

## Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych

Andrzej Kunstman<sup>1</sup>, Katarzyna Poborska-Młynarska<sup>2</sup>, Kazimierz Urbańczyk<sup>1</sup>



A. Kunstman



K. Poborska-Młynarska



K. Urbańczyk

**Construction of storage caverns in salt deposits — geological and mining aspects.** *Prz. Geol.*, 57: 819–828.

*A b s t r a c t.* In the last two decades two underground storage facilities were constructed by leaching caverns in salt domes in Poland. Although the storage facilities appeared successful, many wrong ideas about geological and technical problems connected with the underground storage in salt caverns are still popular. Therefore, the paper presents a brief review of the most important aspects of this subject along with history of underground storage in salt caverns, types of storage facilities and geological and technical conditions to be met in selection of the site. Moreover, the problems of water supply and brine recycling or disposal are also discussed and issues connected with spacing, shape and size of caverns and tightness and operation pressure ranged are presented.

**Keywords:** salt caverns, underground storage, solution mining

W ciągu ostatnich kilkunastu lat Polska weszła do nielicznej grupy krajów (Niemcy, USA, Kanada, Francja, Polska), które posiadają magazyny kawernowe w złożach soli zarówno dla gazu, jak i dla ropy oraz paliw. Możliwości budowy magazynów są w kraju nadal bardzo duże i dalsze inwestycje z pewnością będą kontynuowane. Jednakże temat podziemnego magazynowania w kawernach solnych nie jest powszechnie znany, w związku z tym pojawiają się nieporozumienia, fałszywe opinie i sensacyjne doniesienia prasowe.

Celem artykułu jest uporządkowanie podstawowych informacji na temat magazynowania w kawernach solnych. Autorzy skupiają się raczej na ogólniejszej analizie, z podaniem kontekstów wiążących w tej tematyce zagadnienia górnicze, geologiczne i ekonomiczne. Jeżeli ten tekst stanie się przydatny dla publicystów, to cel autorów będzie osiągnięty.

### Rozwój podziemnego magazynowania w złożach soli

Przez stulecia złoża soli kamiennej były źródłem surowca wykorzystywanego głównie do celów spożywczych. Od XIX w. sól kamienna stała się jednym z głównych surowców przemysłu chemicznego, a w dzisiejszych czasach znaczne jej ilości zużywa się również do zwalczania gołoleździ na drogach w zimie. Od lat 70. XX w. wykorzystanie złóż soli kamiennej zaczęło się zmieniać: coraz częściej na złoża soli kamiennej patrzy się jako na cenny „podziemny budulec”, tzn. kompleks skał, w którym można wykonać technikami górniczymi, wiertniczymi i ługowniczymi użyteczne podziemne przestrzenie. Z tej perspektywy uzyskiwana sól czy też solanka może stawać się nie tyle niepożądanym surowcem, ile uciążliwym odpadem.

Pusta przestrzeń, jaką można wytworzyć w złożu soli, znalazła ważne zastosowanie do podziemnego magazynowania substancji płynnych i gazowych. Technika

magazynowania ropy naftowej i ciekłych węglowodorów w ługowniczych kawernach solnych została opatentowana w 1916 r. w Niemczech, rozwinięta teoretycznie w Kanadzie w latach 40. XX w. i po raz pierwszy zastosowana w latach 50. w USA i Wielkiej Brytanii. Dzisiaj na świecie działa ponad tysiąc magazynowych kawern solnych. Następnym kilkaset jest w trakcie budowy lub są projektowane. Szczególnie zainteresowane budową kawern, głównie do magazynowania gazu ziemnego, są kraje Europy. Do tak dynamicznego rozwoju magazynowania w kawernach solnych przyczyniły się względy:

□ bezpieczeństwa — podziemny magazyn jest mniej wrażliwy na pożar, atak terrorystyczny czy działania wojenne;

□ ochrony terenu — tradycyjne zbiorniki na powierzchni, jeśli mają pomieścić podobne ilości produktu co magazyny podziemne, muszą zająć duże obszary, stonkowo niewielkie instalacje powierzchniowe podziemnych magazynów zaś łatwiej wkomponować w krajobraz lub w infrastrukturę; dotyczy to zwłaszcza magazynów gazu, bo w przypadku podziemnych magazynów produktów ciekłych na powierzchni muszą pozostać sporych rozmiarów zbiorniki na solankę manewrową;

□ finansowe — koszty budowy magazynów podziemnych, w porównaniu z kosztami budowy tradycyjnych zbiorników podobnej pojemności na powierzchni, są znacznie mniejsze; należy tu dodatkowo zauważyć, że ze wszystkich podziemnych magazynów gazu (kawerny solne, szcerpane złoża gazu, ośrodki porowate) najkorzystniejsze warunki poboru gazu są w kawernach solnych.

Kolejnymi okolicznościami przyczyniającymi się do rozwoju magazynowania właśnie w kawernach solnych są:

□ powszechność występowania złóż soli w wielu krajach,

□ specyficzne warunki hydrogeologiczne panujące w złożach solnych — szczelność złóż,

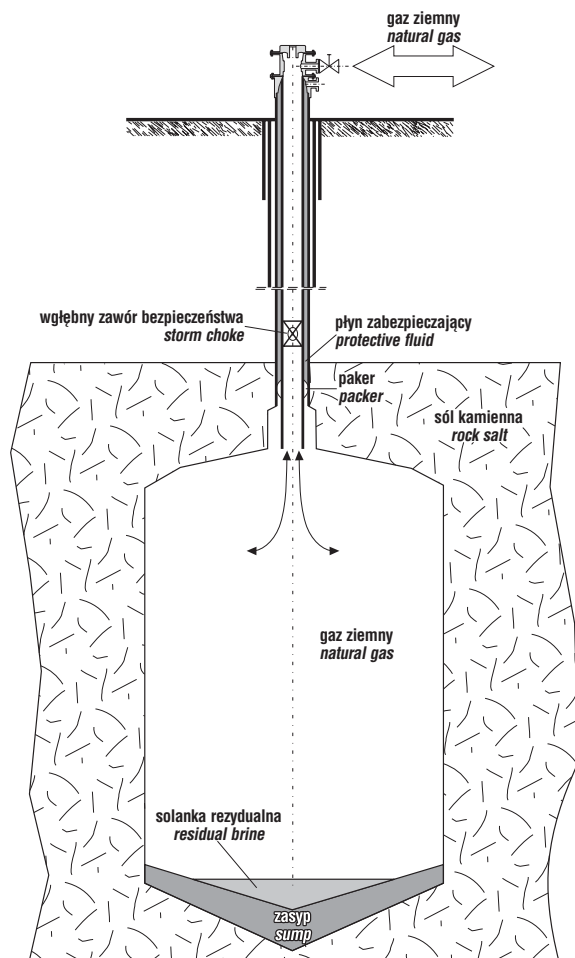
□ korzystne właściwości geomechaniczne soli kamiennej, tj. zwięzłość, nieprzepuszczalność, plastyczność odkształceń,

□ obojętność chemiczna soli względem większości magazynowanych substancji,

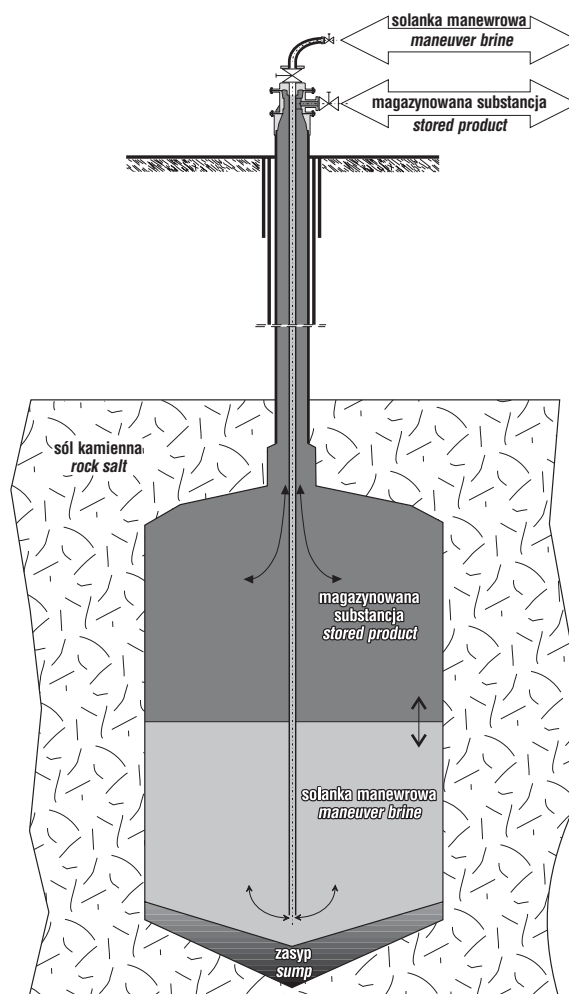
□ duża miąższość złóż solnych, umożliwiająca budowę magazynów podziemnych znacznej objętości.

<sup>1</sup>OBRGSCHEM Chemkop Sp. z o.o., 31-261 Kraków, ul. J. Wybickiego 7; z4kunstm@cyf-kr.edu.pl, kazeku@poczta.onet.pl

<sup>2</sup>Wydział Górniczo-Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; kpm@agh.edu.pl



Ryc. 1. Schemat kawerny magazynowej gazu ziemnego  
Fig. 1. Scheme of natural gas storage cavern



Ryc. 2. Schemat kawerny magazynowej substancji ciekłej  
Fig. 2. Scheme of liquid product storage cavern

### Podział magazynów w złożach soli

#### Podział z uwagi na rodzaj magazynowanego medium (i technikę magazynowania):

□ **Magazyny substancji gazowych** wykorzystujące ścisłość gazu (ryc. 1). W trakcie ich pierwszego napełniania gazem są opróżniane z solanki i potem pracują pod zmiennym ciśnieniem gazu. Ich robocza pojemność mieści się w granicach od ciśnienia minimalnego do maksymalnego. Przede wszystkim są to magazyny gazu ziemnego, ale spotyka się też kawerny magazynowe na sprężone powietrze (dla elektrowni szczytowych). Przewiduje się też magazynowanie wodoru i dwutlenku węgla. Kawerny takie mają z reguły dużą objętość (rzędu 50 000 m<sup>3</sup>) i są zwykle budowane na dużej głębokości (od tysiąca kilkuset do dwóch tysięcy metrów). Określa się je czasem terminem *komory oddychające*.

□ **Magazyny substancji ciekłych** (i niektórych gazów w warunkach nadkrytycznych) wypierane solanką manewrową (ryc. 2). Podczas zatłaczania magazynowanego płynu z kawerny wypływa nasycona solanka, która musi być zagospodarowana lub przechowana. Z kolei do wytlóczenia produktu z kawerny jest konieczna odpowiednia ilość solanki (zwykle nasyconej). Właściwa gospodarka solanką jest więc bardzo istotnym elementem pracy magazynu paliw płynnych. W taki sposób są magazynowane: ropa naftowa, olej opałowy i napędowy, płynny propan-butan (LPG), etylen, propylen itd. Kawerny są zwykle lokowane płycej (na kilkaset metrów głębokości) i mają mniejszą

objętość (100 000–200 000 m<sup>3</sup>), z wyjątkiem komór na ropę, które są na ogół duże.

Jako magazyny substancji ciekłych kawerny ługownicze niemal nie mają konkurencji. Oprócz nich do podziemnego magazynowania stosuje się jedynie komory wykonywane metodą górniczą w skałach zwięzłych. Nie odgrywają one jednak znaczącej roli, wyjąwszy Skandynawię, Japonię, Koreę Płd. i Australię. Natomiast w przypadku podziemnego magazynowania gazu ziemnego wykorzystuje się również szcerpane złoża gazu i antyklinalnie wygięte warstwy wodonośne (tab. 1).

#### Podział z uwagi na ekonomikę wykorzystywania magazynów:

□ **Magazyny strategiczne**, przechowujące paliwa przez wiele lat, mają na celu zapewnienia płynności dostaw w warunkach kryzysu (wojny, embarga, katastrofy). Dotyczy to zwłaszcza magazynów ropy naftowej. Największe takie rezerwy posiadają USA (SPR — *Strategic Petroleum Reserve*) i Niemcy (EBV — *Erdölbevorratungsverband*). Takie magazyny są opróżniane raz na kilkanaście lat. Ich głównym celem jest stabilizacja cen i zapewnienie bezpieczeństwa dostaw. Obowiązek posiadania strategicznych zapasów niektórych mediów nakazują ustawy, a także dyrektywy UE; często władze państwowe zastrzegają sobie prawo decyzji o uruchomieniu rezerw.

□ **Magazyny awaryjne**, podobne do magazynów strategicznych, są wykorzystywane podczas przewidzianych

**Tab. 1. Podstawowe cechy magazynów gazu w kawernach solnych w porównaniu z magazynami w ośrodkach porowatych (warstwy wodonośne i szcerpane złoża gazu)**

Table 1. Basic characteristic of storage sites in salt caverns and porous media (aquifers and exhausted natural gas deposits)

Kawerny solne <i>Salt caverns</i>	Ośrodki porowate <i>Porous media</i>
Wysoka długotrwała wydajność poboru i zatłaczania gazu <i>High and long term efficiency of gas filling-in and withdrawal</i>	Niska i zmniejszająca się w czasie wydajność poboru i zatłaczania gazu <i>Low and decreasing in time efficiency of gas filling-in and withdrawal</i>
Możliwość wielu cykli zatłaczania i poboru w ciągu roku <i>Capability of many pumping-in and withdrawal cycles per year</i>	Zwykle możliwość jednego lub dwóch cykli zatłaczania i poboru w ciągu roku <i>Usually capability of one or two cycles of pumping-in and withdrawal</i>
Zwykle dłuższy czas budowy (czas na ługowanie kawern) <i>Usually longer time for site construction (time needs for caverns leaching)</i>	Krótszy czas budowy w wyczerpanych złożach gazu (część otworów istnieje) <i>Shorter time for site construction in exhausted gas deposits (part of the drilling holes still exists)</i>
Mała tzw. poduszka gazowa, zwykle ok. 20% objętości roboczej <i>Low volume of cushion gas, usually about 20% of gas working volume</i>	Duża tzw. poduszka gazowa, do 100% i więcej objętości roboczej <i>High volume of cushion gas, up to 100% and more of gas working volume</i>
Zwykle większy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę pojemności gazu w magazynie <i>Usually higher costs of investment per gas volume unit in storage site</i>	Zwykle mniejszy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę pojemności gazu w magazynie <i>Usually lower costs of investment per gas volume unit in storage site</i>
Znacznie mniejszy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę wydajności poboru gazu z magazynu <i>Distinctly lower costs of investment per gas withdrawal unit in storage site</i>	Znacznie większy koszt inwestycji w przeliczeniu na jednostkę wydajności poboru gazu z magazynu <i>Distinctly higher costs of investment per gas withdrawal unit in storage site</i>

lub nieprzewidzianych przerw w dostawach, np. umożliwiają ciągłość zaopatrzenia odbiorców na wypadek planowego lub awaryjnego remontu rurociągu u zagranicznego dostawcy.

□ **Magazyny sezonowe** mają na celu wyrównanie podaży i popytu sezonowego lato-zima na niektóre paliwa, jak gaz ziemny, LPG czy olej napędowy i opałowy. Takie magazyny są opróżniane raz do roku, a ich głównym celem jest możliwość równomiernego wykorzystywania mocy produkcyjnych rafinerii czy dostawców gazu do pokrywania nierównomiernego popytu sezonowego.

□ **Magazyny szczytowe** wyrównują szczytowy popyt na paliwa w okresach godzinowych lub dniowych. Klasyfikacją przykładową mogą być tu kawernowe magazyny sprężonego powietrza działające w cyklu dobowym: w godzinach mniejszego zapotrzebowania na energię elektryczną powietrze jest sprężane w kawernie, po czym w godzinach szczytowego zapotrzebowania zmagazynowana energia mechaniczna sprężonego powietrza jest wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej.

□ **Magazyny koniunkturalne** w krajach, gdzie cenami rządzi rynek, ceny gazu, ropy i paliw zmieniają się nieraz bardzo szybko. Opłaca się więc w momentach niskich cen zmagazynowanie zapasów, które zostaną sprzedane, gdy ceny pójną w górę. Do takich magazynów należą liczne kawerny LPG w USA, których właściciele wykorzystują kilkudniowe skoki cen tego paliwa do szybkich transakcji.

#### Podział z uwagi na rodzaj wyrobisk górniczych:

□ specjalnie zaprojektowana kawerna — zalicza się tu zdecydowana większość magazynów, np. kawerny magazynowe gazu ziemnego w wysadzie Mogilno;

□ kawerna adaptowana z istniejącej komory ługowniczej — np. komory magazynowe ropy naftowej w wysadzie Góra (ryc. 3); przypadki takie nie są liczne, gdyż najczęściej komory zaprojektowane jedynie do produkcji solanki nie spełniają wymagań stawianych komorom magazynowym; obecnie z reguły kawerny ługownicze od samego początku są projektowane w ten sposób, by po zakończeniu wydobycia solanki mogły być bez większych nakładów wykorzystane do magazynowania;

□ podziemne wyrobiska kopalni soli wykorzystane po ich przystosowaniu jako magazyn ropy naftowej lub gazu — takie przypadki są wyjątkowe i nie będą tutaj omawiane.

#### Magazyny kawernowe na świecie

##### Kawernowe Podziemne Magazyny Gazu (KPMG).

Absolutnym potentatem w magazynowaniu gazu w KPMG są Niemcy, posiadające aktualnie 22 magazyny gazu w kawernach solnych — razem 172 kawerny, o łącznej pojemności roboczej 7612 mln Nm<sup>3</sup> gazu<sup>3</sup> i możliwości poboru do 275 mln Nm<sup>3</sup>/d gazu. W USA i Kanadzie (statystyki podają zazwyczaj oba te państwa łącznie, jako że ich rynek gazowy jest mocno zintegrowany) istnieją 34 magazyny gazu ziemnego w kawernach solnych, ulokowane w 8 stanach i prowincjach, mające łączną pojemność roboczą ok. 5 mld Nm<sup>3</sup>. Jest to więc o ponad 2,5 mld Nm<sup>3</sup> mniej niż w Niemczech. Poza Niemcami w Europie, w pięciu krajach: Francji, Polsce, Wielkiej Brytanii, Danii i Portugalii, istnieje 8 KPMG ze 127 kawernami o łącznej pojemności roboczej 2369 mln Nm<sup>3</sup> gazu i łącznej możliwości poboru do 100 mln Nm<sup>3</sup>/d gazu (Gillhaus, 2008).

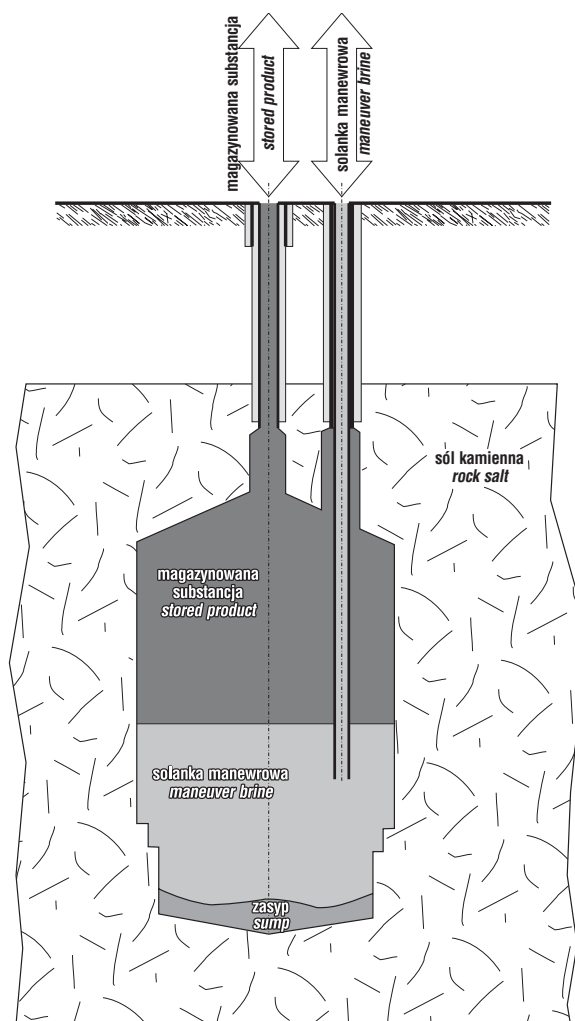
Poza Ameryką Północną i Europą w zasadzie nie ma przemysłowo działających KPMG; Chiny są w trakcie budowy pierwszego magazynu, Turcja od kilku lat zamierza budować magazyn w Tuz Golu, a stary posowiecki magazyn w Armenii, według informacji specjalistów *Gazpromu*, nie działa obecnie z przyczyn technicznych.

Tak więc Niemcy dysponują obecnie ponad połową ogólnoświatowej pojemności roboczej gazu ziemnego zmagazynowanego w KPMG. Ta absolutna supremacja Niemiec wynika z kilku faktów (Sedlacek, 1999, 2008):

□ Niemcy mają jedne z najbardziej korzystnych na świecie warunków geologicznych do budowy KPMG — m.in. liczne wysady solne w zagłębiu cechsztyńskim (ponad 100 wysadów), z których część leży w pobliżu

<sup>3</sup>1 Nm<sup>3</sup> — metr sześcienny normalny; ilość suchego gazu zawarta w objętości 1 m<sup>3</sup> pod ciśnieniem 101,325 kPa i w temperaturze 0°C.





**Ryc. 3.** Schemat kawerny magazynowej ropy naftowej w PMRiP Góra. Podczas konwersji komory produkującej solankę na kawernę magazynową wierce się dodatkowy otwór, by zapewnić dostateczną wydajność operacji magazynowych  
**Fig. 3.** Scheme of crude oil storage cavern in PMRiP Góra. When brine producing cavern is converted into a storage cavern an additional well is drilled to provide sufficient operation rate

wybrzeża morskiego. Podobnie sprzyjające warunki występują tylko w USA w Luizjanie i Teksasie.

□ Położenie Niemiec na trasie północ–południe (Norwegia–Włochy) i wschód–zachód (Rosja–Francja) jest korzystne, jeśli chodzi o budowę magazynów o dużej pojemności, wspomagających główne rurociągi gazowe w sytuacjach krytycznych. Magazyny te muszą dodatkowo umożliwić w razie potrzeby duży pobór gazu.

□ Niemcy mają wielowiekowe tradycje eksploatacji soli, a ich technologia ługowania jest najnowocześniejsza na świecie.

□ Położenie dużej części wysadów niemieckich w pobliżu morza upraszcza problem dostarczania wody i odbioru solanki — możliwe jest ługowanie wodą morską i zrzut solanki do morza.

□ Zaawansowanie technologiczne Niemiec w dziedzinie instalacji przemysłowych ułatwia budowę naziemnych urządzeń magazynu — kompresorów, absorberów, kotłowni itd.

□ Gęsta sieć gazociągów przesyłowych w Niemczech ułatwia dołączenie magazynu do systemu przesyłu gazu.

Imponujący jest zakres prowadzonych i projektowanych inwestycji KPMG w Niemczech — 7,2 mld Nm<sup>3</sup> pojemności roboczej (Sedlacek, 2008). To niemal podwojenie obecnej pojemności w ciągu najbliższych kilkunastu lat.

Polska, z jednym jak dotychczas KPMG *Mogilno* (10 kawern — 500 mln Nm<sup>3</sup> pojemności roboczej gazu i możliwość poboru do 20,6 mln Nm<sup>3</sup>/d gazu), znajduje się na piątym–szóstym miejscu w świecie pod względem pojemności roboczej gazu w kawernach solnych. Chociaż w Polsce ruszyła budowa KPMG *Kosakowo* (250 mln Nm<sup>3</sup> pojemności roboczej) i trwa rozbudowa *Mogilna*, to wkrótce wyprzedzi nas Wielka Brytania, w której trwają ogromne inwestycje w budowę magazynów o pojemności roboczej rzędu 5 mld Nm<sup>3</sup>.

Rozbudowane też będą magazyny francuskie. Budowę pierwszych KPMG zaczyna Holandia, a w fazie planowania są one w Rosji i Bułgarii. Zestawienie informacji o KPMG na terenie Europy i o przewidzianych inwestycjach zawiera strona internetowa organizacji *Gas Infrastructure Europe (Storage Investment Database)*, <http://www.gie.eu.com/gse/storageprojects>. Wiele technicznych kwestii związanych z kawernami gazu ziemnego reguluje europejska norma (EN 1918-3, 1998), której polskim odpowiednikiem jest PN-EN 1918-3 (*Polska Norma...*, 2001).

**Podziemne Magazyny Ropy i Paliw (PMRiP).** Magazyny ropy i paliw mają zwykle charakter strategiczny. Magazyny takie istnieją tylko w kilku krajach na świecie — w USA, Niemczech, Francji, Kanadzie i Polsce. Wielka Brytania, która jako jedna z pierwszych zbudowała PMRiP w Plumley (Cheshire), po odkryciu złóż ropy na Morzu Północnym przestała utrzymywać rezerwy strategiczne.

W USA rezerwami strategicznymi ropy naftowej zajmuje się wspomniana już agencja SPR. Agencja SPR posiada obecnie cztery duże podziemne magazyny na ropę naftową w złożach soli Luizjany (LA) i Teksasu (TX) nad Zatoką Meksykańską Missisipi i jeden w budowie:

□ Bayou Choctaw-Iberville Parish, LA — 6 kawern, średnio po 2 mln m<sup>3</sup>,

□ West Hackberry-Cameron Parish, LA — 22 kawerny, średnio po 1,65 mln m<sup>3</sup>,

□ Bryan Mound-Brazoria County, TX — 20 kawern, średnio po 2 mln m<sup>3</sup>,

□ Big Hill-Jefferson County, TX — 14 kawern, średnio po 2 mln m<sup>3</sup>; magazyn jest w rozbudowie, liczba kawern może być już dziś większa,

□ Richton-Perry County, MS (30 km na wschód od Hattiesburg) — w budowie 16 kawern, średnio po 1,59 mln m<sup>3</sup>.

Łącznie obecna operacyjna pojemność magazynowa SPR wynosi ok. 727 mln baryłek (czyli ok. 115 mln m<sup>3</sup> bądź ok. 98 mln t ropy). Komory magazynowe SPR zostały wykonane i napełnione ropą na przełomie lat 70. i 80. jako rezerwa strategiczna. Po rozbudowie operacyjna pojemność magazynowa SPR ma osiągnąć 1 mld baryłek (czyli ok. 159 mln m<sup>3</sup> bądź ok. 135 mln t ropy). Łączna zdolność opróżniania z wszystkich magazynów SPR będzie wówczas wynosić 5,9 mln baryłek na dobę, czyli 39 000 m<sup>3</sup>/h.

W Niemczech rezerwami strategicznymi ropy naftowej i jej produktów zajmuje się wspomniana już rządowa agencja EBV. Na ropę i produkty naftowe agencja EBV posiada obecnie cztery duże magazyny podziemne w złożach soli w północnej części kraju nad Morzem Północnym:

□ Heide — na północny zachód od Hamburga, 9 kawern na ropę i produkty, pojemność do 420 tys. m<sup>3</sup>, głębokość 1200–2000 m,

□ Sottorf — na południowy zachód od Hamburga, 9 kawern na ropę i produkty, pojemność do 390 tys. m<sup>3</sup>, głębokość 470–1010 m,

□ Rüstringen — koło Wilhelmshaven, 35 kawern na ropę i produkty, pojemność do 250 tys. m<sup>3</sup>, głębokość 530–1160 m,

□ Lesum — koło Bremen, 5 kawern na lekki olej opałowy, pojemność do 270 tys. m<sup>3</sup>, głębokość 590–1150 m.

Bieżącą obsługę magazynów strategicznych Niemiec, na zlecenie EBV, wykonuje firma *Nord-West Kavernen GmbH*. Obecnie niemiecka pojemność magazynowa ropy i paliw wynosi ok. 200 mln baryłek (30 mln t), a zmagazynowane zapasy (dane z 2005 r.) — 25,2 mln t (w tym 13,4 mln t ropy i 11,8 mln t paliw), przy czym zapasy paliwa są tu liczone łącznie ze zbiornikami powierzchniowymi. Prócz tego część kawern na wysadzie Etzel służy firmom prywatnym do magazynowania ropy i paliw (pojemność rzędu 8 mln t).

We Francji rezerwami strategicznymi ropy naftowej i jej produktów zajmuje się agencja rządowa CPSSP (*Comitee Profesional des Stocks Strategiques Petroliers*), a na jej zlecenie bieżącą obsługę magazynów strategicznych prowadzi firma SAGESS (*Societe Anonyme de Gestion de Stocks de Securite*).

Według francuskich przepisów każda firma naftowa wprowadzająca na rynek francuski produkty naftowe musi płacić do CPSSP opłatę na rezerwy strategiczne. Przykładowo, w 2004 r. zebrano z tych opłat 254 mln €. Z wpływów CPSSP finansuje przechowywanie rezerw. W 2004 r. rezerwy wynosiły 12,2 mln t (razem ropa i produkty), z czego SAGESS przechowywał 7,8 mln t.

Głównym magazynem rezerw wykorzystywanym przez SAGESS jest magazyn firmy *Geosel*, rozbudowywany w latach 1968–1978 w komorach solnych w Manosque (południowa Francja), obejmujący 26 komór o pojemności 100–450 tys. m<sup>3</sup>, łącznie 6 mln m<sup>3</sup>. Wydajność opróżniania ropy naftowej z magazynu Manosque osiąga 1300 m<sup>3</sup>/h.

W Kanadzie nie ma rezerw strategicznych, gdyż kraj ten jest eksporterem ropy (głównie z piasków bitumicznych), jednak firmy naftowe w prowincji Alberta używają komór solnych jako magazynów buforowych, żeby zapewnić ciągłości pracy. Również w prowincji Ontario magazynuje się produkty naftowe w kawernach solnych (73 czynne kawerny).

W Polsce jedynym PMRiP jest magazyn *Góra* koło Inowrocławia, należący do PKN *Orlen*, gdzie w 10 kawernach zmagazynowano ok. 4 mln t ropy i 1 mln t paliw.

### Geologiczne aspekty budowy magazynowych komór solnych

**Ogólne warunki techniczne budowy i eksploatacji podziemnego magazynu:**

□ dostępność złoża soli o dostatecznie rozpoznanych, korzystnych warunkach geologicznych i górniczych,

□ dostępność wody do ługowania,

□ możliwość zagospodarowania bądź zrzutu solanki powstałej w trakcie ługowania kawern magazynowych,

□ lokalizacja złoża soli umożliwiająca połączenie magazynu z siecią rurociągów po rozsądnych kosztach,

□ dostępność technologii oraz wyposażenia do budowy i eksploatacji magazynu kawernowego,

□ posiadanie odpowiednich funduszy na inwestycję.

Najważniejszym z wymienionych warunków jest pierwszy: geologiczno-górnice warunki w złożu solnym są decydujące dla pomyślności inwestycji. Pozostałe

warunki (problemy z wodą, solanką, rurociągami, *know-how*), chociaż wpływają na koszt i czas budowy magazynu, mogą być zwykle spełnione w mniej lub bardziej korzystny sposób.

Kawerny ługownicze przeznaczone do magazynowania substancji użytecznych w złożach soli kamiennej jako zbiorniki powinny mieć odpowiednie:

□ pojemność,

□ szczelność,

□ długotrwałą stateczność geomechaniczną,

□ ciśnienie i temperaturę magazynowania,

□ wydajność zatłaczania i poboru magazynowanych substancji.

Wymagania są tu większe niż dla komór ługowniczych przeznaczonych jedynie do produkcji solanki. Szczególnie ważne jest wykonanie komór o regularnych kształtach i wymiarach, zgodnych z projektowanymi. Daje to gwarancje odpowiedniej pojemności komór, długotrwałej stateczności geomechanicznej, a także szczelności i możliwości odbioru produktów bez strat. Wykonanie takich kawern zależy od możliwości zastosowania technologii ługowniczej i od budowy geologicznej złoża solnego, m.in. od kształtu złoża, głębokości zalegania, budowy wewnętrznej, miąższości warstw solnych i składu litologicznego (Kunstman i in., 2002).

**Forma i wielkość złoża solnego.** Budowa geologiczna złóż solnych bywa bardzo zróżnicowana — od stosunkowo prostej w regularnie zalegających złożach pokładowych, do bardzo skomplikowanej w wysadach solnych. Ma ona decydujące znaczenie podczas lokalizacji i budowy komór magazynowych.

Najbardziej korzystne są złoża, w których czyste sole kamienne występują w postaci dużych jednorodnych kompleksów. Brak ograniczeń przestrzennych w takich złożach pozwala na rozmieszczenie pożądanej ilości komór o wymaganej objętości i wydzielenie filarów bezpieczeństwa i granicznych. Rozpuszczanie soli przebiega tu równomiernie i jest możliwa pełna kontrola nad procesem ługowania komór. Duże kompleksy jednorodnej soli kamiennej można spotkać zarówno w pokładach o dużej miąższości, jak i w wysadach solnych, ale tak korzystne warunki występują w złożach wyjątkowo. Najczęściej rozprzestrzenienie warstw solnych w złożach jest ograniczone, podobnie jak jakość i jednorodność soli.

**Głębokość zalegania złoża.** Kawerny magazynowe są wykonywane w złożach solnych na różnej głębokości, przeważnie do ok. 1500 m, a wyjątkowo głębiej. Warunki geologiczno-górnice w kawernach posadowionych płycej są korzystniejsze w porównaniu z kawernami wykonanymi głęboko.

Wraz z głębokością rośnie ciśnienie litostatyczne i temperatura skał. Skutkiem tego głębiej posadowione kawerny ulegają szybszemu zaciskaniu — konwergencji, a otaczającą górotwór ulega deformacjom i przemieszczeniom. Może to doprowadzić do utraty szczelności kawerny. Konwergencja kawerny jest powstrzymywana ciśnieniem magazynowanych substancji — hydrostatycznym i wytworzonym poprzez ich sprężanie (w przypadku gazu). Nie może ono jednak przekraczać tzw. ciśnienia szczelinowania górotworu na danej głębokości, tzn. ciśnienia niszczącego strukturę skały, wywieranego przez substancję wypełniającą kawernę. Ze względu na ciśnienie szczelinowania górotworu i pożądane ciśnienie magazynowania w przypadku kawern gazowych lokowanych w wysadach solnych wyznacza się interwały głębokości posadowienia

tych kawern, określając zarówno głębokość minimalną, jak i maksymalną. Kawerny magazynowe na produkty płynne powinny być lokowane płytko, ponieważ z głębokością rośnie koszt pompowania produktu podczas napełniania. Z kolei kawerny gazowe powinny być zakładane głęboko, gdyż im głębiej, tym większe możliwe ciśnienie magazynowania gazu, a więc tym większa pojemność robocza danej kawerny.

**Mięszość warstw solnych.** W regularnych pokładach solnych, zalegających poziomo lub z niewielkim upadem, wysokość komór jest ograniczona mięszością pokładu. Jako mięszość minimalną, pozwalającą na wykonanie kawerny magazynowej o wysokości kilkudziesięciu metrów z zachowaniem niezbędnych calizn bezpieczeństwa, przyjmuje się orientacyjnie mięszość ok. 100 m. W wysadach solnych sole kamienne mogą osiągać w profilach wierceń znaczną mięszość pozorną, np. przekraczającą 1000 m, ze względu na strome zapadanie warstw. W takich warunkach można budować kawerny magazynowe dużej wysokości, rzędu kilkuset metrów.

**Litologia i rozmieszczenie skał w złożu.** Zasadnicze znaczenie w procesie ługowania komór ma wewnętrzna budowa geologiczna złoża: skład mineralny, litologia oraz sposób wykształcenia i ułożenia warstw. Zmienność litologiczna złoża jest zasadniczo niekorzystna. Czynnikiem niekorzystnym są w szczególności (ryc. 4):

□ zanieczyszczenia soli kamiennej nierozpuszczalnym materiałem skalnym (głównie anhydrytem i minerałami ilastymi), które hamują ługowanie (dopuszczalna zawartość części nierozpuszczalnych w soli kamiennej stanowi co najwyżej 20% objętości);

□ obecność w złożu warstw skał nierozpuszczalnych (anhydryty, ilowce) — warstwy o mięszości powyżej 1 m powodują poważne zakłócenia w prawidłowym rozwoju kawerny, a rozmakające podczas ługowania ilowce wypełniają dolne części kawerny, ograniczając jej czynną objętość i hamując ługowanie;

□ obecność w złożu minerałów i skał łatwiej rozpuszczalnych od soli kamiennej (sole potasowo-magnezowe)

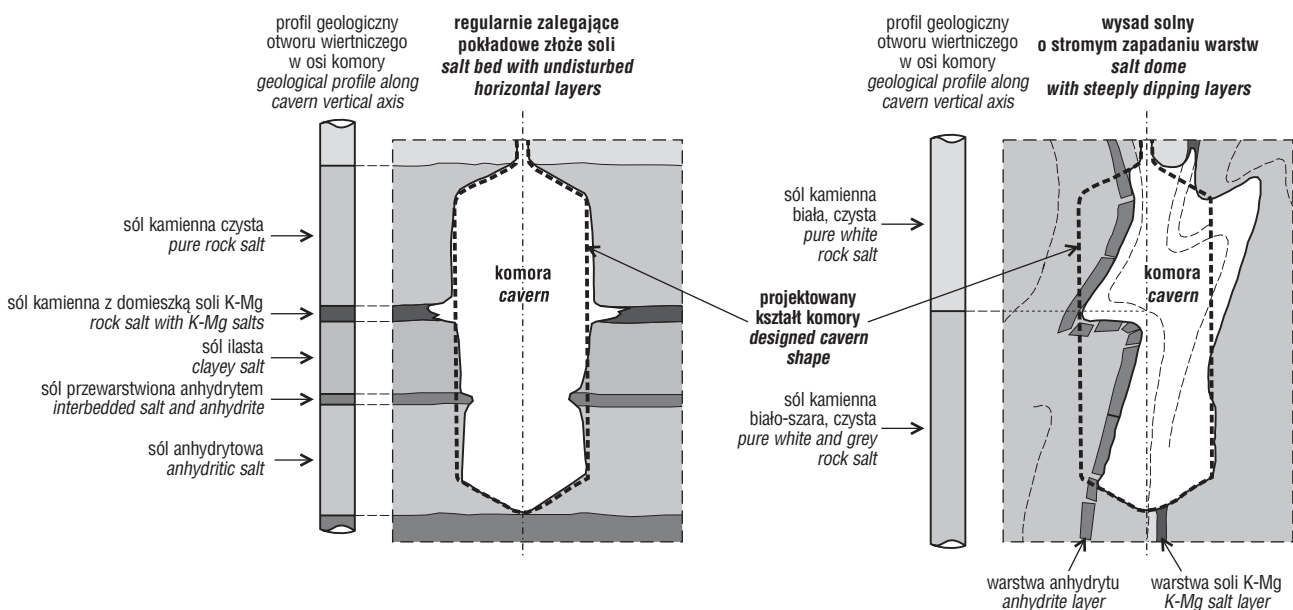
— przerosty, przewarstwienia oraz inne formy występowania soli potasowych powodują niekontrolowany rozrost komór, powstawanie „kieszeni” oraz możliwość przeługowania filarów międzykomorowych.

Ze względu na wewnętrzną budowę złoża najkorzystniejsze warunki do regularnego rozwoju komór podczas ługowania występują w poziomych pokładach soli. Zmienność litologiczna ma tu kierunek pionowy, zgodny zarówno z rozpoznaniem wiertniczym, jak i kierunkiem ługowania (od spągu do stropu kawerny). Ułatwia to projektowanie przebiegu procesu ługowania i wykonanie kawerny w odpowiednim kształcie.

W złożach o zaburzonej i nieregularnej budowie wewnętrznej zmienność litologiczna może mieć różne kierunki. Wówczas rozpoznanie budowy geologicznej w profilu wiercenia może się okazać niewystarczające, aby poprawnie zaprojektować przebieg procesu ługowania, a wykonanie kawerny ługowniczej o pożądanym kształcie i rozmiarach staje się trudniejsze lub wręcz niemożliwe (ryc. 4, 5) (Kunstman i in., 2002).

**Podatność na ługowanie.** Skały złoża solnego różnią się podatnością na ługowanie, tzn. praktyczną szybkością rozpuszczania. Podatność na ługowanie zależy głównie od: rozpuszczalności minerałów wchodzących w skład skały, struktury i tekstury skały, ilości i formy występowania domieszek nierozpuszczalnych, zawartości inkluzji i gazonośności. Najłatwiej rozpuszczalne w wodzie są sole chlorkowe potasu i magnezu. Łatwo rozpuszczalna jest sól kamienna, ale jej podatność na ługowanie jest zróżnicowana — szybszemu rozpuszczaniu ulegają sole czyste, grubokrystaliczne, wolniej ługują się sole drobnokrystaliczne, anhydrytowe i ilaste. Praktycznie nierozpuszczalne są skały siarczanowe, węglanowe i ilowce.

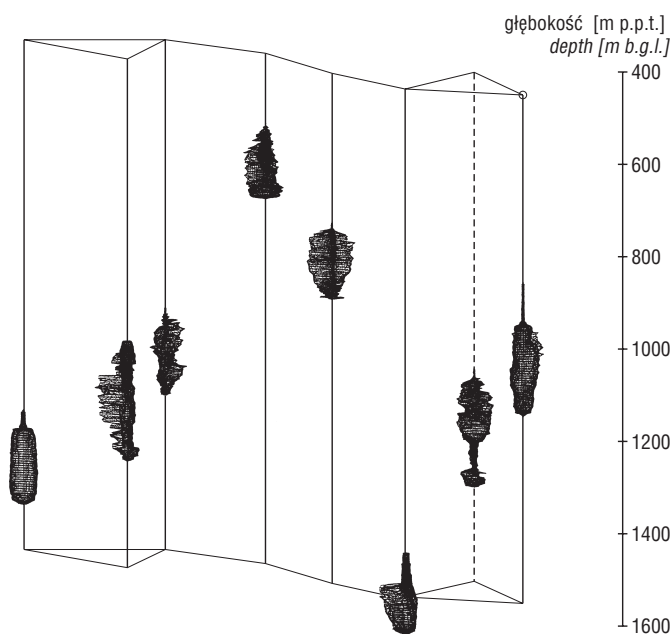
**Ocena warunków geologicznych w złożu i lokalizacja komór magazynowych.** Rozpoznanie warunków geologicznych złoża prowadzi do oceny jego przydatności do budowy komór magazynowych. Ocena przydatności złoża i wybór miejsca na kawerny magazynowe odbywa się etapami, w miarę zaawansowania geologicznych prac rozpo-



**Fig. 4.** Wpływ budowy wewnętrznej złoża na przebieg ługowania i kształt komory: **A** — w regularnie zalegającym złożu pokładowym; **B** — w wysadzie solnym o stromo zapadających warstwach (Kunstman i in., 2002, 2007)

**Fig. 4.** Influence of salt deposit internal structure on cavern development and final shape: **A** — salt bed with undisturbed horizontal layers; **B** — salt dome with steeply dipping layers (Kunstman et al., 2002, 2007)





**Ryc. 5.** Pierwszy etap budowy KPMG *Mogilno* — kawerny musiały być posadowione na różnej głębokości, niektóre z nich mają nieregularny kształt (Ślizowski, 2006)

**Fig. 5.** First stage of KPMG *Mogilno* construction — caverns had to be located at different depths and often irregular in shape (Ślizowski, 2006)

znawczych i badawczych — od prognoz dotyczących budowy geologicznej złoża, poprzez lokalizację wierceń badawczo-eksploatacyjnych w złożu, wykonanie wierceń wraz z badaniami geologicznymi i geofizycznymi (m.in. rdzeniowanie z uzyskiem co najmniej 80% rdzenia w złożu), aż po ocenę przydatności otworu i podjęcie decyzji o lokalizacji kawerny w osi otworu wiertniczego. Aż do ostatniego etapu, tzn. oceny warunków geologicznych na podstawie badań wiertniczych, istnieje ryzyko napotkania warunków niekorzystnych lub niewystarczających do lokalizacji komór magazynowych. Ryzyko to jest niewielkie w regularnie zalegających złożach pokładowych i duże w złożach o skomplikowanej budowie wewnętrznej (wysady solne).

**Znaczenie właściwego rozpoznania warunków geologiczno-górnictwowych złoża soli.** Rozpoznanie istotnych parametrów złoża soli z właściwą dokładnością wymaga szerokiego zakresu badań, pomiarów i testów, m.in.: powierzchniowych pomiarów geofizycznych (od grawimetrii do sejsmiki 3D), odwiercenia otworów rozpoznawczych z profilowaniem geofizycznym i rdzeniowaniem skał solnych (z pobraniem próbek) oraz laboratoryjnych badań właściwości geomechanicznych, chemicznych i ługowniczych skał solnych.

Jeżeli w trakcie projektowania i budowy podziemnego magazynu w kawernach solnych zostaną popełnione błędy w instalacjach naziemnych, to zawsze można je poprawić (kwestia kosztu i czasu). Błędów w wyborze miejsca na kawernę bądź w jej ługowaniu już poprawić się nie da.

**Niezbędne badania laboratoryjne próbek rdzenia wiertniczego.** Badania te są robione na próbkach skał solnych pobranych z rdzenia wiertniczego z otworów magazynowych, z głębokości lokowanej kawerny. Ich celem jest oznaczenie składu chemicznego i mineralogicznego soli, właściwości ługowniczych (np. szybkości ługowania) oraz parametrów geomechanicznych (testy doraźne i reologiczne

przy długotrwałym obciążeniu). W kawernach przeznaczonych do magazynowania gazów jest wskazane zbadanie właściwości termicznych górotworu przynajmniej w jednym otworze.

### Pobór wody i zagospodarowanie solanki

Podstawowe kwestie, które muszą zostać rozwiązane podczas podejmowania decyzji o inwestycji, to sprawa zaopatrzenia w wodę do ługowania oraz sposób zagospodarowania uzyskiwanej solanki. Duże znaczenie ma tu lokalizacja magazynu:

□ Nadmorska — praktycznie nieograniczona możliwość poboru wody morskiej. Zwykle wiąże się to jednocześnie z możliwością zrzutu solanki do morza — oba rurociągi (wodny i solankowy) mogą iść blisko siebie. Przykładem tego typu rozwiązania jest KPMG *Kosakowo* (PGNiG), gdzie solanka ma być zrzucana do Zatoki Puckiej.

□ W głębi lądu — ujęcie wody z rzeki, jeziora lub wód podziemnych. Zwykle ograniczona jest ilość wody, a rurociągi wodny i solankowy idą zupełnie oddzielnie, potrzebny jest też odbiorca solanki albo trzeba ją zrzucić do głębokich warstw podziemnych.

□ Powiązana z kopalnią produkującą solankę — jako udany przykład takiego rozwiązania można podać ługowanie kawern w KPMG *Mogilno* (PGNiG) w ścisłej kooperacji z solankową kopalnią *Mogilno* należącą do IKS *Solino* (Grupa *Orlen*) i mającą stałych odbiorców przemysłowych solanki. IKS *Solino* dostarczała wodę i równocześnie zagospodarowywała solankę.

**Wykorzystanie solanki.** Solanka z ługowania kawern może być wykorzystana przez przemysł chemiczny, np. do produkcji sody i chloru, lub do produkcji soli warzonej.

Zalety: brak problemów ekologicznych ze zrzutem, ewentualny zysk ze sprzedaży solanki.

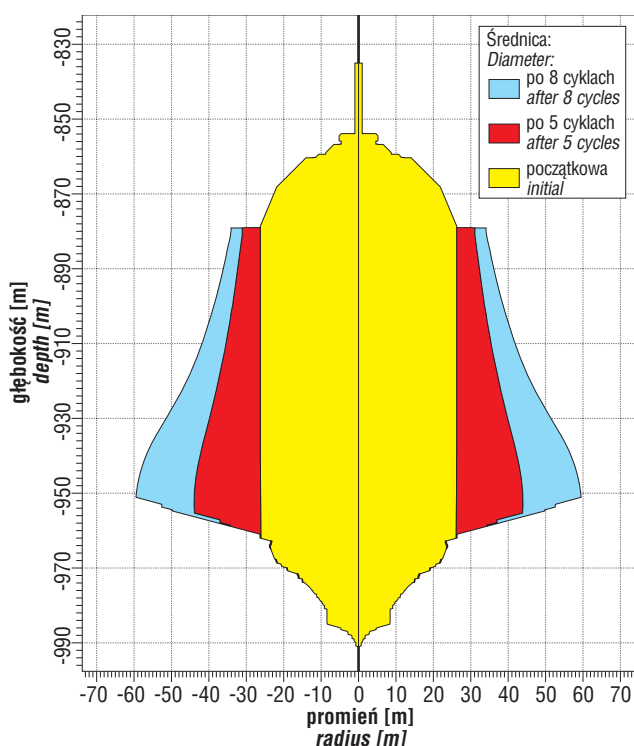
Wady: musi istnieć w pobliżu odbiorca, który przyjmowałby solankę przez ograniczony czas ługowania kawern magazynowych; solanka musiałaby być dostarczana w ilości aprobowanej przez odbiorcę i spełniać normy przez niego wymagane (wysokie stężenie, brak zanieczyszczeń), co spowalnia ługowanie; po wykonaniu kawern i zakończeniu ługowania odbiorca traci dostawcę lub uzyskuje solankę z innego źródła.

**Zrzut solanki.** Solanka z ługowania kawern może być zrzucana do morza, rzeki lub do głębokich warstw wodonośnych.

Zalety: można produkować solankę nienasyconą, brak ograniczeń ze względu na jakość solanki, brak wymagań dotyczących wydajności produkcji solanki.

Wady: uzyskanie zezwolenia na zrzut wymaga czasu i wielu formalnych badań i analiz; surowiec, który mógłby być wykorzystany, jest marnowany.

**Solanka manewrowa dla magazynów substancji ciekłych.** Kawerny magazynowe substancji ciekłych wymagają podczas opróżniania ich z przechowywanego produktu jednoczesnego zatłaczania tzw. solanki manewrowej. Solanka ta zastępuje magazynowany produkt i przebywa w kawernie aż do czasu następnego jej napełnienia, kiedy to jest usuwana na zewnątrz pod ciśnieniem tłoczno-go produktu. Dostępność tzw. solanki manewrowej w odpowiednich ilościach i sposób jej magazynowania może stanowić ważny problem.



**Ryc. 6.** Symulacja (w programie *WinUbro*) przyrostu rozmiarów kawerny magazynowej paliw w efekcie opróżnienia jej przy zastosowaniu wody słodkiej zamiast solanki: średnica początkowa 50 m, po 5 cyklach 88 m, po 8 cyklach 120 m

**Fig. 6.** Simulation of size increase for fuel storage cavern, as a result of emptying it with use of fresh water instead of brine: initial diameter 50 m rose to 88 m after 5 cycles 88 m and 120 m after 8 cycles. Simulation made using *WinUbro* program

Solanka manewrowa może być na powierzchni przechowywana w odkrytych basenach buforowych. Zbiorniki takie mają jednak ograniczoną pojemność pozwalającą na wytłoczenie produktu w jednej lub dwóch partiach przesyłowych zwanych szarżami.

Solankę manewrową można trzymać w innych kawernach i, gdy jest potrzebna, wypychać sprężonym powietrzem, podczas napełniania kawerny magazynowych zaś na nowo ją zatłaczać. Tego typu rozwiązanie jest jednak kosztowne, z uwagi na dodatkowe instalacje i wyposażenie kawern solankowo-powietrznych.

Jeśli operator magazynu współpracuje z zakładem ługowniczym, to może też używać solanki produkowanej w ługowanych kawernach jako solanki manewrowej. W tym przypadku istnieją ograniczenia ilościowe, związane z mocami produkcyjnymi zakładu ługowniczego. Jest to rozwiązanie najkorzystniejsze, przykładem jest PMRiP *Góra*, współpracujący z kopalnią *Góra IKS Solino*.

Można używać do wytłaczania magazynowanego produktu wody słodkiej lub wody morskiej, a solankę wytłoczoną podczas ponownego napełniania zrzucić do morza lub do głębokich warstw podziemnych. Zatłoczenie do kawerny wody lub nienasyconej solanki powoduje jednak jej dalsze rozługowywanie, a ponieważ rozmiary kawerny nie mogą przekroczyć limitów wynikających z warunków stateczności geomechanicznej, liczba takich wypełnień solanką nienasyconą jest ograniczona (ryc. 6). Rozwiązanie to można stosować tylko w magazynach strategicznych, które opróżnia się raz na kilka lat. Siatka kawern magazynowych musi być odpowiednio rzadsza, tak aby rozmiary kawern mogły się powiększyć.

## Siatka kawern magazynowych

Zwykle kawerny magazynowe rozmieszcza się w rzadkich siatkach w porównaniu z kawernami produkcyjnymi solanki. W przypadku kawern magazynujących media gazowe nie mogą one geomechanicznie oddziaływać na siebie, aby pod wpływem różnego ciśnienia w kawernach nie doszło do zeszcelinowania górotworu. *Solution Mining Research Institute* zaleca, zależnie od głębokości i parametrów geomechanicznych górotworu, stosowanie rozstawu osi kawern rzędu 3,5–4,5 wielokrotności ich średnicy. W przypadku komór, w których stosuje się solankę manewrową, siatka może być gęstsza. Jeśli jednak zamiast solanki manewrowej ma być używana np. woda morska, stosuje się siatki jeszcze rzadsze, ze względu na przewidywany przyrost średnicy komór po kilku cyklach operacji i późniejszą ich konwersję na kawerny magazynowe gazu, gdy już nie będzie możliwe powiększanie ich rozmiarów.

## Zapewnienie odpowiedniego kształtu i wielkości kawerny

Otwór wiertniczy kawerny magazynowej musi być prawidłowo wykonany, ze spełnieniem wielu dodatkowych warunków, m.in.:

- większa średnica wiercenia i zarurowania;
- zachowanie pionu otworu w strefie kawernowej; w tym celu podczas wiercenia jest stosowany niewielki nacisk, niskie obroty, maksymalnie sztywny przewód wiertniczy i są prowadzone częste pomiary krzywizny otworu (dla otworów magazynowych wykonywanych w KPMG *Mogilno* dopuszczalne sumaryczne odchylenie otworu od pionu nie mogło przekroczyć 1% głębokości, a w punktach pomiarowych maksymalne odchylenie od pionu nie mogło przekroczyć 2°);

- wysoki stopień szczelności techniczno-eksploatacyjnej kolumny rur oraz jej cementacji.

Na podstawie wyników laboratoryjnych badań geomechanicznych oraz badań *in situ* projektuje się kształt i rozmiary kawerny, uwzględniając ograniczenia natury geologicznej. Kształt podlega weryfikacji za pomocą geomechanicznej symulacji komputerowej, która ma sprawdzić, czy zbiornik gwarantuje długotrwałą stateczność (Ślizowski, 2006). W razie potrzeby dokonuje się jego korekty. Określone laboratoryjnie właściwości ługownicze skały solnej ze strefy kawernowej służą do przygotowania projektu technologii ługowania dzięki symulacji komputerowej. Warto tu wspomnieć, że większość liczących się w świecie firm stosuje obecnie do projektowania polskie oprogramowanie *WinUbro*, stworzone przez *Chemkop* z Krakowa, które zdobyło na tym rynku pozycję dominującą (ryc. 6, 7).

W trakcie ługowania komory konieczne jest dokładne mierzenie stężenia uzyskiwanej solanki i porównywanie komory z wynikami symulacji komputerowej oraz okresowe pomiary jej kształtu echosondą.

## Zapewnienie szczelności kawerny

Kawerny wykorzystywane do magazynowania substancji użytecznych nie mogą być nieszczelne. O ile w przypadku komory solankowej rozszczelnienie i wydostanie się części solanki poza złożę soli jest stosunkowo niegroźne, o tyle wydostanie się ropy naftowej lub produktów ropopochodnych może prowadzić do skażenia wód gruntowych, wydostanie się gazu ziemnego zaś może doprowadzić do eksplozji na powierzchni i ofiar śmiertelnych, jak to miało miejsce w Hutchinson (Kansas, USA) w 2001 r.



Sól kamienna jako ośrodek o właściwościach plastyczno-lepkich oraz o przepuszczalności w normalnych warunkach rzędu  $10^{-21} \text{ m}^2$  zapewnia szczelność podziemnego magazynu, jeśli tylko człowiek swą działalnością jej nie zniszczy. Zagrożeniem dla szczelności mogą być porowate przewarstwienia skał niesolnych w obrębie serii solnej, a także przewarstwienia szybko rozpuszczalnych soli magnezowo-potasowych, które mogą stworzyć drogi migracji magazynowanego produktu poza złożę soli. Dlatego kawerny magazynowe trzeba lokować w strefach złoża spełniających odpowiednie warunki geologiczne.

**Badania szczelności podczas wiercenia otworu do ługowania kawerny magazynowej.** Otwór kawernowy przeznaczony do magazynowania gazu pod dużym ciśnieniem (10–20 MPa) musi spełniać odpowiednie wymagania szczelności. W związku z tym w trakcie prac wiertniczych bada się szczelność:

- górotworu solnego (tzw. badania mikroszczelinowania),
- połączeń rur kolumny techniczno-eksploatacyjnej,
- płaszczu cementowego kolumny techniczno-eksploatacyjnej.

Badania mikroszczelinowania wykonuje się w trakcie wiercenia na aktualnym dnie otworu, na głębokości, na której prawdopodobnie będzie potem ulokowany strop kawerny. Celem badania jest ustalenie tzw. gradientu mikroszczelinowania skał solnych w tym rejonie. Gradient stanowi podstawę do wyznaczenia maksymalnego ciśnienia magazynowania gazu.

Hermetyczność połączeń rur kolumny techniczno-eksploatacyjnej zaś określa się na podstawie szczelności (Kunstman i in., 2002):

- połączeń gazoszczelnych rur w trakcie zapuszczania kolumny do otworu — stosuje się tu metodę HOLD

(*Helium Operated Leak Detection*), polegającą na tłoczeniu helu do wnętrza rury na odcinku połączenia i badaniu na zewnątrz detektorem helu, czy gaz nie przechodzi przez nieszczelny gwint;

- całej kolumny rur po jej zapuszczeniu, jednak przed cementacją.

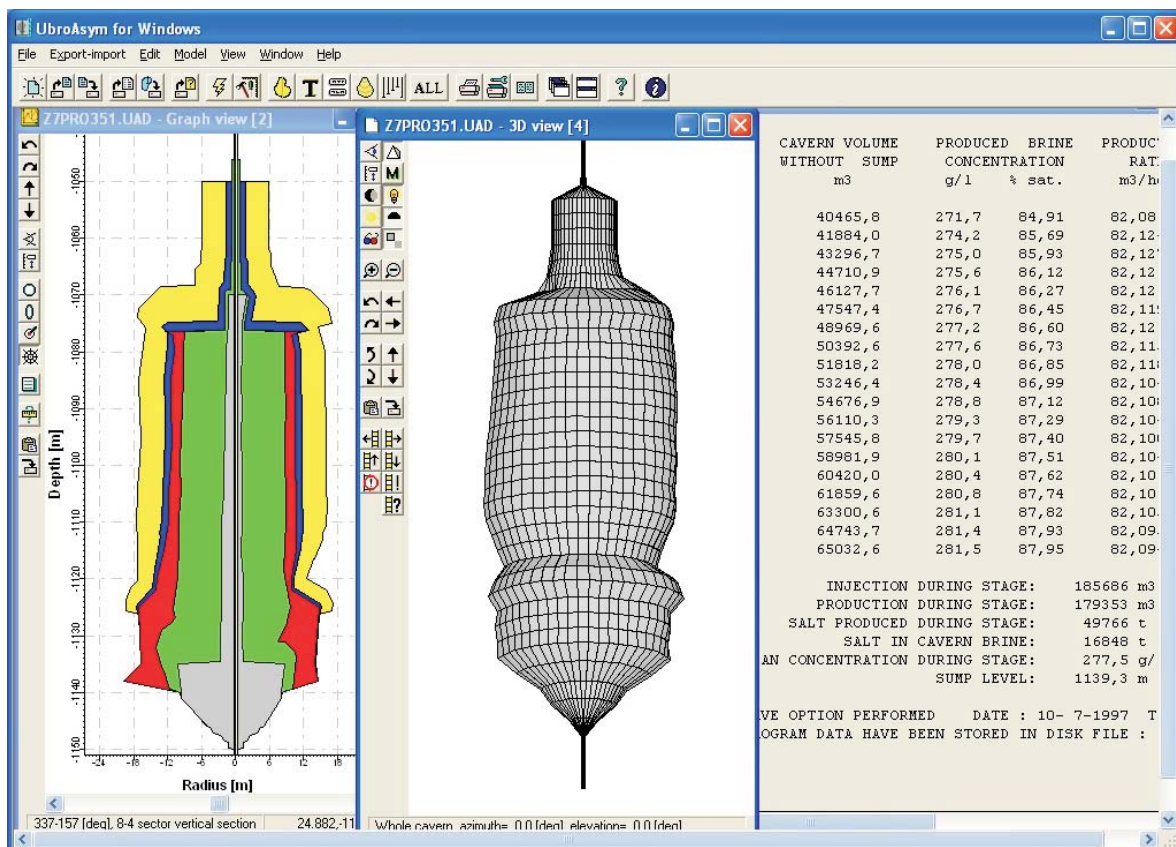
Stosuje się ciśnienie próbne w przedziale 1,25–1,5 planowanego ciśnienia magazynowania.

Próby szczelności płaszczu cementowego kolumny techniczno-eksploatacyjnej są wykonywane po zwierceniu korka cementowego poniżej buta tych rur. Próby tej dokonuje się po osiągnięciu pełnej wytrzymałości cementu, powietrze stosuje się jako medium próbne. Rejestruje się węglęne zmiany ciśnienia i temperatury i na tej podstawie określa ubytek powietrza w czasie testu. W praktyce, w wypadku szczelnych cementacji stwierdza się szybkości ubytku poniżej  $2 \text{ dm}^3/\text{d}$ , gdy brak szczelności zaś ubytki są rzędu kilkuset  $\text{dm}^3/\text{d}$ . Stosuje się ciśnienie próbne stanowiące 1,05 planowanego ciśnienia magazynowania.

Próby szczelności całej kawerny magazynowej wraz otworem wykonuje się również po zakończeniu ługowania. W kawernach przeznaczonych do magazynowania gazów jako medium próbne stosuje się azot. Jego ubytek podczas testu określa się na podstawie zmian węglęnego ciśnienia, temperatury oraz przemieszczeń lustra solanki. W przypadku kawern przeznaczonych do magazynowania cieczy jako medium próbne stosuje się olej.

### Zakres ciśnienia roboczego

**Zakres ciśnienia roboczego w komorach magazynowych substancji gazowych.** Jak wielokrotnie wspomniano, magazyny substancji gazowych wykorzystują ściśliwość



Ryc. 7. Okna programu WinUbro w trakcie symulacji ługowania jednej z kawern magazynowych gazu ziemnego  
Fig. 7. WinUbro windows during simulation of some natural gas storage cavern leaching process

gazu. Po opróżnieniu z solanki pracują pod zmiennym ciśnieniem, a ich pojemność robocza to ilość gazu, jaka może być dotłoczona, gdy zwiększy się ciśnienie od minimalnego do maksymalnego. Dlatego wartości minimalnego i maksymalnego ciśnienia mają podstawowe znaczenie w takich magazynach.

□ **Ciśnienie minimalne.** Z punktu widzenia inwestora, najkorzystniejsze jest jak najniższe ciśnienie, gdyż mniejsza jest wtedy poduszka gazu, który musi stać w kawernie pozostawać i którego wartość stanowi zamrożony kapitał. Niezbędne ciśnienie minimalne wynika z geomechanicznej analizy stateczności (Ślizowski, 2006). Nie może być jednak za niskie, aby nie dochodziło do powiększania się średnicy kawerny w wyniku wykruszania ścian. Naprężenia w górotworze wokół komory nie mogą przekroczyć ustalonych wartości, także odkształcenia oraz szybkość ich powstawania muszą się mieścić w dopuszczalnych granicach.

Jest jeszcze drugi czynnik limitujący minimalne ciśnienie w kawernie — jej konwergencja. Im niższe ciśnienie w kawernie, tym większej ulega ona konwergencji, czyli zmniejsza się jej pojemność magazynowa. Dlatego ciśnienie minimalne dobiera się dodatkowo tak, by utrzymać szybkość konwergencji w dopuszczalnych granicach.

□ **Ciśnienie maksymalne** wyznacza się tak, by nie zaszkodzić szczelności komory. Musi w związku z tym być ono odpowiednio niższe od ciśnienia mikroszczelinowania, jednak nie jest to warunek wystarczający. Gdy ciśnienie w kawernie jest większe niż pewne składowe naprężenia w jej ościsie, przepuszczalność skały solnej wzrasta gwałtownie i może dojść do wnikanania magazynowanego medium w skałę solną. Sytuacja taka zależy od historii eksploatacji, gdyż na skutek reologicznych właściwości soli następuje wokół kawerny redystrybucja naprężeń. Dlatego niezależnie od ciśnienia mikroszczelinowania ciśnienie maksymalne nie powinno być powyżej pewnego procentu ciśnienia pierwotnego górotworu, a gdy ciśnienie w kawernie zbliża się do maksymalnego, zmniejsza się wydajność zatłaczania, by wydłużyć czas dochodzenia do wartości maksymalnej.

**Zakres ciśnienia roboczego w komorach magazynowych substancji ciekłych.** Kwestie ciśnienia nie odgrywają tak dużej roli w przypadku komór magazynowych substancji ciekłych opróżnianych z użyciem solanki manewrowej. Znajdują się one normalnie cały czas pod ciśnieniem co najmniej słupa solanki. Co prawda, w sytuacjach awaryjnych ciśnienie może się obniżyć do ciśnienia słupa magazynowanej substancji, jednak gęstość substancji magazynowanych jest z reguły na tyle duża, że taki spadek nie zagraża stateczności komory ani nie wywołuje niebezpiecznie szybkiej konwergencji. Wyznacza się jednak dla tych komór maksymalne ciśnienie magazynowania, kierując się podobnymi kryteriami jak dla substancji gazowych. W okresie pomiędzy operacjami magazynowymi, kiedy „nic się nie dzieje”, w efekcie konwergencji solanka i magazynowane substancje ulegają sprężaniu, a mimo iż jest to proces powolny, z uwagi na bardzo małą ściśliwość cieczy, ciśnienie przyrasta z dnia na dzień i po pewnym czasie komora wymaga odprężenia, czyli odebrania z niej solanki, aby ciśnienie solanki na głowicy powróciło niemal do zera. W przeciwnym razie magazynowana substancja mogłaby penetrować w głąb skały solnej, a nawet doprowadzić do jej zeszcelinowania.

## Uwaga końcowa

Od wielu lat w Polsce buduje się i użytkuje magazyny kawerny solne, zarówno ropy naftowej, paliw, jak i gazu ziemnego, a w najbliższych latach można się spodziewać dalszej rozbudowy magazynów w złożach soli. Należy jednak zauważyć, że sposób dokumentowania złóż solnych, zgodny z aktualnymi przepisami prawa geologicznego i górniczego oraz innych aktów prawnych, jest niewystarczający do projektowania i budowy podziemnych magazynów, ponieważ zatrzymał się na etapie budowy podziemnych kopalń soli, który to etap zakończył się już kilka dziesiątków lat temu.

W dokumentacjach geologicznych złóż, również tych wykonywanych obecnie, dominuje szacowanie zasobów soli i określanie jakości złoża m.in. poprzez procentową zawartość NaCl. Wielkości te, chociaż istotne, nie są wystarczające do oceny złoża pod kątem możliwości wykonania w nim kawern magazynowych. Zasoby soli w polu magazynowym, spełniającej np. wymagania ilościowe i jakościowe odbiorców, mają w tym przypadku drugorzędne znaczenie, podobnie jak stopień ich wykorzystania. Głównym problemem jest tu możliwość wykonania przestrzeni magazynowej, a dla wytworzenia jej techniką ługowniczą istotne jest nie tyle, jaka jest zawartość procentowa NaCl w danym rodzaju soli kamiennej, ile raczej — jakość, ilość i forma występowania zanieczyszczeń i porostów płonnych w soli. Na przykład: nawet 20-procentowa domieszka piasku anhydrytowego rozproszonego w soli nie przeszkodzi w wykonaniu regularnej komory, ale już kilka procent soli K-Mg w postaci cienkich, ciągłych warstw może zupełnie wyeliminować komorę z funkcji magazynowych.

Potrzebna jest więc specyficzna informacja geologiczna. Pewną część tej informacji można uzyskać bez dodatkowych kosztów, np. duże znaczenie ma tu szczegółowe profilowanie otworów wiertniczych, wykonywanych podczas tworzenia komór magazynowych, z uwzględnieniem wszelkich dostrzegalnych makroskopowo zmian w rdzeniu, takich jak wspomniane wcześniej cienkie porosty soli potasowych. Takie podejście, polegające na starannym dokumentowaniu jakości, ilości i formy występowania nie tylko soli kamiennej, ale także płonnych skał w złożu solnym lub zanieczyszczeń soli kamiennej, przyniesie cenne informacje, które posłużą do prawidłowego projektowania i budowy komór magazynowych.

## Literatura

- GILLHAUS A. 2008 — Natural gas storage in salt cavern in Europe — Present status, developments and future trends. [In:] SMRI Technical Conference Papers, Spring 2007, Basel: 69–88.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K. & URBAŃCZYK K. 2002 — Zarys otworowego ługownictwa solnego — Aktualne kierunki rozwoju. Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków. (2007 wyd. angielskie zmienione — Solution mining in salt deposits. Recent development trends).
- Polska Norma PN-EN-1918-3: 2001 — Systemy dostaw gazu — Podziemne magazynowanie gazu — Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w wylugowanych komorach solnych. PKN, 13.06.2001.
- SEDLACEK R. 1999 — Underground gas storage in Europe. Erdöll, Erdgas, Kohle, 115: 537–540.
- SEDLACEK R. 2008 — Untertage — Erdgasspeicherung in Deutschland. Erdöll, Erdgas, Kohle, 124: 453–465.
- ŚLIZOWSKI J. 2006 — Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej. ISMiE PAŃ Stud. Rozpr. Monogr., 137.

Praca wpłynęła do redakcji 9.06.2009 r.  
Po recenzji akceptowano do druku 29.07.2009 r.