

## Geologiczne uwarunkowania składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w złożach soli w Polsce

Kazimierz Ślizowski<sup>1</sup>, Leszek Lankof<sup>1</sup>



K. Ślizowski



L. Lankof

**Geological conditions of high level radioactive waste storage in Polish salt deposits.** *Prz. Geol.*, 57: 829–838.

*Abstract.* Spent nuclear fuel (SNF) and high-level waste (HLW) resulting from the SNF reprocessing produce significant amount of heat during retardation of  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  particles and emit ionizing radiation, as well as neutrons even after cooling. Therefore, it is recommended to store SNF and HLW in deep geological formations capable to provide isolation from ground waters for a sufficiently long time. Only a few rock types could meet such requirements and a rock salt is among them. In the paper the following topics are presented: categories of radioactive wastes, worldwide review of nuclear waste disposal developments, selection of the appropriate rock formations for location of safe storage facilities as well as the concept of potential site selection for such storage facility in the territory of Poland

**Keywords:** radioactive waste, underground storage, storage criteria, rock salt deposits, Zechstein, Poland

Składowanie odpadów promieniotwórczych oraz zapewnienie pełnej i długotrwałej izolacji tych odpadów od biosfery należy do interdyscyplinarnych zagadnień naukowo-technicznych. Obecnie powszechnie została przyjęta koncepcja docelowego składowania odpadów promieniotwórczych w wybranych formacjach geologicznych, które mają stanowić naturalną, długotrwałą barierę ochronną.

Do tej pory nie zostały ustalone międzynarodowe przepisy ani jednolite kryteria oceny ryzyka składowania odpadów promieniotwórczych. Jednak pewne wskazówki i zalecenia dotyczące gospodarki odpadami promieniotwórczymi, które powinny być przestrzegane w celu zapewnienia bezpieczeństwa do czasu wygaśnięcia aktywności odpadów, opracowała Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (IAEA) w Wiedniu. Dotyczą one:

- wyboru właściwego w stosunku do stopnia zagrożenia miejsca składowania;
- zastosowania sprawdzonego i wypróbowanego rozwiązania technologicznego, dostosowanego do lokalnych warunków przyrodniczych.

Szczegółowe wymagania, jakie musi spełniać składowisko, zależą od kategorii odpadów. Ze względu na różny typ formacji skalnych, w których składowanie jest możliwe, a także różne nastawienie opinii publicznej do tej działalności, każdy kraj jest zmuszony do wypracowania własnej koncepcji budowy składowisk.

Korzystając z wyników dotychczasowych badań i doświadczeń krajów przodujących w dziedzinie składowania odpadów promieniotwórczych, w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN opracowano kryteria wyboru środowiska do głębokiego składowania odpadów promieniotwórczych (SOP). Na podstawie tych kryteriów oraz rezultatów analizy archiwalnych danych geologicznych dotyczących struktur skalnych w Polsce do szczegółowych badań zakwalifikowano: skały magmowe i metamorficzne, kompleksy ilaste oraz złoża pokładowe i wysadowe soli kamiennej.

### Charakterystyka odpadów promieniotwórczych

Wynikiem stosowania techniki jądrowej, m.in. w medycynie, przemyśle zbrojeniowym oraz w energetyce jądrowej, jest wytworzenie znacznych ilości radiotoksycznych długo- i krótkożyciowych odpadów promieniotwórczych. Do szczególnie niebezpiecznych i wymagających specjalnego traktowania zalicza się (IAEA, 2007):

- wypalone paliwo jądrowe (SNF — *Spent Nuclear Fuel*);
- wysokoaktywne odpady promieniotwórcze (HLW — *High Level Waste*);
- odpady transuranowe (TRUW — *Trans Uranium Waste*).

**Wypalone paliwo jądrowe (SNF)** powstaje w wyniku eksploatacji cywilnych i wojskowych reaktorów jądrowych. Ma ono postać kilkumetrowych prętów uranowych, osłoniętych koszulkami z cyrkonu. Po kilkuletniej eksploatacji w reaktorze jądrowym pręty te jeszcze przez długi czas generują promieniowanie jonizujące i neutrony, a w wyniku hamowania promieniowania  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  wydzielają również ciepło.

Obecnie stosowane technologie polegają na wstępnym, kilkuletnim studzeniu wypalonego paliwa jądrowego (SNF) w basenach wodnych przy reaktorze, a następnie na składowaniu go przez kilkadziesiąt lat w odpowiednich przechowalnikach powierzchniowych (technologia AFR — *Away from Reactor*). W zależności od polityki prowadzonej przez poszczególnych użytkowników energetyki jądrowej wypalone paliwo już po jednorazowym użyciu jest kierowane do składowania (OTC — *Once through Cycle*) lub podlega dalszemu przerobowi (FR — *Fuel Reprocessing*). W niektórych państwach stosowany jest również cykl mieszany, polegający na częściowym przerobie wypalonego paliwa (IAEA, 2005).

**Wysokoaktywne odpady promieniotwórcze (HLW)** są głównym produktem przerobu wypalonego paliwa jądrowego, polegającego na rozpuszczeniu w kwasach wypalonych uranowych prętów paliwowych i oddzieleniu promieniotwórczych produktów rozszczepienia jąder izotopu <sup>235</sup>U od pozostałego uranu i powstałych w trakcie pra-

<sup>1</sup>Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków, centrum@min-pan.krakow.pl

cy reaktora jąder transuranowców, w tym głównie rozszczepialnego izotopu plutonu  $^{239}\text{Pu}$ . Z uzyskanego w ten sposób uranu i jąder transuranowców produkuje się paliwo reaktorowe typu MOX (*Mixed Oxides*), które może być, w określonych proporcjach, użyte wraz z nowym paliwem uranowym jako powtórny wsad paliwowy do reaktora. Powstałe w wyniku tego procesu ciekłe, wysokoaktywne odpady promieniotwórcze zateża się, witrifikuje i umieszcza w cylindrycznych naczyniach ze stali nierdzewnej. Po zastygnięciu są one traktowane jako odpad niebezpieczny.

**Odpady transuranowe (TRUW)** składają się głównie z wytworzonych w reaktorze pierwiastków cięższych od uranu i plutonu, o długim okresie połowicznego zaniku i aktywności wyższej niż 3 kBq na gram odpadu. Powstają podczas przerobu SNF prowadzonego z ekstrakcją transuranowców cięższych od uranu i plutonu. Odpady tego typu nie generują dużych ilości ciepła. Emitują głównie promieniowanie  $\alpha$  i neutrony.

Obecnie, według zaleceń Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej, zarówno wypalone paliwo jądrowe, wysokoaktywne odpady promieniotwórcze, jak i odpady transuranowe wymagają skutecznej izolacji od biosfery przez bardzo długi czas (do 10 tys. lat) i magazynowania w podziemnych składowiskach w głębokich formacjach geologicznych, odizolowanych od wód podziemnych (IAEA, 1994, 2007). W Polsce składowanie odpadów promieniotwórczych jest regulowane ustawą z dn. 29.11.2000 r. — *Prawo atomowe i Rozporządzeniem Rady Ministrów z dn. 3.12.2002 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego*.

### Światowe doświadczenia w składowaniu odpadów promieniotwórczych

System głębokiego składowania odpadów promieniotwórczych (400–1000 m p.p.t.), gwarantujący długotrwałe bezpieczeństwo, jest oparty na koncepcji wielobarierowej, obejmującej bariery naturalne, jakimi są różne ośrodki skalne, oraz system barier inżynierskich, takich jak podszadka, materiały uszczelniające (bentonit, cement), kontenery na odpady ze stali nierdzewnej, miedzi i tytanu oraz materiały, w jakich odpady wysokoaktywne (HLW) są zestawiane — szkło, bituminy czy cement (IAEA, 2003).

Proces projektowania i budowy podziemnych składowisk SNF i HLW jest długotrwały, kosztowny i przebiega etapowo. W większości krajów jest on prowadzony podobnie (ryc. 1). Pierwsza faza tego procesu obejmuje stworzenie programu badawczego, wybór potencjalnych lokalizacji i po wstępnych badaniach opracowanie raportu na temat wpływu na środowisko naturalne (EIS — *Environmental*

*Impact Statement*) oraz studium wykonalności przedsięwzięcia (IFS — *Investment Feasibility Report*). Kolejna faza polega na szczegółowej charakterystyce wybranej lokalizacji i opracowaniu raportu bezpieczeństwa (SAR — *Safety Analysis Report*), będącego podstawą do wydania licencji na opracowanie szczegółowego projektu składowiska i jego budowę. Ostateczna decyzja o uruchomieniu składowiska jest podejmowana po zademonstrowaniu poprawności technologii *in situ* (Dyer & Voegelé, 2001).

Wzrastające zainteresowanie problematyką składowania odpadów promieniotwórczych przyczyniło się do wybudowania podziemnych laboratoriów i prowadzenia krajowych oraz międzynarodowych projektów badawczych. Aktualnie na świecie czynnych jest 13 laboratoriów URL (*Underground Research Laboratory*), w tym 6 zostało zlokalizowanych w skałach krystalicznych, 4 — w kompleksach ilastych, 2 — w solach kamiennych i 1 — w tufitach.

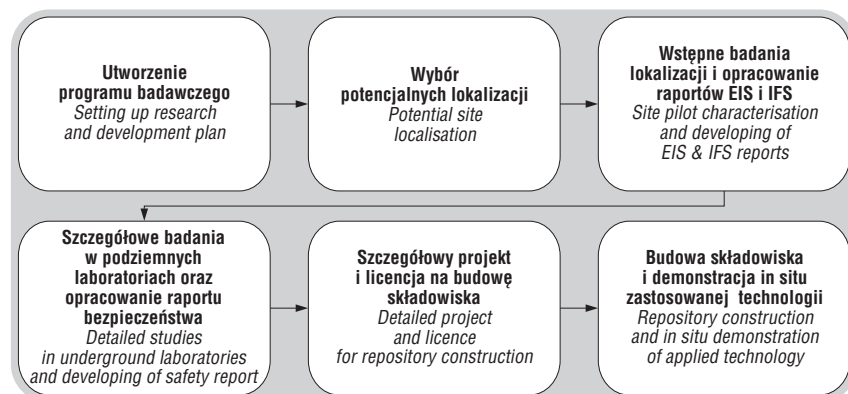
Od kilku lat obserwuje się tendencję do rozwoju współpracy krajów o małej produkcji odpadów promieniotwórczych w celu budowy wspólnego, regionalnego składowiska odpadów promieniotwórczych (McCombie & Chapman, 2006). Obecnie ze środków Unii Europejskiej jest finansowany program SAPIERR (*Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories* — Akcja Wspomagająca: Pilotażowa Inicjatywa dla Europejskich Składowisk Regionalnych), skupiający 21 organizacji z 14 państw.

Skomplikowany i długotrwały proces projektowania oraz budowy, a także zawiły system legislacyjny sprawiły, że do chwili obecnej czynne jest tylko jedno głębokie składowisko, w którym są składowane odpady transuranowe. Zostało ono założone w pokładowych złożach soli kamiennej Salado Formation w Carlsbad w USA, gdzie od 1982 r. funkcjonuje podziemne laboratorium badawcze (WIPP — *Waste Isolation Pilot Plant*).

Według Rempego (2007) najbardziej zaawansowane prace nad budową kolejnych składowisk wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych są prowadzone w: Onkallo w Finlandii (w skałach krystalicznych), Bure we Francji (w skałach ilastych) i Yucca Mountain w Stanach Zjednoczonych (w tufitach).

### Wybór struktury skalnej do budowy głębokiego składowiska wypalonego paliwa i odpadów wysokoaktywnych w Polsce

O bezpiecznym składowaniu odpadów promieniotwórczych decyduje wybór właściwego miejsca składowania oraz zastosowanie odpowiedniego rozwiązania technologicznego, dostosowanego do lokalnych warunków przyrodniczych. Ze względu na plany wdrożenia energetyki



←  
**Ryc. 1.** Schemat projektowania i budowy podziemnych składowisk odpadów promieniotwórczych  
**Fig. 1.** Schematic diagram of planning and constructing of radioactive waste storage facility

jądrowej obecnie prowadzi się w naszym kraju wstępne badania związane ze składowaniem odpadów promieniotwórczych. Znajdują się one teraz na etapie wyboru potencjalnych lokalizacji. Stosując międzynarodowe standardy wyboru struktury skalnej do budowy głębokiego składowiska wypalonego paliwa i odpadów wysokoaktywnych rozważano 3 podstawowe zagadnienia:

- pojemność termo-hydro-mechaniczno-chemiczną (THMC) wybranej struktury;
- model składowiska, który zapewni stateczność wyrobisk i bezpieczeństwo eksploatacji;
- długoterminową analizę bezpieczeństwa i oceny skuteczności barier geologicznych.

Masyw skalny, w którym dopuszcza się budowę składowiska odpadów promieniotwórczych (SOP), powinien się charakteryzować (IAEA, 2006):

- wielkością zapewniającą odpowiednią kubaturę wyrobisk przy zachowaniu calizn ochronnych;
- szczelnością zapewniającą brak dopływu wody do składowiska;
- lokalizacją w środowisku geologicznym zapewniającym minimalizację niekorzystnych zmian geochemicznych i hydrogeologicznych otoczenia związanych z obciążeniem termicznym;
- fizyczno-chemicznymi i geochemicznymi właściwościami ograniczającymi przemieszczanie się radionuklidów;
- lokalizacją na obszarach asejsmicznych;
- lokalizacją nie naruszającą dotychczasowego zagospodarowania, zapewniającą stabilność masywu w okresie uzależnionym od rodzaju składowanego odpadu promieniotwórczego.

Wyniki wstępnej analizy danych geologicznych, w toku której uwzględniano wielkość struktur skalnych w Polsce, stopień rozpoznania ich budowy geologicznej i warunki hydrogeologiczne, umożliwiły wybór środowisk skalnych, które mogą odpowiadać wymienionym wymogom lokalizacji SOP w głębokich formacjach geologicznych. Są to:

- skały magmowe i metamorficzne;
- skały ilaste;
- pokładowe i wysadowe złoża solne.

Następnie wyznaczono kryteria warunkujące składowanie w wymienionych formacjach skalnych poszczególnych kategorii odpadów promieniotwórczych. Opracowując te kryteria, kierowano się zaleceniami IAEA i własnym rozpoznaniem zagadnienia — uwzględniono także lokalne warunki geologiczne, przyjętą koncepcję składowania i obowiązujące przepisy. Określono również warunki klimatyczne i cechy powierzchni terenu rejonów składowania oraz budowę geologiczną wszystkich wytypowanych do lokalizacji SOP formacji geologicznych, w tym: warunki hydrologiczne, morfologię terenu, procesy naturalne, procesy wywołane działalnością człowieka i czynniki geologiczne (litologię, tektonikę, głębokość zalegania oraz właściwości fizyczno-chemiczne wytypowanych formacji skalnych).

Kryteria warunkujące składowanie, opracowane oddzielnie dla poszczególnych rodzajów struktur skalnych, obejmowały:

- uwarunkowania geologiczne (preferowany typ skał, głębokość zalegania, geometrię

skał otaczających składowisko, budowę geologiczną i tektonikę, warunki geodynamiczne);

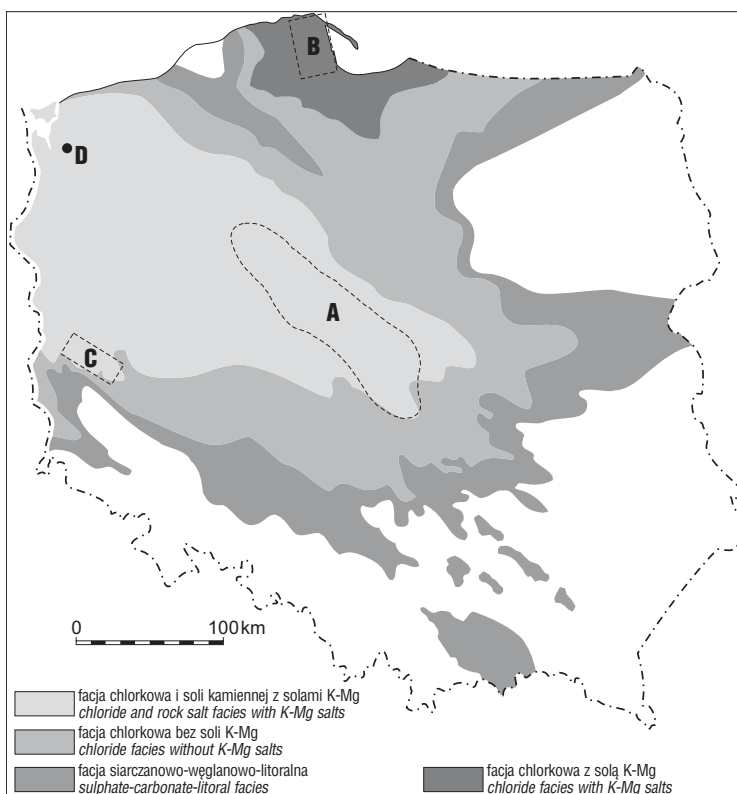
- warunki hydrogeologiczne (zawodnienie górotworu, zawodnienie utworów występujących w otoczeniu struktury, warunki geochemiczne);
- parametry górnicze (minimalna grubość półki stropowej, minimalna grubość półki spągowej, minimalna miąższość jednorodnych kompleksów skalnych, maksymalna głębokość składowania).

#### Możliwości lokalizacji składowisk SNF i HLW w cechsztyńskich złożach soli w Polsce

W Polsce jako potencjalne środowisko do tworzenia składowisk odpadów promieniotwórczych są rozważane cechsztyńskie złoża solne i to zarówno wysadowe, jak i pokładowe. Warto przy tym zwrócić uwagę, że wymienione typy złóż różnią się diametralnie pod względem budowy geologicznej, która decyduje o modelu przestrzennym SOP.

Cechsztyńska formacja solonośna występuje pod powierzchnią ok. 2/3 obszaru Polski, jednak przeważnie na głębokości około 5–7 km (ryc. 2). Do górniczego udostępnienia nadają się jedynie niektóre struktury solne, które w pasie wału kujawskiego przebijają nadległe formacje skalne, tworząc wysady solne, oraz pokłady soli zalegające na głębokości 500–2000 m p.p.t. na obrzeżach basenu cechsztyńskiego:

- w wyniesieniu Łeby na obszarze pomorskim, od południka Łeby na zachodzie po Zatokę Pucką na wschodzie;
- w rejonie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego na monoklinie przedsudeckiej (Poborski, 1976).



Ryc. 2. Mapa litofacjalna utworów cechsztynu w Polsce (wg Ślizowskiego & Saługi, 1996): A — region środkowopolski, B — region północny, C — region południowo-zachodni, D — struktura Goleniowa

Fig. 2. The sketch of lithofacies map of the Zechstein basin in Poland (after Ślizowski & Saługa, 1996): A — Central Poland region, B — northern region, C — south-western region, D — Goleniów structure

Podstawowym zagadnieniem decydującym o możliwości wykorzystania złóż soli do budowy SOP jest zagrożenie ze strony wód okalających złoża, wobec którego głównym zabezpieczeniem pozostają nieprzepuszczalne calizny ochronne wokół składowiska oraz wodoszczelne, pionowe wyrobiska udostępniające, chroniące przed ruchem wód. Wysadowe złoża soli, dzięki otulinie skał ilastych, która osłania rozpuszczalne sole przed dostępem do nich wód podziemnych, przetrwały do czasów współczesnych. Daje to duży stopień gwarancji, że wysady, w których będzie założone SOP, obejmujące jedynie znikomy procent objętości wysadu, przetrwają okres wymagany do osiągnięcia bezpiecznego poziomu promieniowania jonizującego. Warunkiem jest dobór odpowiedniej głębokości lokalizacji składowiska pod stropową półką bezpieczeństwa, uwzględniający występowanie zjawiska halokinezy.

W pokładowych złożach soli zachowało się normalne następstwo wiekowe skał ewaporatowych. By mogły być spełnione wymagania bezpieczeństwa składowania, na podziemne SOP nadaje się większe rozprzestrzenienie soli w nienaruszonej tektonicznie bryle przestrzennej o miąższości > 150 m. A w warstwach nadkładu i skałach podścielających złoża solne nie mogą występować nieciągłości tektoniczne.

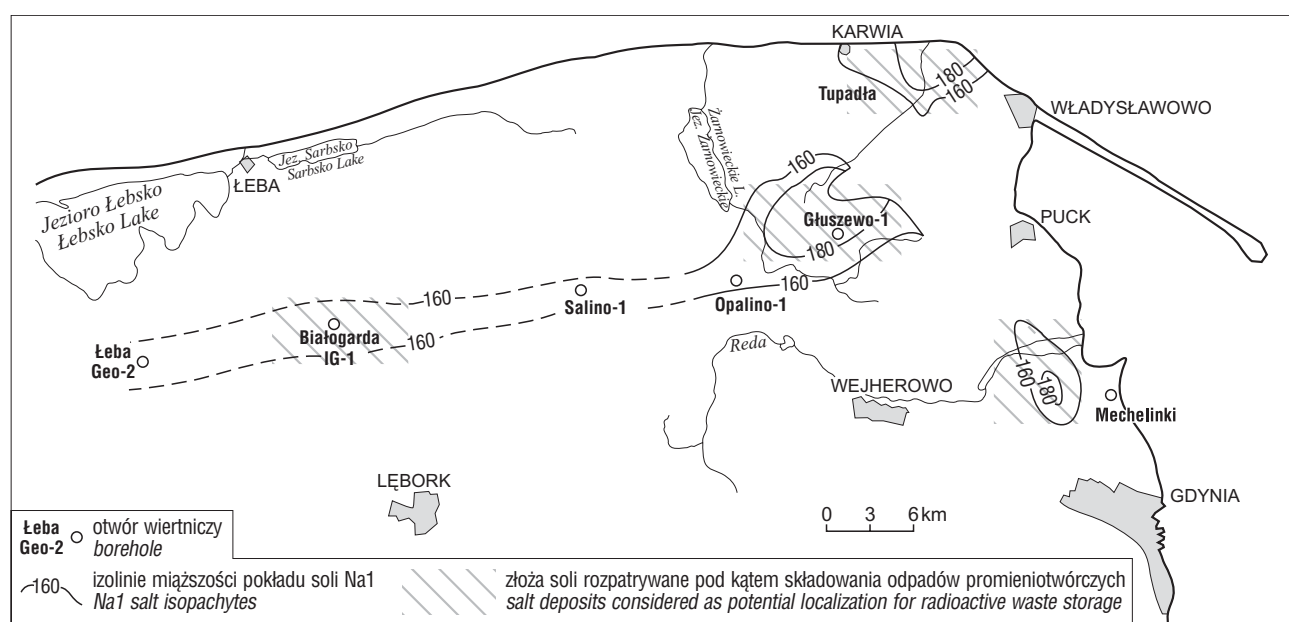
Ze względu na stateczność wielkogabarytowych wyrobisk funkcyjnych maksymalna głębokość składowania odpadów wysokoaktywnych generujących ciepło nie powinna przekraczać 1000 m. Głębokość ta została wyznaczona w odniesieniu do warunków składowania w pokładowych złożach soli regionu gdańskiego, gdzie gradient temperatury górotworu jest niski (ok. 0,01°C/m), wobec czego na głębokości 1000 m temperatura wynosi ok. 20°C. W wysadach solnych i złożach pokładowych na monoklinie przedsudeckiej na tej głębokości temperatura wynosi ponad 40°C, co oznacza ponad 4-krotnie większą szybkość pelzania.

W regionie gdańskim (ryc. 3) występują 4 złoża o miąższości pokładu soli (Na1) przekraczającej 150 m (Peryt i in., 1992), z których złoża Mechelinki, udokumen-

towane w kat. C<sub>1</sub>, jest przeznaczone na podziemne zbiorniki paliw, a złoża Głuszewo i Tupadła, udokumentowane w kat. C<sub>2</sub>, nie spełniają kryteriów powierzchniowych. Natomiast w rejonie Białogardy strop pokładu soli (udokumentowanego w kat. C<sub>2</sub>) zalega na głębokości ok. 650 m, a jego miąższość wynosi 150–225 m, toteż może on stanowić lokalizację rezerwową (Ślizowski, 1998).

Sole kamienne monokliny przedsudeckiej zostały najlepiej rozpoznane w granicach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (na obszarze o powierzchni 350 km<sup>2</sup>) jako kopalina towarzysząca złożom rud miedzi. Ogólna rozciągłość i upad pokładów soli są zgodne z rozciągłością i upadem warstw monokliny. Zgeneralizowany kąt zapadania warstw waha się w granicach 3–6°. W budowie tektonicznej tego obszaru zaznacza się sieć dyslokacji nieciągłych, zarówno regionalnych, jak i lokalnych. Najliczniejsze są uskoki o przebiegu NW i SE, które dominują nad siecią uskoków o biegu W-E i NE-SW. Amplitudy głównych dyslokacji wahają się od 10 m do 100 m (Czapowski i in., 1992). W profilach sekwencji paleozoiczno-kenozoicznej występują liczne poziomy wodonośne. Według katalogu trzęsień ziemi w Polsce w latach 1000–1970 (Pagaczewski, 1972) około 50% trzęsień ziemi, które miały epicentra na terenie Polski i czeskich Sudetów, przypada na Dolny Śląsk. Wstrząsy sejsmiczne zarejestrowane po roku 1970 (od silnych do słabych) były indukowane przez działalność górnictwa. Uwzględniając zagrożenia sejsmiczne, hydrogeologiczne i trudności techniczne wynikające z dużej głębokości zalegania pokładu najstarszej soli kamiennej uznano, że lokalizację SOP w tym regionie można rozpatrywać ewentualnie w dalszej kolejności.

W północno-zachodniej części Polski znajduje się 66 dużych struktur solnych, które nie nadają się do zagospodarowania, gdyż zalegają na zbyt dużej głębokości (Dadlez, 1998). Jedynie występujący w obrębie wału solnego Goleniów–Dobrzany słup solny Goleniowa (ryc. 2), o powierzchni 25 km<sup>2</sup> i zwierciadło solnym na głębokości 880 m,



**Ryc. 3.** Mapa złóż soli rozpatrywanych pod kątem składowania w nich odpadów promieniotwórczych (wg Ślizowskiego i in., 2004)  
**Fig. 3.** Distribution of salt deposits considered as potentially suitable for localization for radioactive waste storage facility (after Ślizowski et al., 2004)

został przewidziany do ewentualnej lokalizacji podziemnych zbiorników płynnych węglowodorów.

W regionie środkowopolskim (ryc. 4) można wyróżnić strefę centralną, charakteryzującą się bardzo intensywną tektoniką solną, oraz otaczające strefę centralną od północnego wschodu, południa i południowego zachodu strefy brzeżne — z mniejszymi strukturami antyklinalnymi. W regionie tym występuje 36 struktur solnych, z których 11 spełnia ustalone kryterium występowania zwierciadła solnego powyżej głębokości 600 m p.p.t. (Ślizowski, 1983). Spośród tych 11 struktur z rozważań wyeliminowano:

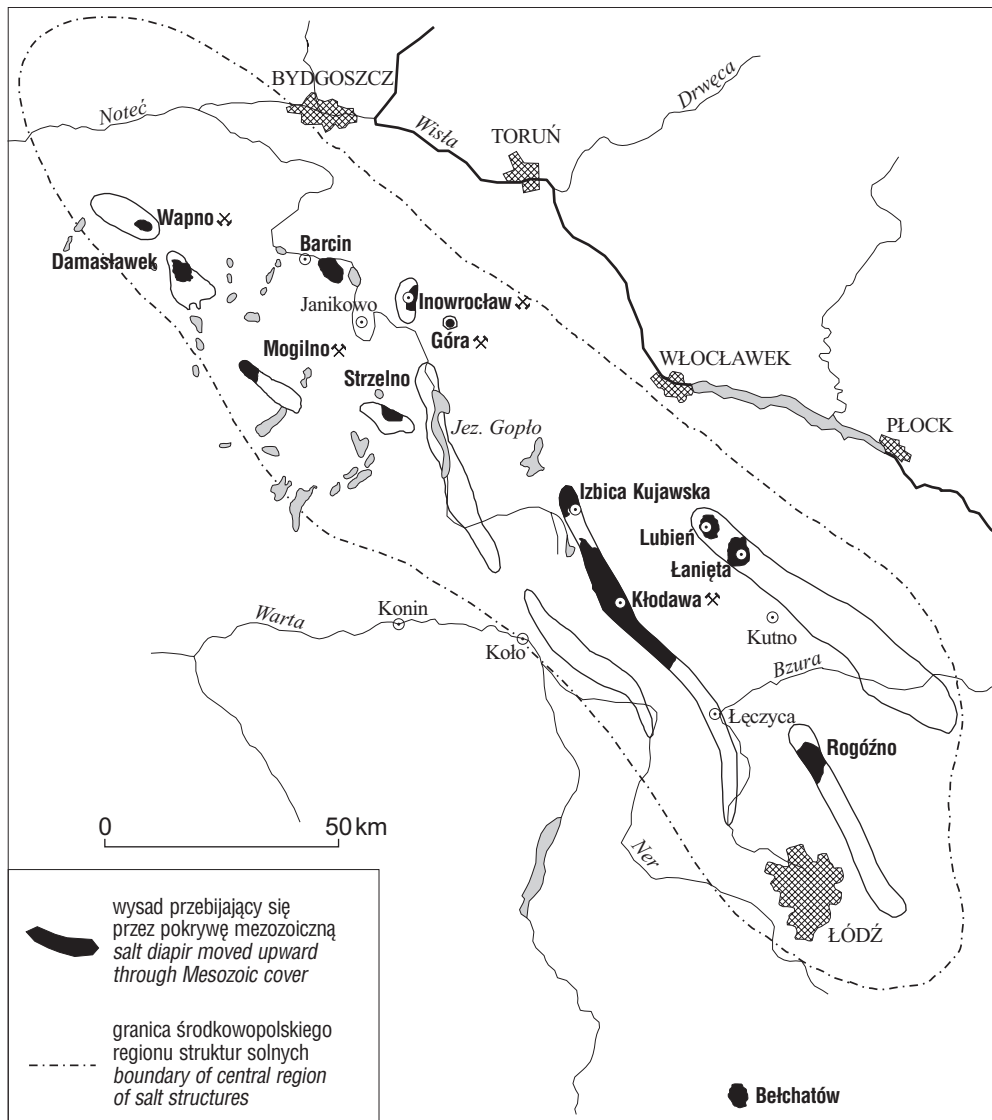
- wysady Wapno i Inowrocław — z powodu zakończenia eksploatacji i zatopienia kopalń;
- wysady Góra i Mogilno — z powodu lokalizacji w nich i eksploatacji zbiorników płynnych węglowodorów.

Po przeanalizowaniu przyrodniczych warunków występowania i planów zagospodarowania pozostałych 7 wysadów solnych uznano, że lokalizację SOP w 4 z nich należy rozpatrywać w dalszej kolejności, gdyż:

- Wysad solny Bełchatów, położony pomiędzy polami odkrywkowej eksploatacji węgla brunatnego

Bełchatów i Szczerców, ma małą powierzchnię — 0,5 km<sup>2</sup>. Po zakończeniu eksploatacji węgla w wyrobiskach powstanie głębokie jezioro poeksploatacyjne, w wyniku czego wyrobiska górnicze w wysadzie mogłyby być narażone na stałe przecieki, a nawet na nagłe przedarcie się wód poprzez spękaną warstwę anhydrytu w czapie.

- Wysad Izbica Kujawska ma skomplikowaną budowę geologiczną. Jest poprzecinany uskokami poprzecznymi, przesuwanymi poszczególne partie skał w poziomie oraz w pionie, i charakteryzuje się niekorzystnymi warunkami hydrogeologicznymi; ponadto nie został odpowiednio udokumentowany.
- Wysad Rogóźno, o dużej powierzchni (21 km<sup>2</sup>), ma bardzo skomplikowaną tektonikę, nie został odpowiednio udokumentowany, a w jego nadkładzie występuje węgiel brunatny, który mógłby być w przyszłości eksploatowany.
- złoża soli w wysadzie Lubień jest udokumentowane w kat. C<sub>1</sub>, ale w perspektywnych planach wysad ten został przeznaczony do lokalizacji zbiorników podziemnych paliw płynnych.



Ryc. 4. Śródkowopolski region struktur solnych  
Fig. 4. Central Poland region of salt structures

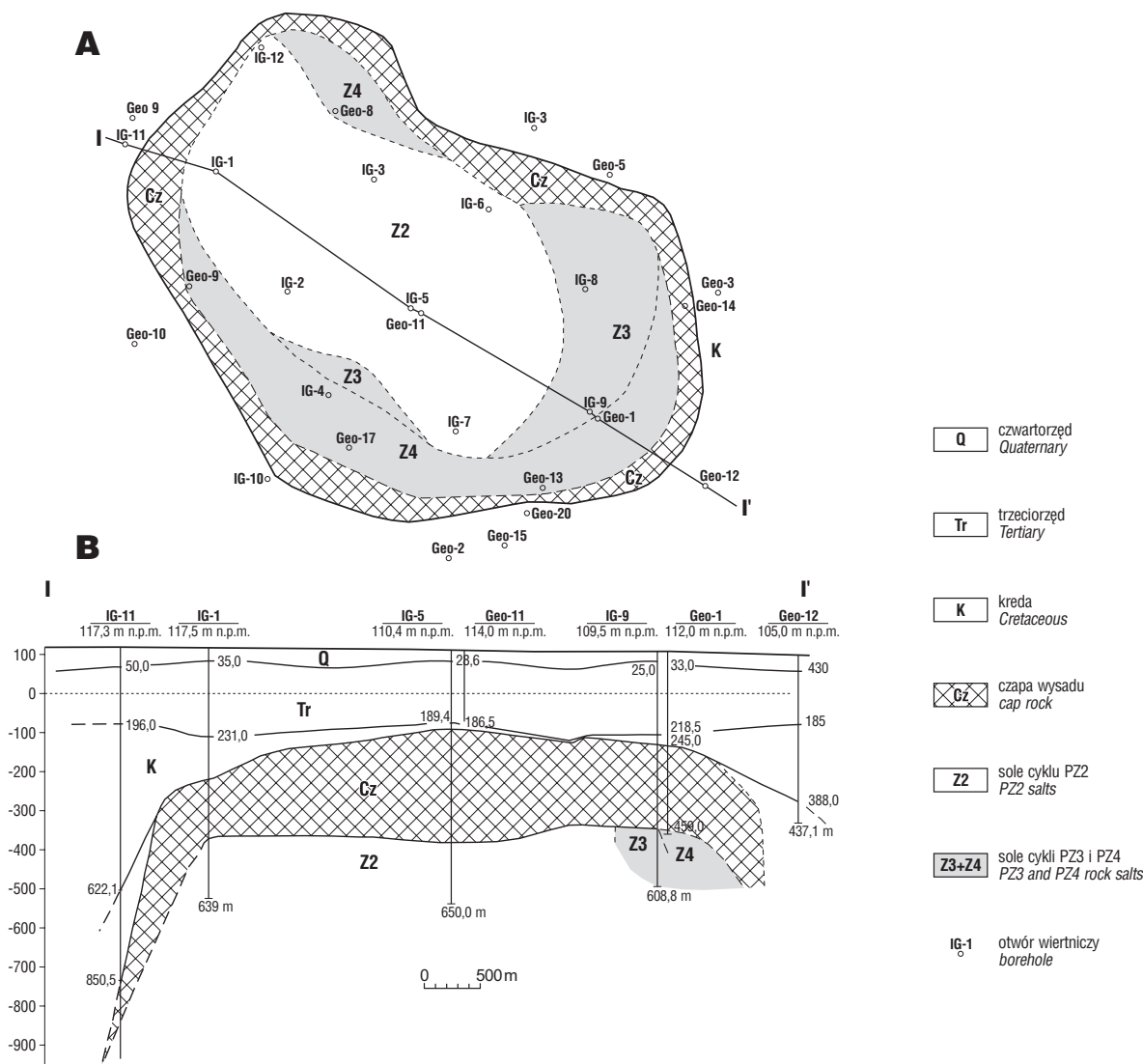
Do oceny możliwości lokalizacji SOP w pierwszej kolejności zakwalifikowano 3 wysady solne: Damasławek, Łanięta oraz południową część struktury Kłodawa (poza ochronnym filarem od strony kopalni). Wybór lokalizacji SOP w wytypowanych wysadach będzie polegać na wskazaniu jednorodnych kompleksów skał o wystarczającej miąższości, co może być utrudnione ze względu na ich skomplikowaną budowę wewnętrzną. Zgodnie z aktualnym stanem rozpoznania budowy geologicznej wysadów w rejonie środkowopolskim ustalono, że odpowiednich kompleksów należy poszukiwać w:

- jądrach antyklin (oddział dolny), stanowiących jednorodne kompleksy soli kamiennej;
- w synklinach (oddział górny), w których występują kompleksy zubrów i soli ilastych (Ślizowski, 1998).

Odmienność właściwości utworów dolnego i górnego oddziału petrofizycznego odzwierciedla się w budowie wewnętrznej wysadów. Warstwy serii solnej są silnie sfałdowane i zdeformowane tektonicznie, przy czym amplituda fałdów bywa bardzo duża i powoduje, że w przedziale głębokości planowanych lokalizacji SOP (600–900 m p.p.t.) warstwy zapadają bardzo stromo.

Celem określenia przydatności do lokalizacji SOP wykonano laboratoryjne badania zubrów brunatnych (Na3t) i hematytowych (Na4t). Prace obejmowały analizy z zakresu mineralogii i petrografii, właściwości fizycznych (porowatość, przepuszczalność, gazoność, naturalna wilgotność i utrata masy po podgrzaniu), geomechaniki (wytrzymałość, testy pełzania i relaksacji) oraz właściwości sorpcyjnych. Konkretnym celem badań było porównanie właściwości zubrów z właściwościami soli kamiennej, która jest dobrze rozpoznana i zakwalifikowana jako ośrodek nadający się do budowy SOP. Wyniki badań świadczą o korzystnych właściwościach zubrów. Mieszczą się one w dolnych granicach parametrów soli kamiennej; natomiast badania właściwości sorpcyjnych potwierdziły wyższą sorpcyjność jonów  $Sr^{2+}$ ,  $Y^{3+}$  i  $Eu^{3+}$  w zubrach niż w soli kamiennej (Ślizowski i in., 2005; Lankof, 2008).

**Wysad solny Damasławek** (ryc. 5, tab. 1), o kształcie zbliżonym do cylindrycznego, w przekroju poprzecznym jest owalem o osiach długości 5,5 km i 3,5 km. Zwierciadło solne tego wysadu zalega na głębokości 446–538 m p.p.t.



**Ryc. 5.** Wysad solny Damasławek: **A** — mapa geologiczna wysadu na głębokości 400 m p.p.m.; **B** — przekrój geologiczny I–I' (wg Kornowskiej, 1983)

**Fig. 5.** Damasławek salt dome: **A** — Geological map of salt surface at depth 400 m below terrain surface; **B** — cross-section I–I' (after Kornowska, 1983)

Nad zwierciadłem występuje gipsowo-ilasta czapa o skomplikowanej budowie geologicznej i zmiennej miąższości (Krzywiac, 2000). Strukturę pokrywają utwory kenozoiczne, a otaczają górnokredowe piaskowce i piaski. Według aktualnego rozpoznania w kat. C<sub>2</sub> (Kornowska, 1983) w

wysadzie występują dużej miąższości kompleksy soli kamiennej cyklotemu PZ2, reprezentowane przez sól kamienną gruboziarnistą, zawierającą soczewki soli potasowo-magnezowych i anhydrytu. Środkowa część wysadu solnego wydaje się najbardziej odpowiednia do budowy

**Tab. 1. Rozpoznanie wysadów solnych wytypowanych do budowy SOP**

Table 1. Recognition of salt domes selected for radioactive waste storage

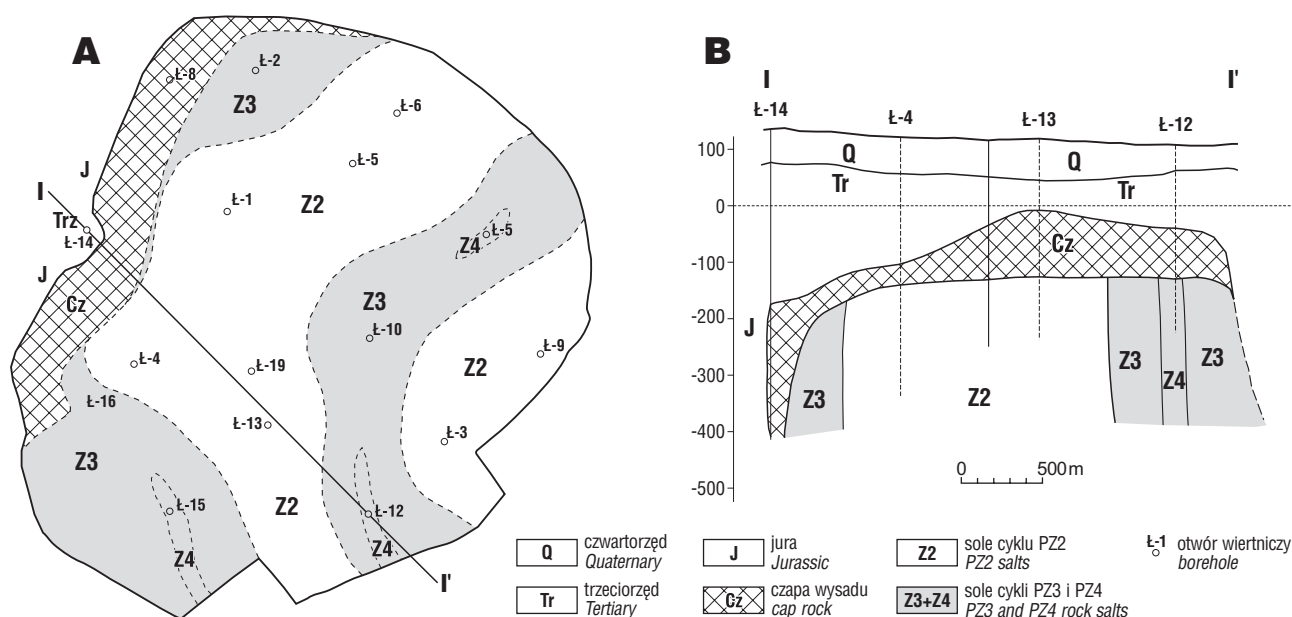
	Wysad Salt dome			
	Damasławek	Łanięta	Kłodawa	
			cz. środkowa central part	cz. południowa south part
Powierzchnia wysadu [km <sup>2</sup> ] Salt dome surface [km <sup>2</sup> ]	13	8,5	16	6
Wewnętrzna budowa geologiczna wysadu Internal geological structure	skomplikowana, słabo rozpoznana <i>complicated, poorly recognized</i>	skomplikowana, słabo rozpoznana <i>complicated, poorly recognized</i>	skomplikowana rozpoznana <i>complicated recognized</i>	skomplikowana słabo rozpoznana <i>complicated poorly recognized</i>
Głębokość zalegania zwierciadła solnego (uśredniona) [m p.p.t.] Salt surface depth (average) [m b.g.l.]	470	250	230	300
Rodzaj czapy solnej Cap rock	iłowo-gipsowa <i>clay-gypsum</i>	ilasto-anhydrytowo-gipsowa <i>clay-anhydrite-gypsum</i>	gipsowo-iłowa <i>gypsum-clay</i>	gipsowo-iłowa <i>gypsum-clay</i>
Miąższość czapy solnej (uśredniona) [m] Cap rock thickness (average) [m]	200	100	120	125
Utwory nadkładu Overlying rocks	neogeńskie i paleogeńskie <i>Neogene and Paleogene</i>	neogeńskie i paleogeńskie <i>Neogene and Paleogene</i>	jurajskie (lokalnie), neogeńskie i paleogeńskie <i>Jurassic (locally), Neogene and Paleogene</i>	jurajskie (lokalnie), neogeńskie i paleogeńskie <i>Jurassic (locally), Neogene and Paleogene</i>
Utwory otaczające Surrounding rocks	górnokredowe <i>upper Cretaceous</i>	jurajskie <i>Jurassic</i>	triasowe (kajper), jurajskie <i>Triassic (Keuper), Jurassic</i>	triasowe (kajper), jurajskie <i>Triassic (Keuper), Jurassic</i>
Liczba wykonanych profili sejsmicznych Seismic profiles	11	20	5	4
Liczba odwiertów Boreholes	14	15	39	10
Liczba głębokich odwiertów geologicznych Deep geological boreholes	0	1	14	2
Zewnętrzne zagrożenie hydrogeologiczne Hydrogeological hazard (external)	kilka serii zawodnionych o miąższości ok. 400 m <i>several water bearing layers — thickness about 400 m</i>	3 piętra wodonośne <i>3 aquifers</i>	zawodnione utwory jury (lokalnie) i kenozoiku <i>Jurassic (locally) and Cainozoic water bearing formations</i>	nierozpoznane <i>not recognized</i>
Zagrożenie gazowo-wyrzutowe Gas hazard	nierozpoznane <i>not recognized</i>	nierozpoznane <i>not recognized</i>	rozpoznane <i>recognized</i>	nierozpoznane <i>not recognized</i>
Zagrożenie wodne Water hazard	nierozpoznane <i>not recognized</i>	nierozpoznane <i>not recognized</i>	rozpoznane <i>recognized</i>	nierozpoznane <i>not recognized</i>
Środowisko skalne rejonu składowiska Host rock of storage location	sól kam. PZ2 <i>rock salt PZ2</i>	sól kam. PZ2 i PZ3 zubry PZ3 <i>rock salt PZ2 and PZ3 zubers PZ3</i>	—	zubry PZ3 i PZ4 <i>zubers PZ3 and PZ4</i>
Głębokość poziomów składowiska odpadów średnio- i niskoaktywnych [m p.p.t.] Depth of low and intermediate radioactive waste storage levels [m b.g.l.]	800	600	—	600
Głębokość poziomów składowiska SNF i HLW [m p.p.t.] Depth of HLW and SNF storage levels [m b.g.l.]	900	700	—	700

składowiska, gdyż w części tej starsza sól kamienna (Na<sub>2</sub>) tworzy grubą i jednorodną strukturę. Czapa gipsowa przykrywająca tę strukturę jest mało zawodniona, a jej miąższość sięga 150 m. Rozpoznanie skomplikowanej budowy geologicznej wysadu zostało uszczegółowione na podstawie wyników badań geofizycznych, które przeprowadzono w latach 1997–1998 (Garlicki, 1998). Obecnie są rozważane dwie możliwe lokalizacje SOP w tym wysadzie — obie usytuowane z dala od nieciągłości występujących w obrębie czapy.

**Wysad Łanięta** (ryc. 6, tab. 1) został rozpoznany w kat. C<sub>1</sub> (Parecka, 1980), w stopniu umożliwiającym projektowanie budowy kopalni podziemnej. Jest to struktura o stromo zapadających ścianach, w przekroju poprzecznym ma kształt elipsy o osiach długości 3,7 i 3,3 km. Głębokość nawierconego zwierciadła soli wynosi 235–282 m p.p.t. Ilasto-anhydrytowa i anhydrytowo-gipsowa czapa wysadu zalega na głębokości od 90 m do 308 m p.p.t. Obniżenie powierzchni czapy występuje w strefie o szerokości kilkuset metrów i jest wypełnione utworami kenozoicznymi. Prawdopodobnie powstało ono na skutek erozji podczas paleogenu. Część czapy jest spękana i zawodniona, a system cyrkulacji wód w jej obrębie jest skomplikowany. Wskaźniki hydrochemiczne świadczą o kontakcie wód powierzchniowych z wodami kenozoicznymi oraz z solankami występującymi w czapie. W szczytowych partiach wysadu rozpoznano sole cyklotemów PZ2 i PZ3, natomiast w południowej i północno-wschodniej części struktury — cyklotemu PZ4 (Parecka, 1980). Sole cyklotemu PZ2 są reprezentowane przez sole kamienne, białe i szare, ze smugami anhydrytowo-ilastymi, średnio- i gruboziarniste oraz tzw. warstwy przejściowe i starszą sól potasową (K2p). Sole cyklotemu PZ3 to głównie sól kamienna szaroróżowa i zuber brunatny (Na<sub>3</sub>t), a sole zaliczane do cyklotemu PZ4 są reprezentowane przez sól miodową oraz zuber grubokrystaliczny, przeławicony solą ilastą (Na<sub>4</sub>t). Na podstawie danych z wierceń należy przyjąć, że SOP może być

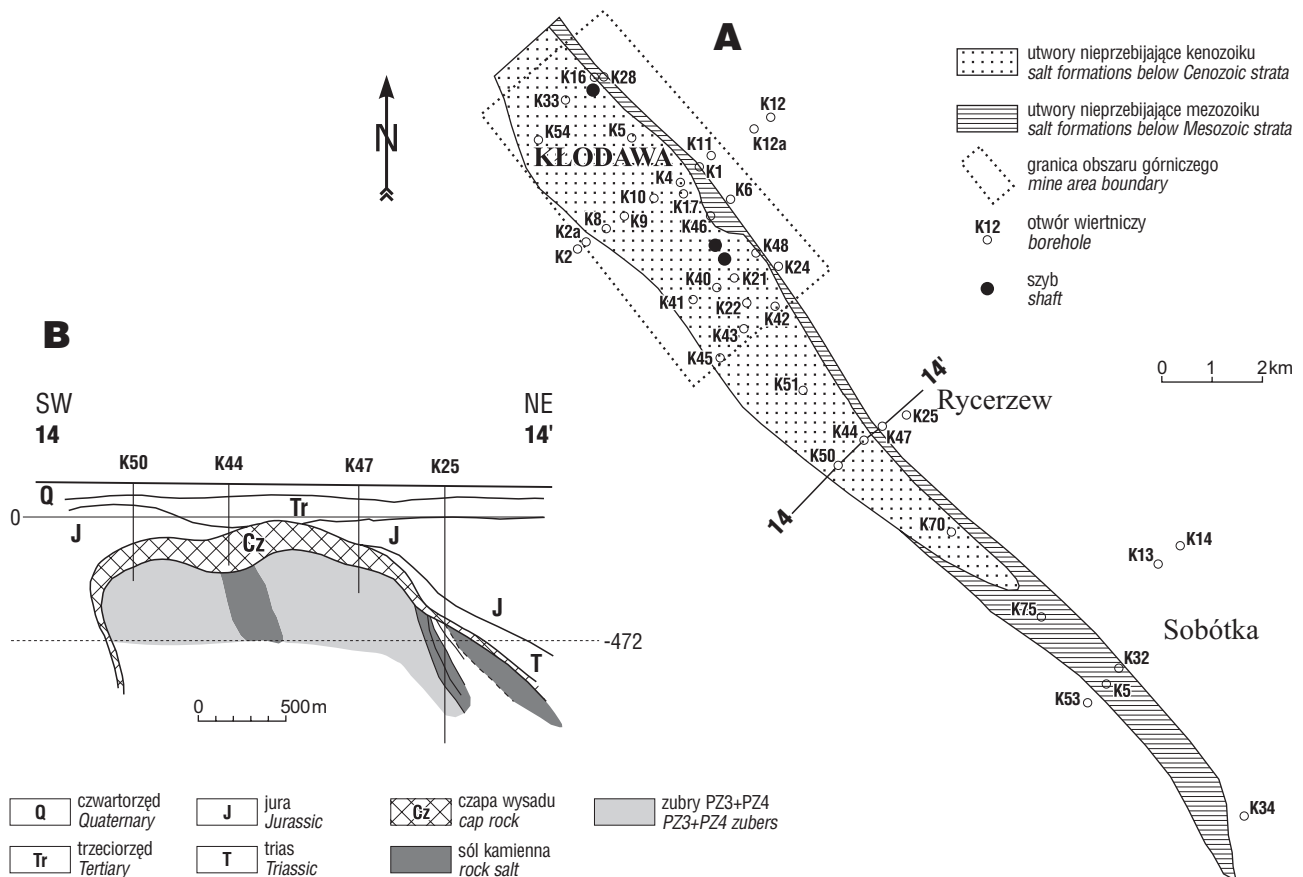
zlokalizowane w obrębie soli cyklotemu PZ2 i w kompleksie skał solnych cyklotemów PZ3 i PZ4.

**Wysad Kłodawa** (ryc. 7, tab. 1) stanowi część struktury solnej długości 63 km, pośrodku której jest zlokalizowana czynna kopalnia soli, o zasobach udokumentowanych w kat. A + B + C. Wysad jest wyraźnie odgraniczony od otaczających formacji skalnych; od strony SW otaczają go warstwy jurajskie, a od strony NE — utwory triasu i jury. Czapa iłowo-gipsowa o miąższości do 170 m przechodzi wzdłuż bocznych ścian w płaszcz iłowo-gipsowo-anhydrytowy. Zróżnicowane morfologicznie zwierciadło solne zalega na głębokości 100–300 m. Serię solną tworzą utwory wszystkich cyklotemów. Głównymi elementami tektonicznymi wysadu są: antykliny brzeżne — północno-wschodnia i południowo-zachodnia — oraz głęboka synklina w części środkowej. Lokalizacja SOP jest przewidywana w południowej części wysadu, w rejonie przekroju 14–14' (ryc. 7), poza 1,5-kilometrowym filarem ochronnym od strony kopalni. Budowa geologiczna tej części wysadu była rozpoznawana w trakcie badań prowadzonych w strukturze solnej do roku 1960 (Werner i in., 1960). Niestety, nie były to badania szczegółowe, niemniej można oczekiwać, iż w południowej części wysadu kontynuują się główne elementy tektoniczne rozpoznane lepiej w części środkowej (Werner, 1972; Tarka, 1992; Burliga i in., 1995; Burliga, 2003; Krzywiec, 2004). Południowa część wysadu (ryc. 7) ma formę grzbietu solnego, a w przekroju poziomym kształt wydłużonej elipsy. W obszarze wytypowanym do lokalizacji SOP, znajdującym się na głębokości 200–300 m p.p.t., zwierciadło solne jest przykryte iłowo-gipsową czapą, nad którą zalegają jurajskie i kenozoiczne utwory wodonośne. Zakłada się, że SOP może być zlokalizowane w kompleksie zubrów cyklotemów PZ3 i PZ4. Warunki hydrogeologiczne w środkowej części wysadu są rozpoznane — podobnych można oczekiwać w części południowej. Należy także przyjąć, że zagrożenia naturalne będą takie same jak w kopalni soli w Kłodawie.



**Ryc. 6.** Wysad solny Łanięta: **A** — mapa geologiczna zwierciadła solnego; **B** — przekrój geologiczny I-I' (wg Pareckiej, 1980)  
**Fig. 6.** Łanięta salt dome: **A** — geological map of salt mirror; **B** — geological cross-section I-I' (after Parecka, 1980)





**Ryc. 7.** Wysad solny Kłodawa: **A** — mapa geologiczna środkowej i południowej części wysadu; **B** — przekrój geologiczny południowej części wysadu (wg Ślizowskiego, 1998)  
**Fig. 7.** Kłodawa salt dome: **A** — geological map of salt surface in the central and southern parts of dome; **B** — geological section through southern part of dome (after Ślizowski, 1998)

### Podsumowanie

Decyzja o składowaniu w głębokich formacjach skalnych wypalonego paliwa jądrowego, odpadów wysokoaktywnych i długożyciowych nie może być podjęta arbitralnie. Dobór struktury skalnej, wytypowanie odpowiedniej lokalizacji, opracowanie koncepcji składowiska i jego ostatecznego projektu muszą być poprzedzone wieloletnimi badaniami, obejmującymi prace teoretyczne oraz eksperymenty laboratoryjne i *in situ*, przy czym każda z lokalizacji musi być rozpatrywana indywidualnie. W krajach wykorzystujących energię jądrową badania tego typu są prowadzone od lat 60. XX w., jednak ze względu na brak dostatecznego rozpoznania ewentualnych zagrożeń i negatywną opinię społeczności, dotychczas nigdzie nie zbudowano docelowego, głębokiego składowiska SNF i HLW. Przyjmując założenie, że każdy kraj, który wytworzył odpady promieniotwórcze, ma je składować na własnym terytorium, badania nad oceną przydatności poszczególnych struktur skalnych do składowania niebezpiecznych odpadów promieniotwórczych powinny być kontynuowane bez względu na strategiczne decyzje odnośnie do rozwoju energetyki jądrowej.

Zgromadzone w polskich archiwach dokumentacje geologiczne, w tym wyniki badań geofizycznych, dane z kopalni podziemnych i otworowych, a także uzyskane z odwiertów poszukiwawczych, pozwoliły na wstępne wytypowanie do budowy skojarzonego składowiska wypalonego paliwa jądrowego i odpadów promieniotwórczych

wysoko-, średnio- i niskoaktywnych trzech lokalizacji w wysadach solnych okręgu środkowopolskiego oraz jednej lokalizacji w utworach ilastych kajpru na monoklinie przedsudeckiej. Wytypowane struktury skalne spełniają wymagania określone dla składowania odpadów promieniotwórczych.

W polityce energetycznej Polski do 2030 r., opracowanej w projekcie Ministerstwa Gospodarki w marcu 2009 r., w rozdz. 4.1 przewidziano między innymi przygotowanie projektu recyklingu wypalonego paliwa jądrowego i składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych. Wdrożenie tego rozwiązania wyeliminuje składowanie ostateczne SNF, wymagające wielkogabarytowych pojemników i dostosowanych do nich wyrobisk. Ostateczne ustalenie wyboru lokalizacji składowiska wymaga więc poczynienia następujących kroków:

- ustalenia rodzaju składowanych odpadów promieniotwórczych i dostosowania do nich modelu składowiska;
- przeprowadzenia uściślających prac rozpoznawczych — geologicznych i hydrogeologicznych;
- przeprowadzenia badań laboratoryjnych i *in situ* właściwości mineralogicznych, fizycznych i mechanicznych wybranego środowiska skalnego.

Pozwoli to na opracowanie modeli matematycznych, geologicznych, hydrogeologicznych, geomechanicznych i geotechnicznych, wraz z ich weryfikacją, mającą na celu ocenę ryzyka wieloletniego składowania odpadów promieniotwórczych.

## Literatura

- BURLIGA S. 2003 — Zróżnicowanie struktury wysadu solnego Kłodawy w świetle mezostrukturalnej analizy odkształcenia skał. *Tech. Poszuk. Geol.*, 42: 11–17.
- BURLIGA S., KOLONKO P., MISIEK G. & CZAPOWSKI G. 1995 — Kłodawa Salt Mine. Upper Permian (Zechstein) profile from basin center, salt tectonics, mineral transformations, salt mining problems. 13 Intern. Cong. Carboniferous-Permian Guide to Ex. A3. Państw. Inst. Geol.: 45–54.
- CZAPOWSKI G., DĘBSKI J., KASPRZYK A., KIEŻEL W., LANGIER-KUŹNIAROWA A. & PERYT T.M. 1992 — Monografia anhydrytu i soli kamiennej na monoklinie przedsudeckiej (rejon LGOM). CAG Państw. Inst. Geol., nr 20/93.
- DADLEZ R. (red.) 1998 — Mapa tektoniczna kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego na Niżu Polskim, 1 : 500 000. Państw. Inst. Geol.
- DYER J.R. & VOEGELE M.D. 2001 — The Yucca Mountain Site Characterization Project for the United States. [In:] *Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review University of California, Berkeley, LBNL-49767*: 299.
- GARLICKI A. 1998 — Uzupełniające rozpoznanie wysadu solnego Damasławek. *Arch. WGGOS AGH*.
- IAEA 1994 — Classification of Radioactive Waste. Safety Series, 111-G-1-1.
- IAEA 2003 — Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes. Technical Reports Series, 413.
- IAEA 2005 — Country Nuclear Fuel Cycle Profiles. Technical Report Series, 425.
- IAEA 2006 — Geological disposal of radioactive waste. Safety Standards No WS-R-4.
- IAEA 2007 — Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization. TECDOC-1537.
- KORNOWSKA I. 1983 — Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wydzielonej „Damasławek”, kategoria rozpoznania C2. 1-94. CAG Państw. Inst. Geol., nr 13333.
- KRZYWIEC P. (red.) 2000 — Geofizyczno-geologiczne badania stropu i nadkładu wysadu solnego Damasławek. *Prz. Geol.*, 48: 1005–1014.
- KRZYWIEC P. 2004 — Triassic evolution of the Kłodawa salt structure: basement-controlled salt tectonics within the Mid-Polish Trough (central Poland). *Geol. Quart.*, 48: 123–134.
- LANKOF L. 2008 — Analiza odkształcalności i utraty masy zębów brunatnych w zależności od składu mineralnego w aspekcie składowania odpadów promieniotwórczych w środkowopolskich wydzielonych. *Arch. Wydz. Nauk o Ziemi UŚI*.
- McCOMBIE C. & CHAPMAN N. 2006 — Progress with Multinational Repository Concepts. [In:] *Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation, Fourth Worldwide Review University of California Berkeley, California, USA*: 267–274.
- PAGACZEWSKI J. 1972 — Catalogue of Earthquakes in Poland in 1000–1970 years. *Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc.*, 51: 3–36.
- PARECKA K. 1980 — Dokumentacja geologiczna w kat. C1 złoża soli kamiennej w wydzielonej „Łanięta”. *Kombinat Geol.-Pól. CAG Państw. Inst. Geol.*, nr 13772.
- PERYT T., CZAPOWSKI G. & GAŚIEWICZ A. 1992 — Facje i paleogeografia cechsztynu zachodniej części syneklizy perybałtyckiej. *Prz. Geol.*, 40: 223–233.
- POBORSKI J. 1976 — Nowsza mapa stosunków litofacjalnych w zagłębiu cechsztyńskim w Polsce. *Prz. Geol.*, 24: 255–257.
- REMPE N.T. 2007 — Permanent Underground Repositories for Radioactive Waste. *Progress in Nuclear Energy*, 4: 365–374.
- ŚLIZOWSKI K. 1983 — Warunki geologiczno-górniczne w cechsztyńskich złożach soli w Polsce dla wykonywania podziemnych zbiorników cieczy i gazu. *Zesz. Nauk. AGH, Górnictwo*, 121.
- ŚLIZOWSKI K. (red.) 1998 — Analiza materiałów archiwalnych dotyczących struktur skalnych na Niżu Polskim pod kątem przydatności do lokalizacji głębokiego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (SOP), *Arch. IGSMiE PAN*.
- ŚLIZOWSKI K. & SAŁUGA P. 1996 — Surowce Mineralne Polski — Surowce Chemiczne — Sól Kamienna. CPPGSMiE PAN.
- ŚLIZOWSKI K., KÖHSLING J. & LANKOF L. 2004 — Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. *Studia, Rozprawy, Monografie IGSMiE PAN*, 129.
- ŚLIZOWSKI K., BZOWSKA G., DUDAŁA J., GLIEWICZ-WOLTER J., JANECZEK J., KASPRZYK W., LANKOF L., ŁUKASZEWSKI P., OCHOJSKI A., PAWLIKOWSKI M., PINIŃSKA J., PRZEWŁOCKI K. & ŚLIZOWSKI J. 2005 — Badania laboratoryjne zębów (iłowców solnych) dla oceny możliwości składowania odpadów promieniotwórczych w polskich wydzielonych solnych. *Wyd. IGSMiE PAN*.
- TARKA R. 1992 — Tectonics of some salt deposits in Poland based on mesostructural analysis. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 137: 1–43.
- WERNER Z. 1972 — Dokumentacja geologiczna zasobów złoża soli kamiennej Kopalni Soli „Kłodawa” w Kłodawie, woj. konińskie. CAG Państw. Inst. Geol., nr 3928/542.
- WERNER Z., POBORSKI J., ORSKA J. & BAKOWSKI J. 1960 — Złoże solne w Kłodawie w zarysie geologiczno-górnicznym. *Pr. Inst. Geol.*, 30: 467–512.

Praca wpłynęła do redakcji 29.06.2009 r.  
Po recenzji akceptowano do druku 23.07.2009 r.