jakaś część danych się zagubiła. Zdarza się natomiast, że kawerna posiada strefy niewidoczne z osi kawerny, ukryte przed echosondą. Jeśli są to liczące się objętości, dostrojenie współczynników ługowania może się nie powieść.

Biorąc pod uwagę rozmiary kawerny, liczbę poziomów echosondy i azymutów, dopasowanie modelu do kształtu zmierzonego przez echosondę musi być wykonywane komputerowo przez odpowiednią procedurę numeryczną. W pakiecie oprogramowania UBRO znajduje się taka procedura – KORLOG. Współczynniki ługowania w danym azymucie na danej głębokości są przemnażane przez stosunek promienia zmierzonego do otrzymanego na modelu. Szczegółowiej omówione jest to w pracy Kunstmana i Urbańczyka (1994a, 1994b).

Rezultaty jej działania ilustrują graficznie ryc. 3-5. Dotyczą one tego samego wrębu, którego ługowanie ilustrowały ryc. 1 i ryc. 2. Z kolei ryc. 3 przedstawia przekrój pionowy przez kawernę wzdłuż azymutów  $34^{\circ}$ - $214^{\circ}$  (największa asymetria). Kształt uzyskany podczas pierwszego przebiegu przedstawia kolor żółty, kształt po trzeciego przebiegu – kolor brązowy, zaś kształt zmierzony przez echosondę i dopasowany przez KORLOG – kolor niebieski. Ryc. 4 przedstawia podobne przekroje wzdłuż azymutów  $124^{\circ}$ - $304^{\circ}$  (najmniejsza asymetria). Kontury na powyższych rysunkach przedstawiają część czynną kawerny, tj. bez części zasypanej. Udział części nierozpuszczalnych w skale solnej wynosił 3%, czyli część zasypana jest równa 4,7% objętości czynnej.



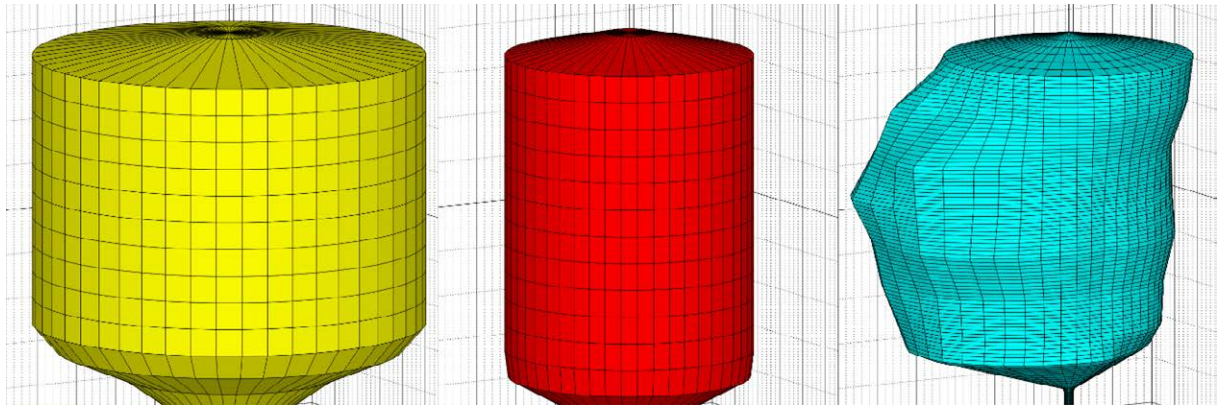
**Ryc. 3.** Przekroje przez kawernę w azymucie  $34^{\circ}$ - $214^{\circ}$   
**Fig. 3.** Cross-sections through the cavern shape, azimuths  $34^{\circ}$ - $214^{\circ}$ . - przebieg 1. / 1<sup>st</sup> run, - przebieg 3. / 3<sup>rd</sup> run, - echosonda / sonar



**Ryc. 4.** Przekroje przez kawernę w azymucie  $124^{\circ}$ - $304^{\circ}$   
**Fig. 4.** Cross-sections through the cavern shape, azimuths  $124^{\circ}$ - $304^{\circ}$ . - przebieg 1. / 1<sup>st</sup> run, - przebieg 3. / 3<sup>rd</sup> run, - echosonda / sonar

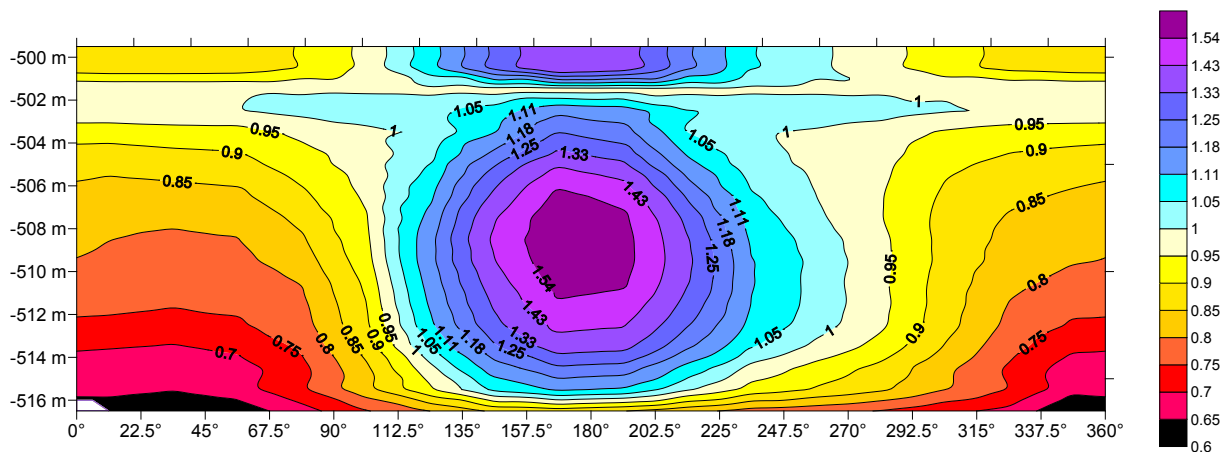
Kolejny rysunek (ryc. 5) przedstawia kształty kawerny otrzymane w przebiegu 1 (po lewej), przebiegu 3 (w środku) oraz zmierzone przez echosondę i dopasowane przez KORLOG

(po prawej). Widok jest z punktu leżącego w azymucie 120° na wysokości stropu kawerny.



Ryc. 5. Widoki 3D kawerny z azymutu 130°

Fig. 5. 3D views of the cavern from azimuth of 310°, - przebieg 1./ 1<sup>st</sup> run, - przebieg 3./ 3<sup>rd</sup> run, - echosonda / sonar



Ryc. 6. Zróżnicowanie współczynnika ługowania po dopasowaniu przez Korlog

Fig. 6. Differentiation of leaching coefficient after matching by the Korlog procedure.

KORLOG zróżnicował współczynniki ługowania. Zróżnicowanie współczynnika ługowania po dopasowaniu przez KORLOG przedstawia ryc. 6. Najsilniej zmniejszyły się współczynniki w sektorze 2 (azymuty 22,5°-45°), przy czym najniższa wartość współczynnika to 0,60034 wartości nominalnej, na głębokości 516,5 m. Najsilniej zwiększyły się współczynniki w sektorze 8. (azymuty 157,5°-180°), przy czym najwyższa wartość współczynnika, to 1,64112 wartości nominalnej, na głębokości 508,5 m.

Procedura KORLOG ma pewien mankament. Porównuje wyniki modelu i echosondy dla każdej głębokości i sektora indywidualnie, niezależnie od sytuacji w sąsiednich głębokościach i sektorach. Modyfikuje na tej podstawie współczynnik ługowania bocznego, pozostawiając jednak bez zmian stosunek współczynnika stropowego do bocznego. Jednakże w pewnych przypadkach różnice między echosondą i mode-

lem wywołane są nie przez niedopasowanie współczynnika bocznego, a stropowego. Szczególnie się to może uwidocznić na przemieszczaniu ku górze stropu z poprzedniej fazy ługowania. Jeśli współczynnik ługowania stropowego był zbyt niski, strop ten w modelu będzie zbyt głęboko. KORLOG będzie próbował skompensować ten efekt znacznie zwiększając współczynniki w interwale pomiędzy stropem według modelu a stropem według echosondy. Odwrotna sytuacja zachodzi, gdy współczynnik ługowania stropowego jest zbyt wysoki i strop z poprzedniej fazy jest na modelu zbyt płytko. Wtedy KORLOG dopasuje w interwale między oboma położeniami stropu współczynniki niższe niż poza nim. O ile łatwo taką sytuację zaobserwować „na oko”, o tyle trudno skonstruować algorytm, który by wykrywał i korygował tego typu sytuacje, wbrew optymizmowi wyrażonemu w pracy Kunstman i Urbańczyk (1994b). Przy nieregularnym kształcie kawerny

identyfikacja stropu poprzedniej fazy nie jest prosta. W razie potrzeby, pozostaje ręczne przeedytowanie macierzy współczynników.

Należy zauważyć, że korektę kształtu kawerny w modelu warto przeprowadzić po każdym pomiarze echosondą (chyba, że jego dokładność pozostawia wiele do życzenia). Natomiast korekta współczynników ługowania bardzo silnie zależy od dokładności wykorzystanych pomiarów echosondą. Ponieważ rozpatruje się przyrosty, błąd pomiaru podwaja się. Jeśli przyrost promieni kawerny był niewielki (mały odstęp czasowy między pomiarami), to wyznaczone przez KORLOG współczynniki mogą być wątpliwej wartości. W takim przypadku przed przystąpieniem do dalszej symulacji należy je przeanalizować, ewentualnie przeedytować i poprawić ręcznie wątpliwe miejsca, a czasem nawet przywrócić wartości sprzed KORLOGA.

W razie wątpliwości, można sprawdzić poprawność poprawionych współczynników modelując ponownie poprzednią fazę ługowania z poprawionymi współczynnikami.

O ile autorowi wiadomo, program SIMLESS nie posiada tego typu procedur.

#### PODSUMOWANIE

Przed wykonaniem dopasowania do kształtu zmierzonego echosondą, należy wykonać dopasowanie do wydobywania. Kształt kawerny w modelu zastępuje się kształtem zmierzonym przez echosondę, ewentualnie przekalibrowanym by objętość zgadzała się z wydobywaniem soli.

W procedurze KORLOG, która dopasowuje parametry modelu, znane są, lub założone:

- kształty kawerny,
- wydobywanie soli (stężenia solanki).

Porównywane są:

- przyrosty objętości kawerny wg pomiaru echosondą,
- przyrosty objętości kawerny wg wydobywania soli,
- przyrosty objętości kawerny wg symulacji na modelu numerycznym.

Poszukiwane są współczynniki ługowania (zróznicowanie lokalne)

#### PROBLEMY Z EKSTRAPOLACJĄ

Kontynuacja symulacji ługowania po wykonaniu procedury KORLOG, odbywa się ze zmodyfikowanymi współczynnikami ługowania. Oznacza to, że zakłada się, że ekstrapoluje się ich wartości z promieniem, na danej głębokości, w danym kierunku. Sprawą otwartą pozostaje pytanie, w jakim stopniu usprawiedliwiona jest taka ekstrapolacja współczynników ługowania, dopasowanych do strefy, która została wyługowana na strefę, która dopiero ma być ługowana.

Jeśli ługowany jest pokład zalegający prawie poziomo, ekstrapolacja jest uzasadniona. W przypadku pokładu o wyraźnym nachyleniu, należałoby ekstrapolować współczynniki

z uwzględnieniem kąta upadu i w miarę wzrostu promienia w określonym azymucie sprawdzać, jaki współczynnik powinien być właściwy w tamtej strefie. Jednak gdy promień rośnie, zwiększa się też rozległość odpowiedniego sektora i dobór współczynnika nie zawsze jest jednoznaczny, dochodzą warstwy, które leżały poza interwałem objętym procedurą KORLOG. Ekstrapolację z uwzględnieniem kąta upadu zastosował D. Edler w programie Prosacav (Edler, 1997), brak jednak informacji, na ile potwierdziła ona swą użyteczność.

Problem, jak ekstrapolować współczynniki poza interwał głębokości objęty KORLOGIEM również nie ma jednoznacznej odpowiedzi. Początkowo Kunstman i Urbańczyk próbowali przyjmować dla nowej strefy wartości dopasowane przez KORLOG dla sąsiednich głębokości, jednak ten wybór nie sprawdził się. Wydaje się, że lepiej nie modyfikować automatycznie współczynników poza interwałem objętym KORLOGIEM.

W przypadku kawern w wysadach solnych ekstrapolacja współczynników ługowania budzi uzasadnione wątpliwości. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń, można stwierdzić, że wprowadzenie w wysadzie solnym współczynników nie mają określonych tendencji na stałych głębokościach i kierunkach, jednak mimo wszystko lepiej po pomiarze echosondą modyfikować współczynniki, o ile tylko pomiar echosondą był dokładny, brak w nim stref kawerny ukrytych dla echosondy, a wzrost objętości kawerny między pomiarami jest odpowiednio duży. Dopasowanie do pomiaru echosondą można traktować, jako pomiar in-situ współczynników ługowania. Przykład efektów takiego postępowania zamieszczają w swych pracach Kunstman i Urbańczyk (1994a, 1994b).

Z wartości współczynników ługowania dopasowanych w kolejnych etapach można utworzyć „model górotworu”, posługując się interpolacją. Przekrój przez taki model dla jednej z kawern KPMG Mogilno, wzdłuż azymutów  $112,5^{\circ}$  i  $292,5^{\circ}$  przedstawia ryc. 7. Więcej przekrojów pionowych i poziomych można znaleźć w cytowanych pracach Kunstmana i Urbańczyka (1994a, 1994b).

Stwierdzono, że w pobliżu osi otworu zmienność współczynnika wydaje się odwzorowywać przebieg warstw geologicznych. Dla większych promieni jednak rozkład może nie być czytelny, z wagi na wzrost szerokości sektorów azymutalnych z promieniem.

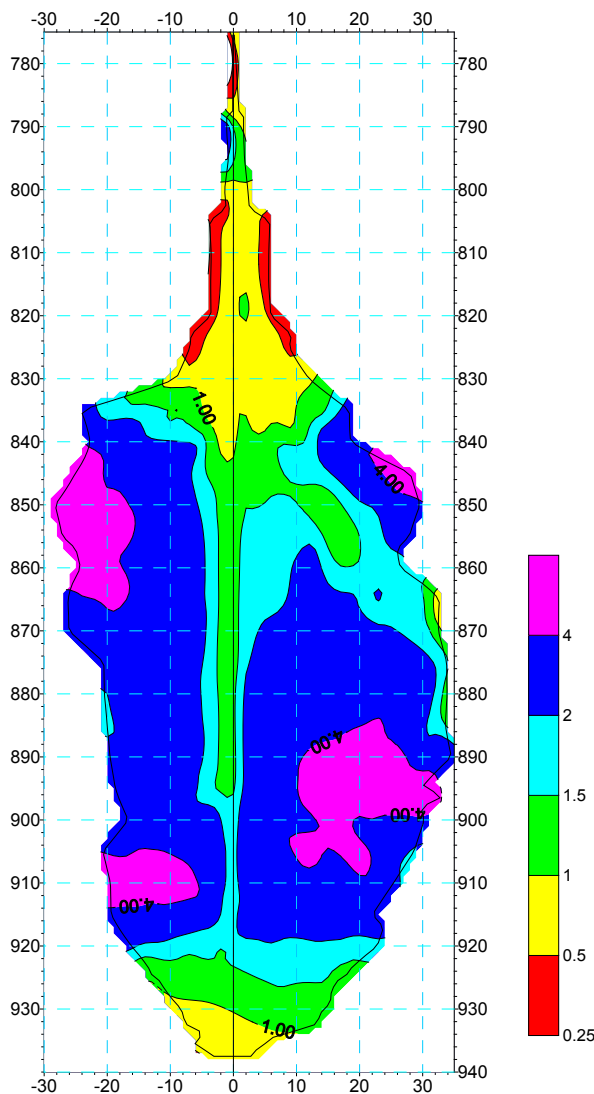
#### Podsumowanie:

Posługiwanie się współczynnikami ługowania dopasowanymi do pomiaru echosondą jest w istocie ekstrapolacją tych współczynników z obszaru wyługowanego na obszar który wchodzi do ługowania.

Ekstrapolacja na obszar powyżej strefy dotychczas ługowanej jest sprawą nie rozwiązana.

Rozkład wartości dopasowanych ze wszystkich etapów ługowania kawerny wiąże się z budową geologiczną złoża.





Ryc. 7. Zróżnicowanie współczynnika ługowania, przekrój wzdłuż azymutów 112,5°292,5°

Fig. 7. Differentiation of leaching coefficient, section along azimuths 112,5°292,5°.

## WNIOSKI KOŃCOWE

Komputerowy symulator procesu ługowania jest narzędziem powszechnie stosowanym przy projektowaniu kawern solnych.

Stosuje się go również przy monitorowaniu ługowania kawern. W tym ostatnim przypadku, w razie rozbieżności między symulacją a rzeczywistym przebiegiem procesu trzeba model uzgodnić z historią ługowania tj. z wydobywaniem soli i kształtami mierzonymi przez echosondę.

Jedynie programy UBRO i PROSACAV dostarczają takich możliwości.

## SUMMARY

Mathematical and physical model and its numerical implementation were described in the previous papers (Urbanczyk,

2017, 2018). This paper discusses application of the model in the mining practice. There are two types of simulation:

- Simulation of the future cavern development, used for:
  - designing of the leaching technology,
  - up-dating of the leaching technology.
- Tracing the cavern leaching going hitherto, used for:
  - current control leaching scenario,
  - history matching:
    - adjustment to salt production,
    - adjustment to sonar survey.

While designing of leaching technology, the following data are known or assumed: leaching coefficient, demanded shape, the following data are to be found: leaching technology (scenario) and brine concentration. Cavern size is the condition which determines termination of the stages in the leaching scenario.

The main goals of simulation on the conceptual or feasibility study level are as follows: estimation of leaching time needed for completing the caverns, estimation of quantity and concentration of produced brine for designing the infrastructure needed for brine management, and estimation of the costs. The cavern roof and bottom are usually known only in approximation, homogeneous properties of the rock salt massif and axial symmetry are assumed.

On the technical design level, the simulation must be more precise and detailed. The roof and bottom of the cavern have been already fixed by geologists, demanded cavern shape and size are verified by geomechanical modelling, Salt core has been sampled and laboratory tests made, so the leaching properties of the rock salt can be diversified with depth, but not with azimuth. The model is axi-symmetrical still. Limitations on the leaching technology are known as well. Several variants of the technology are modelled to choose the best of them.

Simulation on the level of up-dating the leaching technology is performed for the cavern being in leaching for some time. History matching should be made before that. The cavern shape and salt production in the model should be similar as in the actual field data. The model can be asymmetrical, with the shape profile and leaching coefficients different in azimuthal sectors.

There are examples of good agreement between computer prediction of the cavern development and actual leaching data (Charnavel, Lubin, 2002; Charnavel, Eyermaun, 2008), but sometimes they differ. It can be caused by geological reasons: insoluble content, or leaching coefficients other than assumed, layers absent in the core can enter into the leached cavern wall. The technological reasons can occur also: injection rate is not so regular as assumed, temperature inside the cavern is different, the blanket level is not precisely at the assumed depth.

Leaching data can be incorrect also: flowmeters can produce some errors, sonar survey can be unprecise because of in-

correctness in sound speed, incorrectness of sonar position, or problems with correct interpretation when multiple echoes occur. Registration through the leaching pipes is of poorer accuracy. Some part of the cavern can be invisible from the cavern axis etc.

Simulation which traces the cavern leaching is run using the leaching scenario prepared basing on leaching records. It does not need to be strictly exact and the injection rate can be averaged. Only great changes in injection rate (50-100% in a period longer than few hours) can be the reason to divide leaching into sub-stages. All breaks in injection lasting one day or longer should be present in the scenario as separate stages. Every change in pipes position or blanket level must be regarded as boundary point between sub-stages in leaching scenario. An example of averaging irregular water injection is presented in Fig. 1.

The modelling is run till the sonar survey. Then model concentration sequence (or salt production) is compared to that from the actual records. If difference is not significant we may continue modelling till the next sonar measurement, otherwise we should fit global leaching coefficients in the model according to salt production.

While tracing of the cavern leaching, the following data are known or assumed: leaching technology, brine concentration, the following data are to be found: cavern shape and brine concentration to compare model and measurements. The actual sub-stages duration is the condition which determines termination of the sub-stages in the leaching scenario.

Adjustment to salt production (history match simulations) one can perform having good concentration data. The first simulation should start with coefficients taken from similar case experience. If there is a significant difference between the data and the simulation results, this means that model coefficients are wrong. Thus global leaching coefficients are recalculated and the simulation of the leaching scenario is repeated. A few of such simulations are usually needed to fit the coefficients well enough.

The best material for history match are leaching records from the very beginning of cavern leaching until the first sonar measurement. In that case we start simulation from a very well-known shape i.e. the borehole. The first leaching stage is usually easy to simulate in all models, and simulation is fast.

Sometimes rock salt massif is so inhomogeneous that leaching coefficients could be well fitted only for some time period. Similar problem appears when cavern temperature has changed. Afterwards significant difference in salt production arises once more. So fitting needs to be repeated. In such a case production during regarded leaching period only should be taken to fitting procedure.

While adjustment to the salt production, the following data are known or assumed: leaching technology, brine concentration (salt production).

An example of adjustment to salt production based on data from initial period of leaching is presented in Fig. 2. Simulation was performed using UBRO software. An initial cut 20 m high has been leached. Scenario for regarded initial period of leaching is presented in Fig. 1. Circulation was direct, with injection near cavern bottom.

During the **first run with default values** of leaching coefficients (nominal horizontal coefficient -  $w_h = 12.986$  mm/h; vertical coefficient -  $w_v = 18.700$  mm/h) and cavern temperature of 30°C, total salt production of 6871 tons was obtained from the model. The real salt production calculated after concentration measurements was 3062 tons. All concentrations obtained from simulation using default values are significantly higher than measurements (Fig. 2).

So coefficients were globally diminished. New values ( $w_h = 8.65$  mm/h;  $w_v = 12.4$  mm/h) were used for next simulation, and the cavern temperature diminished to 10°C (**second run**). Concentration values given by the model during first 25 days (Fig. 2) approximately match measurements, during next days they are lower than measurements. Salt production from the model is too low – 2911 tons.

This time, the cavern temperature was increased up to 20°C for the last 10 days (**third run**). Salt production is eventually perfectly fitted – 3050 tons.

Geological conditions in rock-salt deposit where the cavern is located are often very complex. Especially in salt domes with complicated layering of salt, cavern wall during leaching can very often cut through layers unknown to geologists from borehole profile, and through layers with different properties. This is the reason why adjustment to sonar can be necessary.

While adjustment to sonar survey, the following data are known or assumed: Cavern shape given by the sonar and salt production, the following data are to be found: leaching coefficient differentiation (local values).

To adjust model parameters of the cavern to results of sonar measurement, one should do it between the leaching stages. When fitting the leaching coefficients to sonar shape, three values of cavern volume (or salt production) are to be compared:

- volume increase given by sonar (to obtain salt production one must take into account salt remaining in cavern brine, insoluble content and sump volume),
- volume increase concluding from salt production calculated from measurements of produced brine concentration (taking into account salt remaining in cavern brine, insoluble content and sump volume),
- volume increase (or salt production) given by computer simulation.

After adjustment to production no big difference between model production and mine records should occur. If sonar volume differs significantly one should carefully look for the reason. If existence of cavern zone „invisible” for sonar is su-

spected, sonar shape need to be „completed” before fitting the coefficients.

Cavern increases at successive depths and azimuths measured by sonar enable one to differentiate leaching coefficients in successive depths and azimuthal sectors. In software UBRO a special procedure KORLOG is included for the purpose. KORLOG details are discussed elsewhere (Kunzman, Urbańczyk, 1994a, 1994b).

Figs. 3-5 present the effects of KORLOG run. It is the same case of initial cut leaching as presented in Fig. 1 and Fig. 2. Cross-sections through the cavern shape for azimuths 34°-214° (the greatest asymmetry) are presented in Fig. 3. Cross-sections azimuths 124°-304° (the least asymmetry) are presented in Fig. 4. The shapes in Figs 3-4. present the active part of the cavern obtained in the first run, before adjustment to production, in the third run, after the adjustment and registered by the sonar, which became the cavern shape in the model after KORLOG run. 3D views of the above shapes are presented in Fig. 5. Differentiation of the leaching coefficient (dimensionless) made by KORLOG is presented in Fig. 6.

Usually new fitted leaching coefficients amend simulation results for next stages. Nevertheless if sonar data are inaccurate or incomplete, KORLOG may lead to worse results. Cavern shape with so-called “fingers” or “pockets” needs to be “pre-processed” before KORLOG use. In case of great difference between salt production measured and calculated by the model, adjustment done by KORLOG may be not sufficient. Small size increase, short time period (e.g. two-three months) between current and previous sonar measurements analysed by KORLOG should be avoided. In such cases, it is better to replace the cavern size only and remain with the previous leaching coefficients.

The adjustment of leaching coefficients can be treated as in-situ measurement. In salt domes, a global analysis of

all leaching coefficient values fitted in successive stages can give us some information about the geological structure of the dome. Interpolation map of coefficient distribution (Fig. 7.) is an example of such analysis. More results are presented two papers by Kunzman and Urbańczyk (1994a, 1994b).

#### LITERATURA

- CHARNAVEL Y., EYERMANN T., 2008. SalGas Validation and Benchmark. SMRI Fall2008 Technical Conference Austin, Texas, USA.
- CHARNAVEL Y., LUBIN N., 2002. Insoluble Deposit in Salt Cavern – Test Case – SMRI Fall 2002 Technical Conference, Bad Ischl, Austria
- EDLER D., 1997, Ankieta dla Technical Class podczas Konferencji Technicznej SMRI w Krakowie (niepublikowana).
- KUNZMAN A., URBAŃCZYK K., 1994a. The new UBRO version - leaching simulation code for asymmetrical caverns – result of applying to a Mogilno gas cavern. *SMRI Fall 1994 Meeting* Hannover, pp. 451-486.
- KUNZMAN A., URBAŃCZYK K., 1994b. Nowa wersja UBRO - program symulujący ługowanie w komorach asymetrycznych - rezultaty zastosowania dla komory zbiornikowej w Mogilnie. *Prz.Górn.* **10** (1994) 52-59.
- URBAŃCZYK K., 2017. Matematyczno-fizyczny opis procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. II). *Przegląd Solny / Salt Review*, **13** (2017) 47-66.
- URBAŃCZYK K., 2018. Model numeryczny procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. III). *Przegląd Solny / Salt Review*, **14** (2018) 54-69.
- URBAŃCZYK K.M., KUNZMAN A.S., 1990. Computer Codes for the Cavity Leaching Process. SMRI Meeting Paper, Paris October 1990.
- URBAŃCZYK K.M., KUNZMAN A.S., 1997. Computer Leaching Model in Monitoring Cavern Development. SMRI Meeting Paper, El Paso, Texas, October 1997, 157-176.
- VAN VLIET L.J.J., 1990. INVDIR: Comparison of INVDIR Results with Field Data - SMRI Fall 1990 Meeting Paper, Paris France.