

## Podziemne magazynowanie węglowodorów w kawernach solnych w Polsce — wymiar strategiczny i możliwości poprawy stanu środowiska naturalnego

Grzegorz Pieńkowski<sup>1</sup>



**Storage of hydrocarbons in salt caverns — strategic significance and the use of salt brine as a medium for improvement of environment.** *Prz. Geol.*, 57: 791–797.

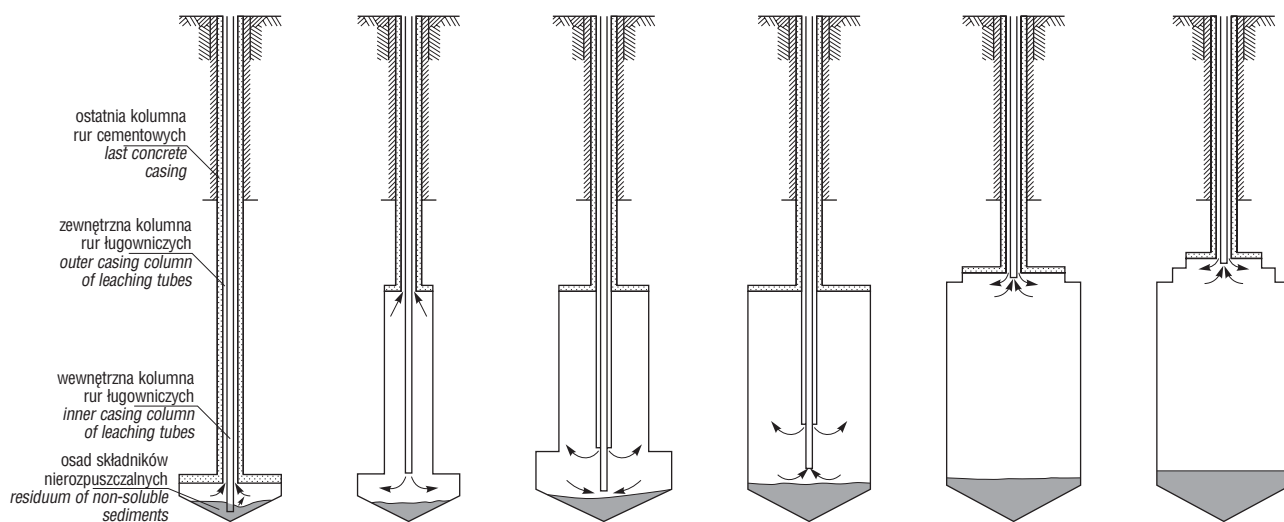
*Abstract.* Storage of strategic hydrocarbon resources (petroleum, fuel and natural gas resources) in subsurface repositories (geologic structures) is a strategic necessity in countries largely dependent on oil and gas supply from abroad. Benefits of creating strategic petroleum reserves (SPRs) and natural gas storage facilities for these countries are obvious: SPRs are a first line of defense against interruption in critical oil and natural gas supplies, and they provide economic security and increase regional stability. Easily accessible sites located near the nodes of existing pipelines, main industrial centers and NATO bases should be targeted for safe storage of liquid fuels, crude oil or gas. With little national storage capacity, Poland has been near extremis a few times due to interruptions in the flow of crude oil and natural gas. It is in the Polish national interest for the country to establish a Strategic Petroleum Reserve for liquid fuels and natural gas reserves, which would provide a cushion against the negative impacts of a hydrocarbon shortage on its economy and national security. The same problem concerns most of the new NATO member countries in Central and Eastern Europe (Estonia, Latvia, Lithuania, Slovakia, Czech Republic, and Hungary). These countries are potential beneficiaries of this project. Among them, only Poland is blessed with abundant geologic salt structures, i.e. thick bedded salts and salt domes. Therefore, Poland can provide storage capacity also for the NATO allies (and other EU members). The Department's agent in this effort is the Polish Geological Institute (PGI), performing duties of the Polish Geological Survey. PGI established cooperation with the Idaho National Laboratory (INL) in the United States and the Turkish Petroleum Corporation (TPAO). The project was accepted and implemented as a short-term project in April 2005 (NATO-CCMS project EAP.CMS-PS 982185). The purpose of this project was to evaluate the feasibility of using subsurface salt deposit repositories for strategic oil, liquid fuel and gas storage, and for using generated brines to improve the ecological and environmental conditions of the Baltic Sea. The last expansion of NATO involves the necessity of developing new military bases, including the need for safe storage of logistic fuels. Occurrence of salt domes nearby most of the planned bases in Poland provides an excellent place for safe (both from the military and environmental point of view) storage of fuels. Only dry salt caverns (without use of salt brine, operated by pressurized nitrogen) will be applied for logistic fuel storage. Previous experimental studies had shown that some logistic fuels (including jet fuels) stored in salt caverns for five years did not change significantly as far as concerns their chemical and physical properties and they were still fully usable after five years of such storage. Construction of fuel repositories for NATO bases in salt domes also provides an environmental advantage. The traditional approach (adopted for example in the existing NATO "Minimum Military Requirement" and Capability Package — CP 22) uses steel tanks. However, surface steel tanks are exposed to natural weather hazards and potential terrorist attack — not mentioning their vulnerability to warfare attacks. Steel tanks hidden at a shallow depth (up to some 20 m) in the ground are much more expensive, although somewhat safer — the threats mentioned above are reduced. However, underground storage of fuel poses another threat — leakage of toxic fuel might be hazardous to groundwater supplies. Construction inexpensive repositories at a depth of several hundred meters, in naturally isolated rock salt, make them safe concerning any contamination of the environment and other threats. Above all, such repositories meet strategic requirements — they are practically immune to any warfare attack. Five salt domes in central Poland were indicated as the most suitable sites for logistic fuel repositories and preliminary geological assessment was prepared. In the future this project should gain more interest because of security issues and may warrant further investigation for Poland as well as other NATO countries. Construction of repositories in salt provides a substantial cost advantage (underground salt repositories are about 85% - 800% less costly than traditional surface steel tanks). Moreover, storage of hydrocarbons in geologic structures is much safer from a strategic and ecological point of view. Most of the salt deposits considered for an SPR in Poland were formed in the Late Permian epoch. The proposed full scale project also addresses potential ecological problems connected with the by-product from leaching large salt caverns. Construction of large strategic petroleum repositories can produce tens of million of tons of salt brine. As the big petroleum repositories will likely be built at the Baltic Sea coast, this project involves a new paradigm concerning treatment and disposal of the excess salt brine. The salt brine can be used as an agent for re-cultivation of the Baltic sea-bottom where anoxic conditions prevail. Due to the influx of anthropogenic contaminants (industrial discharges, phosphate and nitrogen communal and agricultural pollutants, etc.), the periodic, natural influx of heavier and well-oxygenated waters from the North Sea can no longer cope with the negative effects of resulting eutrophication. This is by far the most severe ecological problem in the entire Baltic Sea region. It is proposed that diluted and oxygenated, but somewhat heavier than sea water salt brine be pumped through a pipeline directly to the deeper parts of the Baltic Sea. The enhanced (oxygenated) salt brine could serve to re-establish the life and improve the ecological environment in the Baltic Sea bottom, a positive environmental impact. This project may contribute to fulfillment of at least four of the general objectives of NATO-SPS projects — it reduces to a minimum the negative environmental impact of both civil and military repositories, it conducts regional studies including cross-border activities (particularly in the field of Baltic Sea protection), by building new repositories it can serve to prevent possible crises related to scarcity of energy resources from interruption of oil or gas supplies, and it addresses emerging risks to the environment by using salt brine as an agent contributing to biological recovery of the Baltic Sea.

**Keywords:** hydrocarbon storage, Zechstein salt, excess salt brine, pro-ecological disposal, NATO project, strategic issues

<sup>1</sup>Kierownik projektu (Project Leader) NATO-CCMS EAP.CMS-PS 982185 *Storage of petroleum in salt caverns and the use of salt brine as a medium for improvement of environment* (Bruksela, Kwatery Główna NATO, 2005–2007), Państwowy Instytut Geologiczny — Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; grzegorz.pienkowski@pgi.gov.pl

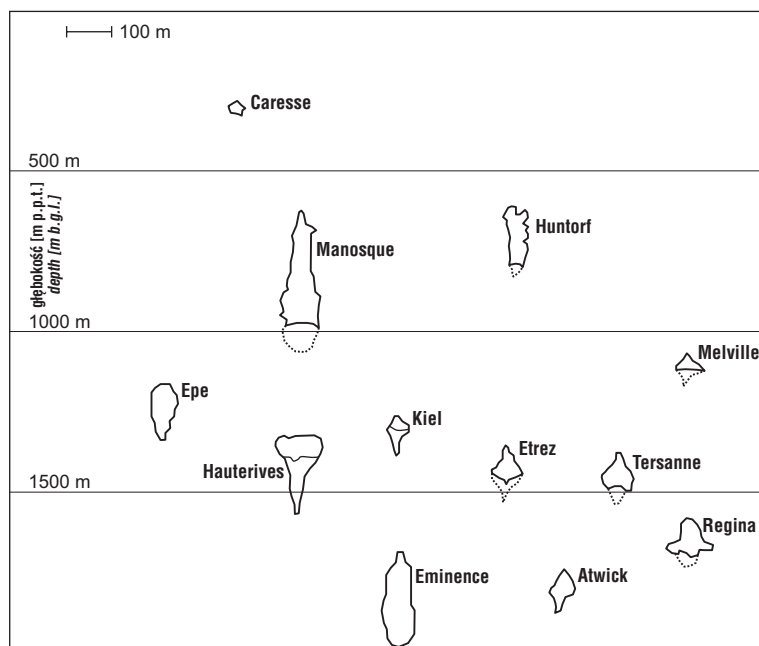
Polityka Rosji i konflikty w rejonie Bliskiego Wschodu skutkują zagrożeniem ciągłości dostaw oraz wzrostem cen ropy i gazu, które mogą powodować zagrożenia bezpieczeństwa energetycznego Polski, Europy i państw NATO. Polska powinna magazynować zasoby strategiczne ropy naftowej i gazu ziemnego w ilości odpowiadającej co najmniej poziomowi trzymiesięcznego ich zużycia (około 4 mln t ropy i 3 mld m<sup>3</sup> gazu). Wymagają tego względy bezpieczeństwa narodowego, a także podjęte przez Polskę międzynarodowe zobowiązania. Zapasy płynnych i gazowych węglowodorów powinny być przechowywane w strukturach geologicznych — takie magazynowanie jest aż od około 85% do 800% tańsze od magazynowania naziemnego i o wiele mniej materiałochłonne. Ponadto, jest metodą bezpieczniejszą niż tradycyjne magazynowanie w stalowych zbiornikach naziemnych pod względem strategicznym (głębokie magazyny są mniej narażone na działania wojenne, terroryzm, pożar), a także nieporównywalnie bardziej przyjazną ekologicznie i krajobrazowo (instalacje naziemne zajmują stosunkowo niewielką powierzchnię, są niewielkie i mało inwazyjne dla krajobrazu).

Sól kamienna jest znakomitym medium do magazynowania węglowodorów, gdyż nie wykazuje z nimi żadnej reaktywności chemicznej czy rozpuszczalności, a korzystne właściwości geomechaniczne i dobrze przewodzi ciepło. Tworzenie kawern w utworach solnych jest łatwe dzięki zastosowaniu metody rozpuszczania soli w wodzie tłoczonych pod ciśnieniem do odwiertów (ryc. 1). Równie prosty jest system eksploatacji magazynu podziemnego po jego napełnieniu węglowodorami — polega on na zatłaczaniu solanki do kawerny i jednoczesnym pompowaniu węglowodorów z kawerny na zewnątrz; natomiast dopełnianie zbiornika jest procesem odwrotnym i polega na wypompowywaniu solanki i zatłaczaniu węglowodorów (Kłeczek i in., 2005). Od lat 70. ubiegłego wieku węglowodory na wielką skalę magazynuje się w strukturach solnych (przede wszystkim w USA, gdzie przechowuje się obecnie około 90 mln t ropy), a w tym roku zapadła decyzja o podwojeniu pojemności magazynowych w strukturach solnych do 2027 r. Korzyści wynikające z posiadania podziemnych magazynów węglowodorów wykazała dobitnie niedawna sytuacja na światowym rynku ropy naftowej,



Ryc. 1. Przykładowe fazy ługowania kawerny zbiornikowej (Kłeczek i in., 2005)

Fig. 1. Exemplary phases of leaching of salt caverns (Kłeczek i in., 2005)



towej, kiedy na ogromny wzrost cen tego surowca nałożyły się katastrofalne skutki huraganu Katrina w USA. Uruchomienie przez USA strategicznych zapasów ropy naftowej umożliwiło błyskawiczne zneutralizowanie skutków katastrofy, a co więcej, zapoczątkowało w tamtym okresie stabilizację cen ropy na rynku światowym. Także w Europie Zachodniej magazynuje się wielkie ilości węglowodorów w strukturach solnych (ponad 40 mln t ropy i produktów naftowych). Największe magazyny znajdują się w Niemczech i we Francji (ryc. 2):



Ryc. 2. Wybrane przykłady podziemnych magazynów węglowodorów w strukturach solnych na świecie, ukazujące wielkość, kształt i głębokość posadowienia kawern (wg Beresta & Brouarda, 2003)

Fig. 2. Selected examples of subsurface hydrocarbon repositories in salt deposits showing dimensions, shapes and depths of salt caverns (after Berest & Brouard, 2003)

- Manosque (Francja) — 36 kawern, 16 mln m<sup>3</sup>;
- Etzel (Niemcy) — 33 kawerny, 14 mln m<sup>3</sup>;
- Rustringen (Niemcy) — 41 kawern, 10 mln m<sup>3</sup>;
- Epe (Niemcy) — 6 kawern, 3 mln m<sup>3</sup>;
- Sotorf (Niemcy) — 9 kawern, 1,9 mln m<sup>3</sup>;
- Heide (Niemcy) — 11 kawern, 1,5 mln m<sup>3</sup>;
- Blexen (Niemcy) — 5 kawern, 1,5 mln m<sup>3</sup>;
- Lesum (Niemcy) — 6 kawern, 1,4 mln m<sup>3</sup>.

W Polsce istnieje możliwość lokalizacji takich zbiorników w dobrze izolowanych solach wieku permu — tego wieku jest ogromna większość kopalnych utworów solnych w Polsce (Wagner, 1994, 1998). Podziemny magazyn ropy i produktów naftowych funkcjonuje już w wysadzie Góra w rejonie Inowrocławia (własność *Orlen S.A.*). W ten sposób zostały racjonalnie zagospodarowane wyrobiska po otworowej eksploatacji soli. Problemy z funkcjonowaniem magazynu *Góra*, o czym donosiły media, nie wiązały się z wadami samej metody, lecz niedociągnięciami planistycznymi (np. nie zapewniono odpowiedniej ilości solanki do szybkiego operowania węglowodorami zgromadzonymi w kawernach). Są to jednak niedociągnięcia łatwe do wyeliminowania w stosunkowo krótkim czasie.

### Projekt NATO-SPS i jego innowacyjny wymiar

W 2004 r. Państwowy Instytut Geologiczny (PIG) i Idaho National Laboratory (INL) z USA nawiązały dwustronną współpracę, mającą na celu przygotowanie pilotażowej koncepcji zbudowania podziemnych magazynów ropy naftowej i innych paliw dla potrzeb Polski i ewentualnie innych państw, a także wykorzystania pozyskiwanej solanki do ratowania zagrożonego środowiska naturalnego Bałtyku

poprzez rekultywację jego dna. Do projektu przyłączyła się też Turcja (TPAO — narodowy koncern naftowy). Projekt studium pilotażowego dotyczącego tego problemu został przedstawiony na sesji NATO-CCMS (obecnie SPS) w Brukseli 24 listopada 2004 r., a 24 kwietnia 2005 r. został jednomyślnie oficjalnie przyjęty jako projekt NATO-CCMS (Pieńkowski, 2006a). W styczniu 2007 r. przekazano do NATO skróconą wersję opracowania końcowego, w pełni potwierdzającą znaczenie strategiczne i wykonalność projektu (Pieńkowski, 2006b).

Jak wspomniano, sól kamienna jest znakomitym medium do magazynowania węglowodorów. Szczególnie istotne jest to, czy w paliwach zachodzą jakiegokolwiek zmiany po kilkuletnim okresie ich przechowywania. W latach 70. i 80. ubiegłego wieku przeprowadzono w Polsce badania efektów przechowywania w doświadczalnych kawernach solnych (w złożu Solno w Inowrocławiu) olejów napędowych i benzyn w okresie 1–5 lat. W trakcie tych badań co rok sprawdzano właściwości paliw (Klecan i in., 1984). W kawernach produkty naftowe kontaktują się zarówno z solą, jak i nasyoną solanką, a temperatura przechowywania jest stała i w omawianym rejonie na głębokości 1000 m wynosi ok. 40°C. Dopływ powietrza do kawerny jest bardzo ograniczony. Jego minimalna ilość może być obecna w postaci powietrza rozpuszczonego w produkcie lub solance podczas napełniania lub opróżniania kawerny. W efekcie badań polegających na przechowywaniu w wylugowanej kawernie w złożu Solno olejów napędowych letnich I LŚ i zimowych I Z-20 oraz benzyny (paliwa lotniczego PSM-2) okazało się, że zmiany ich wybranych właściwości fizykochemicznych i eksploatacyjnych były nieznaczne — tab. 1 i 2 (Klecan i in., 1984).

**Tab. 1. Zmiana właściwości oleju I LŚ i oleju I Z-20 po 5 latach przechowywania w kawernach solnych (Klecan i in., 1984)**  
Table 1. Changes in properties of I LŚ and I Z-20 oils after 5 years of storage in salt caverns (Klecan et al., 1984)

Właściwość <i>Properties</i>	Olej I LŚ <i>Diesel oil I LŚ</i>		Olej I Z-20 <i>Diesel oil I Z-20</i>	
	przed przechowywaniem <i>before storage</i>	po 5 latach przechowywania <i>after 5 years of storage</i>	przed przechowywaniem <i>before storage</i>	po 5 latach przechowywania <i>after 5 years of storage</i>
Masa właściwa [g/cm <sup>3</sup> ] <i>Specific mass in [g/cm<sup>3</sup>]</i>	0,8277	0,8280	0,8253	0,8252
Lepkość kinemat. w temp. 20°C <i>Kinematic viscosity in 20°C</i>	2,15	2,16	2,26	2,25
Temp. zapłonu [°C] <i>Ignition temperature [°C]</i>	54,5	56,5	59,5	58,0°C
Temp. krzepnięcia [°C] <i>Freezing temperature [°C]</i>	-26,5	-26,0	-28	-29,5°C
Zawartość siarki (% wag.) <i>Sulphur content (% mass)</i>	0,530	0,529	0,467	0,466
Pozostałość po koksowaniu (% wag.) <i>Carbonization remnant (% mass)</i>	0,039	0,054	0,038	0,050
Liczba kwasowa [mg KOH/g] <i>Acid index [mg KOH/g]</i>	0,030	0,055	0,030	0,050
Liczba jodowa [g/100g] <i>Iodine index [g/100g]</i>	2,03	2,15	2,41	2,59
Zawartość wody <i>Water content</i>	brak <i>no</i>	brak <i>no</i>	brak <i>no</i>	brak <i>no</i>
Indeks dieslowy <i>Diesel index</i>	53,9	53,8	51,6	51,6
Zawartość chlorków [mg/l] <i>Chloride content [mg/l]</i>	brak	0,55	brak	0,46
Zawartość żywicy (%wag.) <i>Resin content in (% mass)</i>	0,060	0,095	0,030	0,098
Intensywność barwy <i>Colour intensity</i>	0,006	0,125	0,005	0,100
Średnia masa cząsteczkowa <i>Mean molecular mass</i>	185	186	183	185

**Tab. 2. Zmiana właściwości paliwa lotniczego PSM-2 po 5 latach przechowywania w kavernach solnych (Klecan i in., 1984)**

Table 2. Changes in properties of PSM-2 air fuel after 5 years of storage in salt caverns (Klecan et al., 1984)

Właściwość <i>Properties</i>	Paliwo lotnicze PSM-2 <i>Jet fuel PSM-2</i>	
	przed przechowywaniem <i>before storage</i>	po 5 latach przechowywania <i>after 5 years of storage</i>
Masa właściwa [g/cm <sup>3</sup> ] <i>Specific mass [g/cm<sup>3</sup>]</i>	0,7802	0,7807
Lepkość kinematyczna w 20°C <i>Kinematic viscosity in 20°C</i>	1,29	1,26
Temp. zapłonu [°C] <i>Ignition temperature [°C]</i>	32°C	31°C
Temp. krystalizacji [°C] <i>Crystallization temperature [°C]</i>	< -60°C	< -60°C
Zawartość siarki ogólnej [% wag.] <i>General sulphur content [% mass]</i>	0,0380	0,0390
Pozostałość po spoieleniu [% wag.] <i>Burning remnant [% mass]</i>	0,0003	0,0003
Liczba kwasowa [mg KOH/100 cm <sup>3</sup> paliwa] <i>Acid index [mg KOH/100 cm<sup>3</sup> of fuel]</i>	0,199	0,200
Liczba jodowa [g/100 g] <i>Iodine index [g/100 g]</i>	0,290	0,300
Zawartość zanieczyszczeń i wody <i>Content of impurities and water</i>	brak <i>no</i>	brak <i>no</i>
Punkt anilinowy <i>Aniline point</i>	57,5	57,7
Zawartość chlorków [mg/l] <i>Chloride content [mg/l]</i>	brak <i>no</i>	0,05
Zawartość żywicy [%wag.] <i>Resin content [% mass]</i>	0,0013	0,0040
Intensywność barwy <i>Colour intensity</i>	0,000	0,000
Średnia masa cząsteczkowa <i>Mean molecular mass</i>	140	141

Właściwości fizykochemiczne olejów i paliw oznaczono według norm polskich, jedynie masę właściwą wg API, a indeks dieslowy wg normy IP. Próbkę nasyczonej solanki i wszystkich trzech rodzajów paliw poddano także badaniom mikrobiologicznym. Zmian mikrobiologicznych nie stwierdzono. Minimalnym zmianom w olejach napędowych uległy: pozostałość po koksowaniu, liczba kwasowa, zawartość żywicy, zawartość chlorków i intensywność barwy (tab. 1), a w paliwie lotniczym jedynie zawartość żywicy i zawartość chlorków (tab. 2). Wszystkie te zmiany były znikome i nie przekraczały wymagań odpowiednich norm zarówno dotyczących cech oleju napędowego, jak i paliwa lotniczego. W konkluzji Klecan i in. (1984) stwierdzili, że po 5 latach przechowywania w kavernach solnych oleje napędowe spełniały wymagane normy i mogły być bezpośrednio po przechowywaniu wykorzystane do napędu silników wysokoprężnych i silników odrzutowych. Podobne, pozytywne wyniki testów uzyskano w toku zbliżonych badań przeprowadzonych w Niemczech i ówczesnym ZSRR (Klecan i in., 1984). Zatem magazynowanie w solach jest całkowicie bezpieczne dla przechowywanych węglowodorów, co potwierdzają nie tylko badania eksperymentalne, ale także doświadczenia praktyczne.

W ramach projektu NATO wykonano też wstępne studium możliwości magazynowania paliw logistycznych na potrzeby baz NATO, w tym paliwa lotniczego do myśliwców F-16 (Pieńkowski, 2006a, b). Finansowanie budowy baz paliw lotniczych w solach było rozważane pod kątem wykorzystania offsetu F-16. W ramach warunków brzegowych w Idaho National Laboratory (INL) sprawdzono reak-

tywność paliwa do F-16 (głównie występujących w nim dodatków) z solą. Podobnie jak w przypadku paliwa PSM-2 potwierdzono brak reaktywności paliwa do F-16 z solami, typując jednocześnie do operowania paliwem w komorze sprężony azot (nie solankę). Komory docelowe planowano wykonać stosunkowo niewielkie (do 50 000 t pojemności), gdyż w każdych warunkach konieczna jest rotacja paliwa co 5 lat. Wytypowano diapiry solne położone w pobliżu baz lotniczych, uzyskano materiał rdzeniowy do dalszych badań oraz zebrano istniejące dane na temat wytypowanych wysadów solnych. Jako dodatkowe czynniki podnoszące zalety magazynowania paliwa F-16 w głębokich strukturach solnych wskazano czynnik strategiczny (odporność samego zbiornika nawet na atak nuklearny) oraz oddalenie samego paliwa od środowiska naturalnego na powierzchni ziemi, a także od wód gruntowych (dodatki paliwa F-16 są wysoko toksyczne). Projekt przedstawiono w MON i w kwaterze NATO. Mimo wysokiej oceny merytorycznej, projekt nie może być obecnie wdrożony, gdyż MON wytypował już inne lokalizacje naziemne na bazy paliwowe (w ramach planu NATO CP 22). Niemniej, w razie zaistnienia potrzeby, projekt ten jest gotowy do kontynuacji.

Innowacyjny wymiar projektu (Pieńkowski, 2006a, b) wiąże się z koncepcją rozwiązania kluczowego problemu ekologicznego, którym jest konieczność utylizacji solanki, jaka powstaje w procesie tworzenia kavern. W USA solankę spuszczano bezpośrednio do Zatoki Meksykańskiej, co przy jej rozległości, ruchliwości wód i naturalnych różnicach zasolenia (ujście Mississippi) nie miało większego negatywnego wpływu na środowisko naturalne. W Turcji

solankę można zrzucić do słonego jeziora Tuz Ozgulu, a we Francji np. do zasolonych limanów. W Polsce taki zrzut jest niemożliwy. Problem ten dotyczy zwłaszcza milionów ton solanki wytwarzanych podczas ługowania wielkich zbiorników strategicznych. Takie ilości soli nie zostaną wchłonięte przez rynek i staną się uciążliwym odpadem, mogącym negatywnie oddziaływać na środowisko naturalne i instalacje komunalne. Przykładem takiego negatywnego oddziaływania był zrzut zasolonych wód kopalnianych ze Śląska bezpośrednio do Wisły, co spowodowało problem ekologiczny (miejscami woda w Wiśle była bardziej zasolona niż w Bałtyku), a także doprowadziło do strat wywołanych przyspieszoną korozją sieci wodociągowych.

Jeżeli przyszłe zbiorniki strategiczne będą budowane nad Bałtykiem (a wszystko na to wskazuje), istnieje możliwość odprowadzenia solanki do Zatoki Puckiej. Do tej pory proponowano bezpośredni zrzut solanki do przybrzeżnych wód zatoki. Ponieważ nie można było całkowicie wykluczyć negatywnego wpływu takiego zrzutu na specyficzne środowisko naturalne słonawowodnego (brakicznego) zbiornika Zatoki Puckiej, a jest to przecież teren Nadmorskiego Parku Krajobrazowego, kilku rezerwatów przyrody i dwóch obszarów *Natura 2000*, projekt ten powodował i będzie powodować problemy prawne oraz opór społeczny, a zwłaszcza ekologicznych organizacji pozarządowych. Dlatego w przedstawionym projekcie NATO zaproponowano nową koncepcję, polegającą na odwróceniu istniejących zagrożeń i uczynieniu z odpadu, jakim jest solanka, czynnika oddziałującego pozytywnie na środowisko

(Pieńkowski, 2006a, b). Zamiast zrzucania solanki do przybrzeżnych wód powierzchniowych (powodującego niekorzystny, a w najlepszym przypadku neutralny efekt ekologiczny) proponuje się wykorzystanie uprzednio rozcieńczonej i natlenionej solanki jako medium przenoszącego tlen w głębsze rejonry Zatoki Puckiej i Zatoki Gdańskiej. Natleniona i rozcieńczona solanka (jako cięższa od otaczającej wody bałtyckiej) poprawiłaby warunki tlenowe na dnie zbiornika — przynajmniej w skali lokalnej. W wyniku postępującej eutrofizacji Bałtyku, spowodowanej zrzutami dużej ilości związków fosforu i azotu, dno Bałtyku na coraz większym obszarze jest już anoksyiczne (ryc. 3) — martwe pod względem występowania organizmów wielokomórkowych. Jest to największy problem ekologiczny związany z Morzem Bałtyckim. Znacznym zanieczyszczeniem charakteryzuje się na przykład rejon Zatoki Puckiej na przedpolu wylotu kolektora w Mechelinakach i to zarówno zanieczyszczeniem wód w warstwie powierzchniowej, jak i osadów przydennych do głębokości 5 m, które powstało na skutek sedymentacji zanieczyszczeń. Wedle wyników analizy składu bakterijskich osadów dennych Ogólna Liczba Bakterii (OLB) psychrofilnych i mezofilnych w badanych osadach jest wysoka i mieści się, odpowiednio, w granicach: od 187 000 do 2600 000 kolonii i od 1120 do 190 000 kolonii w 1 g osadu (inf. ustna Małgorzaty Michalskiej z Instytutu Medycyny Morskiej i Tropikalnej w Gdyni). Pozostałe wyniki badań osadów wskazują na duże zróżnicowanie poziomu zanieczyszczenia, zwłaszcza w odniesieniu do bakterii coli, których Najbardziej Prawdopodobna Liczba (NPL) zawie-



**Ryc. 3.** Największe zagrożenie dla Bałtyku — eutrofizacja i kryzys tlenowy w warstwie przydennej. Na fotografii: zakwit sinicowy na Bałtyku

**Fig. 3.** The biggest ecological problem in the Baltic Sea — eutrophication and resulting oxygen deficiency at the bottom. Inset photo: green algae bloom in the Baltic Sea

ra się w granicach od < 5 aż do 230 000. Zanieczyszczenie osadów bakteriami beztlenowymi redukującymi siarczynę jest niższe, ale miejscami też zauważalne — NPL tych bakterii mieści się granicach od < 5 do 62. W pobranych próbach stwierdzono także nieliczne paciorkowce kałowe i gronkowce saprofityczne.

Nowatorska metoda wykorzystania odpadowej solanki do natleniania wód przydennych może przywrócić w nich życie (ryc. 4). Zatem nie tylko neutralizuje problemy ekologiczne, ale czyni z całej inwestycji przedsięwzięcie poprawiające stan środowiska naturalnego — pozwoli więc uzyskać przychylność administracji państwowej oraz organizacji ekologicznych. Co więcej, projekt ten może uzyskać znaczące środki z funduszy ekologicznych. Na razie pobrano próby i rozpoczęto prace laboratoryjne mające na celu wyznaczenie wskaźników, za pomocą których można będzie w kwantyfikowalnej formie przedstawić efekt ekologiczny, gdyż aby skorzystać z funduszy ekologicznych, należy taki efekt wykazać.

### Znaczenie projektu dla Polski

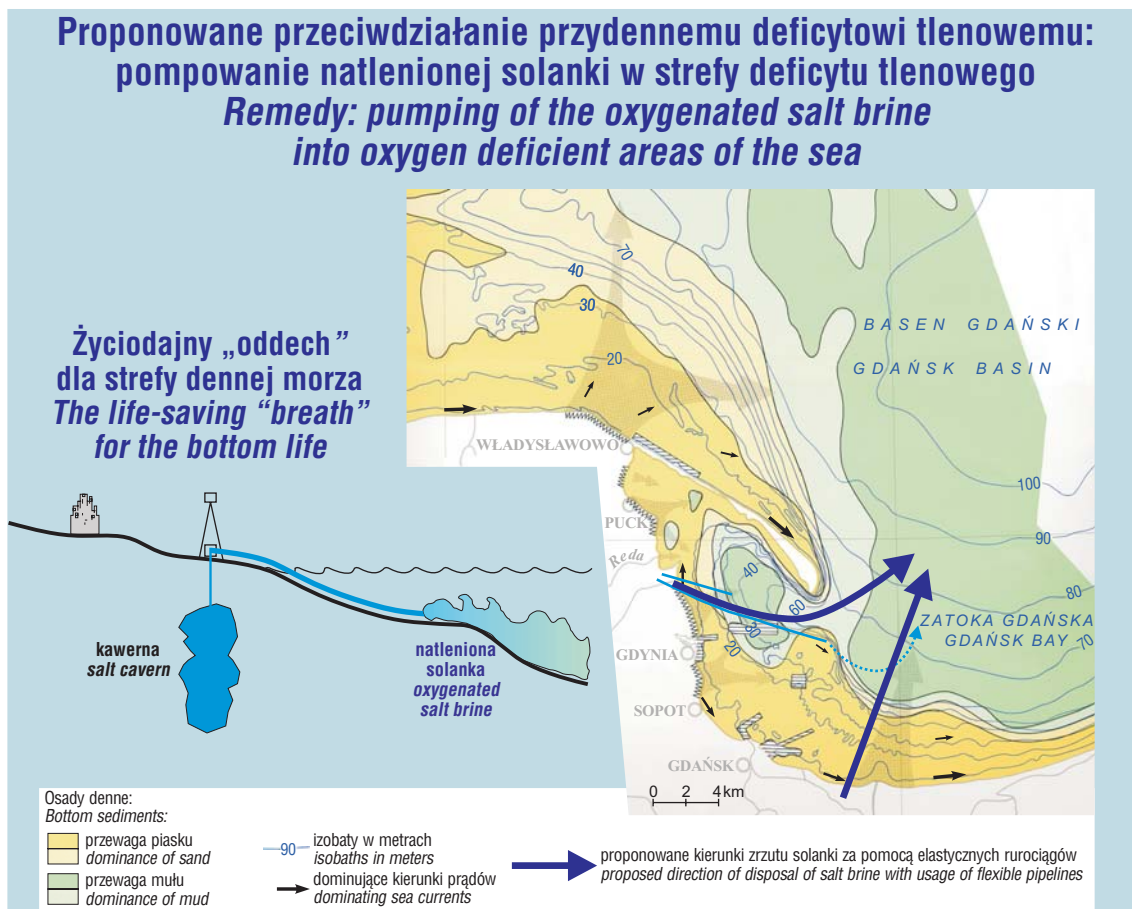
Celem projektu NATO i dalszych wynikających z niego poczynań jest ocena możliwości budowy zbiorników w geologicznych strukturach solnych i ich przydatności do magazynowania strategicznych zapasów ropy i paliw, a także przedstawienie propozycji poprawy stanu środowiska naturalnego Bałtyku poprzez wykorzystanie do tego celu

solanki uzyskiwanej podczas tworzenia kawern w utworach solnych regionu gdańskiego (Pieńkowski, 2006b).

Możliwość zmagazynowania w dobrze izolowanych strukturach solnych nawet kilkudziesięciu milionów ton ropy naftowej oznacza osiągnięcie faktycznej dywersyfikacji źródeł — ewentualny szantaż energetyczny staje się w tych warunkach znacznie mniej groźny. Co więcej, zmagazynowanie takiej ilości ropy będzie stabilizowało jej ceny. Zainteresowanie projektem okazała Turcja — jak wiadomo, przez terytorium Azerbejdżanu, Gruzji i Turcji biegnie niedawno otwarty ropociąg Baku–Ceyhan, zaopatrujący region śródziemnomorski w ropę kaspijską. Ożywa też koncepcja rurociągu Odessa–Brody–Gdańsk, tym bardziej że wystarczy zbudować jego odgałęzienie do jednego z tureckich portów nad Morzem Czarnym, by połączyć go z rurociągiem Baku–Ceyhan. Turcja posiada także struktury solne, w których korzystając z amerykańskich i polskich doświadczeń mogłaby zbudować zbiorniki ropy. Przyszła magistrala naftowa i gazowa z regionu kaspijskiego (i z Kazachstanu, którego zasoby są znacznie większe) wraz z dużymi strategicznymi magazynami w Polsce i Turcji mogłaby zapewnić bezpieczeństwo energetyczne w południowej i wschodniej Europie.

### Dalsze działania

Państwowy Instytut Geologiczny (PIG), sprawujący z mocy ustawy funkcję Państwowej Służby Geologicznej,



Ryc. 4. Proponowane przeciwdziałanie przydennemu deficytowi tlenu: pompowanie natlenionej solanki w strefy deficytu tlenowego zapewnia aerację niedotlenionego dna

Fig. 4. Remedy: pumping of oxygenated salt brine into the oxygen-deficient areas of the sea

posiada kompetentnych specjalistów, niezbędne bazy danych, doświadczenie i potencjał badawczy, wystarczające do zaprojektowania wymaganych zbiorników w strukturach solnych. Nagromadzone w PIG dane na temat budowy geologicznej Polski, w tym o występowaniu soli kamiennych wieku permskiego, zwłaszcza na Pomorzu (np. Czapowski, 1983, 1987; Wagner, 1994, 1998; Czapowski i in., 2007; Czapowski & Tomassi-Morawiec, 2006), mają zasadnicze znaczenie dla właściwego zaplanowania lokalizacji zbiorników. Kluczowym warunkiem realizacji projektu budowy podziemnych magazynów płynnych węglowodorów jest wykonanie badań geofizycznych i geologicznych w celu uściślenia parametrów geofizyczno-geologicznych utworów solnych w rejonach o lokalizacji korzystnej pod względem logistycznym i środowiskowym.

Poza dostarczeniem informacji na temat lokalizacji i rozmiaru struktury utworów solnych, a także ich właściwości geochemicznych i petrofizycznych, zostaną pozyskane informacje dotyczące możliwych przemieszczeń mas solnych, ich rozpuszczalności, a także obecności naturalnych pierwiastków promieniotwórczych. Informacje geologiczne (zwłaszcza zinterpretowane przekroje sejsmiczne) zostaną uzyskane z istniejącej bazy danych, a także w razie konieczności w toku nowych badań. Najlepszą lokalizacją pierwszej serii podziemnych zbiorników (umożliwiających zmagazynowanie około 15–20 mln t ropy naftowej) będzie Pomorze. Obok właściwych kawern do magazynowania ropy należy także wykonać podobnej pojemności kawerny, w których będzie przechowywana solanka służąca do sterowania procesem napełniania kawern ropą i jej wydobywania (alternatywą są odpowiednio pojemne zbiorniki naziemne).

Kryteria geologiczne, jakie muszą spełniać sole kamienne, aby można w nich było tworzyć podziemne magazyny, są następujące (Kłęczek i in., 2005):

1. Muszą mieć miąższość odpowiednią do uzyskania wymaganej objętości komór magazynowych. W odniesieniu do złóż soli cechsztyńskich na Pomorzu przyjęto, że minimalna miąższość pokładu soli powinna wynosić 80–100 m.

2. Powinny się charakteryzować spokojną, nie zaburzoną tektonicznie budową geologiczną.

3. Powinny mieć w miarę jednorodną strukturę, bez większych domieszek skał nierozpuszczalnych, a także, co znacznie ważniejsze, bez domieszek skał łatwo rozpuszczalnych, np. soli potasowo-magnezowych.

4. Zwierciadło solne powinno występować na głębokości do 1000 m. Jego położenie na większej głębokości zwiększa koszt inwestycji, ale na ogół jest ona w pełni opłacalna do głębokości około 1200–1300 m, taki przedział głębokości jest uważany za typowy dla lokalizacji kawern solnych (Berest & Brouard, 2003) — ryc. 2.

Technologia projektowania i wykonawstwa kawern jest powszechnie znana (np. Kłęczek i in., 2005). W trakcie realizacji inwestycji i w czasie eksploatacji kawern konieczne będzie zastosowanie nowoczesnego systemu monitoringu, który obejmie zarówno bieżącą obserwację integralności struktury zbiornika, jak i kontrolę jakości wydobywanych ze zbiorników paliw. Pierwsze zadanie będzie wykonane za pomocą metod geofizycznych. Kluczowy system monitorowania na bieżąco jakości paliw może być wykonany i przetestowany z wykorzystaniem najnowszych technologii we współpracy INL i PIG. Innego typu monitoringu będzie wymagać wpływ zrztu solanki na dno morskie. Będzie on prowadzony pod kątem oceny poprawy stanu środowiska naturalnego. Zebrane zostaną informacje dotyczące prze-

mieszczeń mas wodnych, temperatury, chemizmu wód i osadów dennych, życia organicznego i innych czynników. Informacje te umożliwią wyliczenie jaka ilość i jakie stężenie solanki będą optymalne do uzyskania oczekiwanego efektu ekologicznego (ryc. 4). Efekt ten będzie obserwowany za pomocą biomarkerów i analizy populacyjnej w pobieranych na bieżąco próbkach osadów dennych i jako pozytywny efekt ekologiczny może się stać elementem rynkowym. Będzie to również istotny czynnik dla biznesu, dający także pozytywny oddźwięk ekologiczny i medialny.

Warunkiem rozwoju projektu na skalę strategiczną będzie zaangażowanie partnerów o odpowiednim potencjale finansowym, co jest obecnie realizowane. W dniu 29 grudnia 2008 r. w ramach konsultacji społecznych projektów działania Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko przedłożono Rządowi RP opinię pt. *Budowa podziemnych zbiorników dla ropy naftowej i paliw płynnych w pokładach soli wraz z infrastrukturą logistyczną*. W opinii podpisanej przez autora niniejszego artykułu uznano, że projekt ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa energetycznego i strategicznego Polski, a także Unii Europejskiej (w perspektywie tworzonego Europejskiego Traktatu Bezpieczeństwa Energetycznego) oraz sojuszników NATO, zwłaszcza państw bałtyckich, Czech i Słowacji, które nie posiadają utworów solnych nadających się do magazynowania płynnych węglowodorów. Opinia ta była wcześniej wielokrotnie prezentowana zespołom eksperckim w Polsce i za granicą, a także oficjalnym przedstawicielom państwa. W trakcie kilkuletnich dyskusji nie podniesiono istotnych merytorycznych zastrzeżeń co do idei projektu. Dlatego należy jak najszybciej wdrożyć realizację tego projektu inwestycyjnego.

## Literatura

- BEREST P. & BROUARD B. 2003 — Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage. *Oil & Gas Science and Technology — Rev. IFP*, 58: 361–384.
- CZAPOWSKI G. 1983 — Zagadnienia sedimentacji soli kamiennej cyklotemu PZ1 na wschodnim skłonie wyniesienia Łeby. *Prz. Geol.*, 31: 278–294.
- CZAPOWSKI G. 1987 — Sedimentary facies in the Oldest Rock Salt (Na1) of the Łeba elevation (northern Poland). *Springer-Verlag. Lecture Notes of Earth Sciences*, 10: 207–224.
- CZAPOWSKI G., CHEŁMIŃSKI J., TOMASZCZYK M. & TOMASSI-MORAWIEC H. 2007 — Modelowanie przestrzenne budowy geologicznej osadowych złóż pokładowych na przykładzie cechsztyńskiego złoża soli kamiennej „Mechelinki” nad Zatoką Pucką. *Prz. Geol.*, 55: 681–689.
- CZAPOWSKI G. & TOMASSI-MORAWIEC H. 2006 — Geologia permskiego pokładowego złoża soli kamiennej w rejonie Zatoki Gdańskiej. *Prz. Geol.*, 54: 309–310.
- KLECAN R., ORZECZOWSKI P. & MIGA K. 1984 — Przechowywanie olejów napędowych i paliwa lotniczego w podziemnych zbiornikach utworzonych w wysadach solnych. *Nafta*, 5: 188–192.
- KŁECCZEK Z., RADOMSKI A. & ZELJAŚ D. 2005 — Podziemne magazynowanie. CMG KOMAG, Pr. Nauk. — Monografie, 9: 1–98.
- PIENKOWSKI G. 2006a — Magazynowanie węglowodorów w strukturach solnych w Polsce w świetle założeń projektu NATO-CCMS 982185. *Prz. Geol.*, 54: 312–313.
- PIENKOWSKI G. 2006b — Storage of petroleum in salt caverns and the use of salt brine as a medium for improvement of environment. *Summary Final Report, NATO Science for Peace and Security, Brussels*: 6.
- WAGNER R. 1994 — Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 146: 1–97.
- WAGNER R. 1998 — Mapy cechsztyńskie. [W:] Dadlez R., Marek S. & Pokorski J. (red.), *Atlas paleogeograficzny epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce*, 1 : 2 500 000. Państw. Inst. Geol.

Praca wpłynęła do redakcji 16.07.2009 r.

Po recenzji akceptowano do druku 21.08.2009 r.