



Sposoby użytkowania górotworu na świecie i w Polsce

Andrzej Przybycin¹, Barbara Uliasz-Misiak², Ludwik Zawisza²

A. Przybycin

B. Uliasz-Misiak

L. Zawisza

Underground space use: world wide and in Poland. Prz. Geol., 59: 417–425.

Abstract. Underground space is used in a number of ways, e.g. for transport infrastructure, public utility objects, for waste disposal and storing of various substances and fuels. Underground space is used for activities or facilities which cannot be realized on surface because they would be too difficult to perform or environmentally hazardous or expensive. Offices, stores, warehouses, cultural and recreation objects as well as city or inter-city subways are located very shallow under the surface. At greater depth storages, tunnels and car parkings could be located. At ca. 250–3000 m of depth underground space is employed for storing natural gas, energy, fuels,

carbon dioxide and radioactive waste. Underground disposal sites and storages are made in abandoned workings and pore space. The shallow part of underground space has been utilized only to a small degree in Poland. Deeper zones are used for non-tank natural gas storages in rock mass, in that in abandoned workings, underground oil, fuel and waste storages, in rock mass and in abandoned workings. At present four underground waste disposal sites are operational in Poland; there are eight underground gas storages: five in closed mine and one in a salt dome. Storing in pore space has best perspectives in Poland.

Keywords: underground space, underground storage, underground gas storage, non-tank storage, non-tank disposal of waste into rock-mass, underground storage gas facilities, Poland

Pod pojęciem *górotwór* rozumie się przestrzeń poniżej poziomu terenu (Ronka i in., 1998) lub twory skalne, w których prowadzone są roboty górnicze. Zasadniczym sposobem wykorzystania górotworu jest eksploatacja kopalni. Oprócz tego górotwór jest wykorzystywany na wiele sposobów – od instalowania w nim infrastruktury transportowej, obiektów użyteczności publicznej i użytkowych, przez składowanie odpadów po magazynowanie substancji i paliw (ryc. 1). Przestrzeń pod powierzchnią ziemi umożliwia lokowanie różnej działalności lub infrastruktury, której umieszczenie na powierzchni jest trudne, niemożliwe, szkodliwe dla środowiska lub drogie. Dodatkowo górotwór zapewnia naturalną ochronę mechaniczną, termiczną i akustyczną wszystkiego, co jest w nim zlokalizowane. Wykorzystanie górotworu przyczynia się do zrównoważonego rozwoju, poprawy stanu środowiska i jakości życia oraz oszczędności energii. Na obszarach zurbanizowanych infrastrukturalne obiekty podziemne przyczyniają się do ograniczenia wzrostu miast. Mogą one zapewnić mieszkańcom podstawowe warunki socjalne i sanitarne (dostarczanie wody pitnej, energii, odprowadzanie ścieków, transport) bez zabierania terenu na powierzchni. Infrastruktura podziemna jest tworzona pod terenami zabudowanymi przy minimalnym uszkodzeniu środowiska na powierzchni. Jedną z zalet składowania przedmiotów lub produktów w strukturach podziemnych jest ich ochrona przed oddziaływaniem środowiska zewnętrznego. Cechą obiektów podziemnych, wpływającą na bezpieczeństwo ich użytkowania, jest fakt, że punkty dostępu do tych obiektów są niewielkie i łatwo je zabezpieczyć.

Ludzie od najdawniejszych czasów wykorzystywali przestrzeń pod powierzchnią ziemi. Początkowo były to

naturalne jaskinie służące jako miejsce schronienia, w czasach historycznych górotwór wykorzystywano do celów górniczych i obronnych. Dzięki rozwojowi technik górniczych w XIX, a szczególnie w XX w. nastąpił szybki wzrost wykorzystania górotworu do różnych celów transportu drogowego, kolejowego, magazynowania i składowania substancji. Rozszerzono sposoby wykorzystania górotworu o magazynowanie cieczy i gazów w przestrzeni porowej skał osadowych nie tylko w wyrobiskach górniczych. Część podziemnych budowli to bunkry mające na celu ochronę ludzi, systemów komputerowych i danych oraz takich obiektów, jak: dokumenty, filmy, fotografie. Nadal zwiększa się liczba konstrukcji podziemnych zaprojektowanych i wykorzystywanych do bardzo różnych celów. Głębsze partie górotworu są wykorzystywane do składowania i magazynowania różnych substancji i odpadów. Składowanie i magazynowanie są różnymi pojęciami. Magazynowanie zakłada, że materiał może być ponownie wydobyty, podczas gdy składowanie ma na celu odizolowanie danej substancji na długi czas – w przypadku odpadów nuklearnych i dwutlenku węgla nawet na dziesiątki tysięcy lat (Evans i in., 2009).

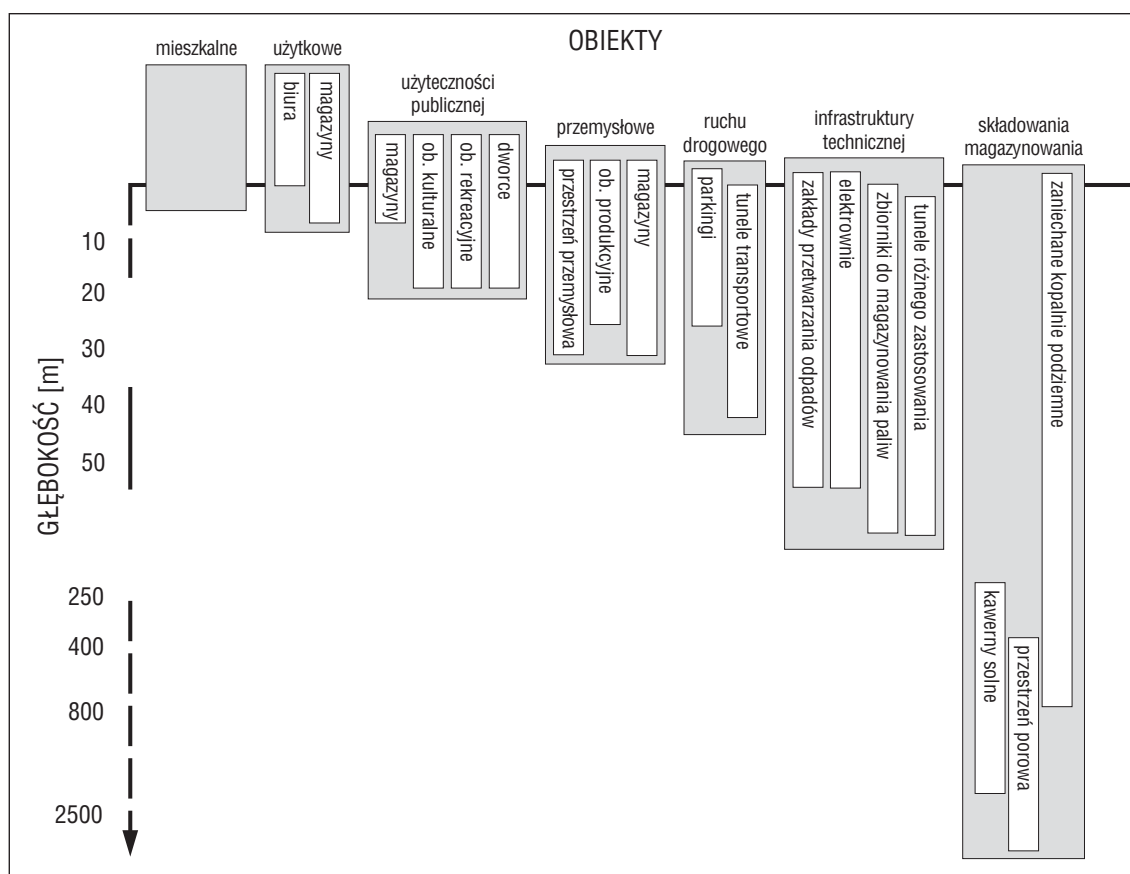
Celem artykułu jest przedstawienie różnych sposobów wykorzystania górotworu na świecie i w Polsce wraz z krótką charakterystyką istniejących obiektów.

Sposoby i przykłady wykorzystania górotworu na świecie

Wykorzystanie przestrzeni pod ziemią w wielu przypadkach wynika z braku miejsca na jej powierzchni. Niekiedy obiekty lokowane są pod ziemią z powodu np. braku

¹Ministerstwo Środowiska, ul. Wawelska 52/54, 00-922 Warszawa; andrzej.przybycin@mos.gov.pl.

²Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.



Ryc. 1. Sposoby wykorzystania górotworu w zależności od głębokości (wg Evansa i in., 2009, zmienione)

zgody na ich budowę na powierzchni albo chęci ochrony budowli zabytkowych. Pewne rodzaje instalacji umieszcza się pod ziemią ze względu na to, że jest to dla nich najlepsza lokalizacja lub kiedy jest to konieczne (bo ulokowanie na powierzchni ziemi np. składowiska niektórych typów odpadów lub parkingu jest niepożądane). Podziemne przejścia lub tunele przyczyniają się do zwiększenia bezpieczeństwa lub płynności ruchu. Lokowanie w górotworze obiektów usługowych lub użyteczności publicznej w miejscach, gdzie budowa na powierzchni jest niemożliwa ze względu na wcześniejszą zabudowę, może przyczynić się do podniesienia komfortu życia lokalnej społeczności.

Umieszczenie w górotworze obiektów i urządzeń pozwala na ich izolację od wpływu czynników atmosferycznych (zmiany temperatury, wilgotności), naturalnych katastrof i trzęsień ziemi. Górotwór pozwala na izolację od sezonowych zmian temperatury, ponieważ temperatura gruntu i skał jest od głębokości około 1–1,5 m do kilkunastu metrów stała i niezależna od temperatury panującej na powierzchni ziemi. Podziemne struktury są naturalnie chronione przed takimi zjawiskami pogodowymi, jak: huragany, tornada, burze czy powodzie, są również bardziej odporne na trzęsienia ziemi. Infrastruktura podziemna w trakcie trzęsień ziemi jest z reguły mniej zniszczona niż obiekty zlokalizowane na jej powierzchni. Konserwacja żywności w obiektach podziemnych jest łatwiejsza dzięki umiarkowanej i stałej temperaturze panującej w górotworze i możliwości uzyskania izolowanego środowiska. Górotwór pozwala również na izolację od hałasu, ponieważ efektywnie tłumi hałas i drgania pochodzące z powierzchni. Lokowane pod powierzchnią ziemi obiekty

są również chronione przed promieniowaniem i opadem promieniotwórczym.

Górotwór nie tylko izoluje obiekty czy infrastrukturę od wpływów pochodzących z powierzchni ziemi – w niektórych przypadkach odgrywa odwrotną rolę. Chroni powierzchnię ziemi przed niebezpiecznymi procesami lub składowanymi materiałami. Przykładem może być składowanie odpadów radioaktywnych lub niebezpiecznych albo lokowanie uciążliwych zakładów przemysłowych.

W projektowaniu obiektów o małym oddziaływaniu na środowisko bierze się pod uwagę względy estetyczne i ekologiczne. Lokowanie częściowo lub w całości pod ziemią obiektów nieatrakcyjnych wizualnie lub infrastruktury przemysłowej w pobliżu dzielnic mieszkaniowych przyczynia się do ochrony naturalnego krajobrazu. W niektórych przypadkach wykorzystanie górotworu pozwala zachować naturalną szatę roślinną, siedliska i przejścia zwierząt oraz zmniejszyć uszkodzenia w lokalnym i globalnym cyklu ekologicznym w większym zakresie niż w przypadku budowy powierzchniowej.

Na terenach pagórkowatych lub górzystych tunele poprawiają albo czasem wręcz umożliwiają transport drogowy czy kolejowy. Wprowadzenie pociągów do tuneli pozwala na uwolnienie naziemnych tras komunikacyjnych od transportu samochodowego. Przykładem jest Szwajcaria, gdzie główne arterie komunikacyjne wiodące przez Alpy to szlaki kolejowe z budowanymi obecnie tunelami (Grodecki, 2010).

Przestrzeń pod ziemią na terenie miast gra ważną rolę, jej zagospodarowanie może pozwolić na dalszy zrównoważony rozwój, np. poprzez obniżenie zanieczyszczenia powietrza, zmniejszenie hałasu czy lepsze wykorzystanie

przestrzeni. Tunele zlokalizowane pod ziemią stanowią bezpieczne, ekologiczne i szybkie miejskie systemy transportu mediów. Miejskie tunele drogowe eliminują pojazdy z ulic, przez co przyczyniają się do zmniejszenia hałasu ulicznego i zanieczyszczenia powietrza; część ulic może być wykorzystana do innych celów, np. jako ciągi piesze. Podziemne parkingi i centra handlowe zwalniają tereny na powierzchni ziemi i tworzą miejsce np. dla zabudowy mieszkaniowej, placów zabaw czy terenów rekreacyjnych.

W zależności od celu górotwór wykorzystuje się na różnych głębokościach. Najpłycej – do około 10 m – lokuje się biura i magazyny; w strefie do 20 metrów oprócz magazynów można lokować obiekty kulturalne, rekreacyjne i stacje metra, kolejowe; do 30 m prowadzona jest działalność przemysłowa i magazynowa; głębiej (do 40 m) wykonywane są tunele i parkingi; na głębokości powyżej 40 m mogą być lokowane elektrownie, zakłady przetwarzające odpady, zbiorniki paliwa i tunele. Na głębokościach rzędu 250–3000 m prowadzone jest magazynowanie np. gazu ziemnego, energii, składowanie dwutlenku węgla, odpadów radioaktywnych (ryc. 1). Podstawowe sposoby wykorzystania górotworu zostały przedstawione poniżej.

Wykorzystanie stref pod powierzchnią ziemi. Rozwój miast powoduje, że budowa na ich terenie infrastruktury powierzchniowej jest coraz droższa i bardziej skomplikowana. Dlatego zwiększa się liczba obiektów budowlanych pod powierzchnią ziemi, przeznaczonych do różnych celów. Budowane są podziemne magazyny, infrastruktura transportowa, parkingi, biura, hotele, zakłady przemysłowe, sklepy, muzea, biblioteki, domy mieszkalne, więzienia, obiekty obronne, obiekty sztuki i rozrywki. W Stanach Zjednoczonych istnieje ponad 500 budynków publicznych i komercyjnych oraz ponad 5000 prywatnych domów mieszkalnych, które są całkowicie lub częściowo zlokalizowane pod ziemią (<http://www.subsurfacebuildings.com/USAUndergroundBuildings.html>). Niektóre miasta, jak np. Minneapolis, w swoim planie rozwoju uwzględniają zagospodarowanie górotworu. Szereg miast lokuje pod ziemią infrastrukturę transportową, ponieważ umożliwia to rozdzielenie poszczególnych rodzajów transportu czy tras komunikacyjnych lub ułatwienie połączeń między nimi. Przykładem może być rozproszony ruch pieszego wokół większych stacji kolejowych, stanowiących punkt przesiadkowy do miejskich środków lokomocji – metra, tramwaju, autobusu. Na świecie istnieją podziemne miasta – przykładem może być śródmieście Montrealu, gdzie stacje metra, hotele, banki, biurowce, teatry, kina, restauracje i sklepy łączą tunele o długości ponad 30 km. Jednym z najbardziej znanych obiektów umiejscowionych pod powierzchnią terenu jest *Olympic Hall* zbudowany w 1994 r. w związku z igrzyskami olimpijskimi odbywającymi się w Lillehammer w Norwegii (Evans i in., 2009; Grodecki, 2010).

Pod powierzchnią terenu lokowane są również archiwa dokumentów, zarówno papierowych, jak i elektronicznych, parkingi, różnego rodzaju magazyny. Niewielkie podziemne magazyny służą do przechowywania win, ziemniaków i zboża. Duże magazyny mogą być lokowane w starych wyrobiskach górniczych. Sezonowe magazynowanie produktów rolniczych jest obecnie uważane za główny kierunek rozwoju wykorzystania płytkiego górotworu, ze względu na duże powierzchnie magazynowe i niskie koszty. Mrożoną żywność przechowuje się pod ziemią w Skandynawii i USA (Kansas), co jest mniej kosztowne niż

przechowywanie jej na powierzchni z powodu niższych wydatków energetycznych, jakie musi się ponieść na tę działalność (Evans i in., 2009).

Podziemne składowiska odpadów. Składowiska są najstarszą i najbardziej rozpowszechnioną formą pozbywania się odpadów na całym świecie. Mogą być one związane z innymi formami zarządzania odpadami, takimi jak: czasowe magazynowanie, konsolidacja, transfer i przetwarzanie odpadów.

W procesie unieszkodliwiania odpadów istotną rolę odgrywają podziemne składowiska, które w porównaniu ze składowiskami powierzchniowymi posiadają szereg zalet. Składowanie podziemne przyczynia się do zmniejszenia stopnia zagrożenia wód powierzchniowych i podziemnych, a teren na powierzchni ziemi może być zaoszczędzony dla innych celów gospodarczych lub przyrodniczych. Zagwarantowane jest bezpieczeństwo i kontrola składowania odpadów oraz izolacja przed działaniem zjawisk atmosferycznych oraz promieniowania słonecznego. Stałe warunki temperaturowe i wilgotnościowe pozwalają na przechowywanie odpadów w niezmiennym stanie przez bardzo długi okres.

Pod ziemią składowane są odpady niebezpieczne, które wymagają trwałej izolacji od biosfery. Utworami geologicznymi spełniającymi warunki do lokowania odpadów są: złoża soli kamiennej (wysadowe i pokładowe), skały magmowe (granit, bazalt, tuf), kompleksy niektórych skał osadowych (skały ilaste, anhydryty, niektóre wapienie). Składowanie można prowadzić w wyrobiskach konwencjonalnych kopalń podziemnych, w kawernach solnych i w specjalnie wykonanych głębokich podziemnych składowiskach geologicznych. Obecnie tylko w kilku kopalniach na świecie prowadzone jest składowanie odpadów niebezpiecznych, w większości wykorzystuje się do tych celów pojedyncze wyrobiska. Dotychczas na świecie nie funkcjonuje żadne głębokie składowisko wybudowane specjalnie do tych celów (Mazurkiewicz i in., 2000).

W Europie zlokalizowanych jest kilka składowisk odpadów niebezpiecznych (*Background paper on permanent storage in salt mines*, 2004). W Niemczech wieloodpadowe składowisko *Herfa Neurode* otwarto w 1972 r. w kopalni soli potasowej, kolejne zlokalizowane w Zielitz (Saksonia-Anhalt), Heilbronn (Badenia-Wirtembergia), Borth (Nadrenia Północna-Westfalia) mają koncesje na składowanie wybranych typów odpadów (jednoodpadowe). We Francji pierwsze podziemne składowisko odpadów otwarto w lutym 1999 r. w kopalni soli potasowej w Wittelsheim (pojemność 320 000 ton) (Bernados & Kaliampakos, 2003). W Wielkiej Brytanii w 2005 r. uruchomiono składowisko *Minosus* (pojemność 100 000 ton) zlokalizowane w kopalni soli w Cheshire, w którym składowane są odpady niebezpieczne (<http://veolia.com>). W Kanadzie od 1951 r. w kopalni *Giant Yellowknife* składowane są pyły arsenowe (Mazurkiewicz i in., 2000).

Składowanie w komorach solnych prowadzone jest w Kanadzie, gdzie w Saskatchewan składowane są odpady pochodzące z zakładów sodowych, a w Ontario – ciężkie węglowodory i odpady z przeróbki produktów naftowych. W Stanach Zjednoczonych odpady pochodzące z produkcji soli składowane są od 1971 r. w kopalni w Watkins Glen (Mazurkiewicz i in., 2000).

Osobny problem stanowią składowiska odpadów promieniotwórczych, które są lokowane na powierzchni ziemi lub w specjalnie przygotowanych składowiskach podziem-

nych. Najlepsze warunki do składowania odpadów promieniotwórczych spełniają złoża soli kamiennych (pokładowe i wydadowe), skały krystaliczne i metamorficzne oraz skały ilaste (Ślizowski, 2006; Ślizowski & Lankof, 2009). Większość krajów europejskich składa opady promieniotwórcze w składowiskach powierzchniowych. Podziemne składowanie odpadów nisko- i średnioaktywnych prowadzone było w Niemczech od 1967 r. w kopalni soli w Asse (Dolna Saksonia). Od 1978 r. składowisko służy wyłącznie jako podziemne laboratorium naukowo-badawcze, gdyż stwierdzono nieuszczelnienie składowanych beczek z uranem i plutonem. W Asse trwają obecnie prace mające na celu przeniesienie odpadów w inne miejsce. Od 1970 r. odpady promieniotwórcze są składowane w kopalniach soli w Bartensleben w pobliżu Morsleben w Saksonii-Anhalt, obecnie jest to jedyne głębokie eksploatowane składowisko na świecie dla odpadów nisko- i średnioaktywnych. W składowisku *VLJ* w Olkiluoto w Finlandii od 1992 r. składowane są odpady nisko- i średnioaktywne. Składowisko zlokalizowane jest w dwóch dużych komorach na głębokości 70–100 m. Obecnie czynne jest tylko jedno głębokie składowisko odpadów transuranych w pokładowych złożach soli kamiennej *Salado Formation* w Carlsbad w Stanach Zjednoczonych, gdzie od 1982 r. funkcjonuje podziemne laboratorium badawcze (Ślizowski & Lankof, 2009). W Onkalo w Finlandii (w skałach krystalicznych), Bure we Francji (w skałach ilastych) i Yucca Mountain w Stanach Zjednoczonych (w tufitach) trwają prace nad budową składowisk wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych (Rempe, 2007).

Magazynowanie w wyrobiskach górniczych. W wyniku prac górniczych powstają wyrobiska o różnej wielkości i kształcie w zróżnicowanych warunkach geologicznych. Rodzaj wytworzonej pustki i jej przydatność do magazynowania zależy od rodzaju skał, w których została ona wytworzona oraz od wykorzystanych metod górniczych. W większości przypadków pustki są niestabilne, szczególnie tam, gdzie stosowano stare metody górnicze. Stare kopalnie projektowano pod kątem maksymalizowania wydobywania, nie uwzględniano stabilności powstałych pustek (wyrobisk). Stosowane współcześnie metody wydobywcze zwykle pozostawiają 25–50% skał w formie filarów w celu zapewnienia stałego podparcia stropu. Kopalnie tego typu – zarówno pracujące, jak i zamknięte – mogą być wykorzystywane do magazynowania (Evans i in., 2009).

Skały solonośne ze względu na swój charakter stanowią odpowiednie środowisko do magazynowania. W kopalniach soli jest stała temperatura i niewielka wilgotność, dlatego mogą być w nich magazynowane np. uzbrojenie, dokumenty papierowe i elektroniczne oraz dzieła sztuki. W kopalni *Winsford* w Cheshire przechowuje się tajne dokumenty i cenne materiały (*Minosus hazardous waste project beats final legal challenge*, 2004; *Underground Storage. Mineral Planning Factsheet*, 2008). Sól jest nieprzepuszczalna i bardzo dobrze nadaje się do magazynowania gazu ziemnego, płynów (oleju i gazu płynnego, LPG) i substancji chemicznych. Podziemne magazyny ropy i paliw istnieją w Stanach Zjednoczonych, Niemczech, Francji, Kanadzie i Polsce (Kunstman i in., 2009). Magazynowanie gazu ziemnego prowadzone jest w Niemczech i Stanach Zjednoczonych w starych kopalniach soli i kawernach solnych oraz specjalnie zaprojektowanych i wykonywanych komorach (Siemek & Nagy, 2007; Evans i in., 2009). Ze względu na budowę geologiczną magazynowanie gazu w

złożach soli odgrywa większą rolę w Europie niż w Ameryce Północnej. Największą liczbę kawernowych magazynów gazu mają Niemcy – 22 magazyny w 172 kawernach o pojemności 7,6 mld Nm³ gazu. W Europie istnieje 8 magazynów kawernowych (127 kawern) – we Francji, Polsce, Wielkiej Brytanii, Danii i Portugalii – o łącznej pojemności roboczej 2,4 mld Nm³ gazu. W Stanach Zjednoczonych i Kanadzie istnieją 34 magazyny gazu ziemnego w kawernach solnych, mające łączną pojemność roboczą ok. 5 mld Nm³ gazu (Kunstman i in., 2009). Kawerny magazynowe są posadawiane na różnych głębokościach przeważnie do 1500 m, najgłębsze magazyny są zlokalizowane na głębokości około 2000 m – *Eminence* (Stany Zjednoczone), *Heide* (Niemcy) (Bérest & Brouard, 2003; Kunstman i in., 2009). Im głębiej posadowione są kawerny, tym szybszemu ulegają zaciskaniu (konwergencji), a otaczający górotwór – deformacji i przemieszczaniu, co może doprowadzić do rozszczelnienia magazynu (Kunstman i in., 2009).

W podziemnych kopalniach wapieni istniejących na terenie Wielkiej Brytanii zlokalizowane są magazyny różnych materiałów: klinkieru cementowego, amunicji, wina i dokumentów. W kopalni kredy magazynowany jest LPG.

Magazynowanie gazu ziemnego prowadzone jest w Stanach Zjednoczonych i Belgii w zaniechanych kopalniach węgla kamiennego. Kopalnie, które mogą być przekształcone w zbiorniki gazu, powinny być oddalone od pracujących kopalń, mieć dobre uszczelnienie i niewielkie zawodnienie albo jego brak (Kidybiński & Siemek, 2006; Siemek & Nagy, 2007).

Składowanie i magazynowanie w przestrzeni porowej. Oprócz pustych przestrzeni w górotworze wytworzonych pracami górniczymi w skałach istnieją naturalne pory, które mogą być wykorzystywane do składowania lub magazynowania różnych substancji lub być źródłem naturalnego ciepła lub wody. W przypadku składowania lub magazynowania substancji w górotworze najważniejszym problemem jest uniknięcie jej migracji poza obszar składowiska lub magazynu. Dlatego przy lokalizowaniu takich obiektów szczególną uwagę zwraca się na szczelność i stabilność skał nadkładu. Dobre uszczelnienie jest szczególnie ważne w przypadku składowania gazów, paliw i odpadów nuklearnych. Zagadnienia bezpieczeństwa są najważniejszymi problemami związanymi ze składowaniem w górotworze, regulacje prawne związane z tą problematyką główny nacisk kładą na odpowiednie zaprojektowanie, wykonanie i eksploatację składowiska oraz jego monitoring.

Skałami najlepiej nadającymi się do wykorzystania przestrzeni porowej są skały osadowe, zwłaszcza piaskowce posiadające komunikujące się z sobą pory i charakteryzujące się przepuszczalnością umożliwiającą płynom (wodzie, ropie lub gazowi) migrację i tworzenie naturalnych nagromadzeń. W przestrzeni porowej mogą być magazynowane: gaz ziemny, wodór, sprężone powietrze, a od końca XX w. rozważa się również składowanie w przestrzeni porowej dwutlenku węgla. Skały krystaliczne i osadowe bez porowatości międzyziarnowej są w większości nieprzepuszczalne. Mają one jednak systemy szczelin, które umożliwiają przemieszczanie i akumulację gazów i cieczy. W eksploatowanych lub wyeksploatowanych złożach ropy naftowej i gazu ziemnego przestrzeń porowa, która zawierała ropę lub gaz, jest coraz częściej wykorzystywana do magazynowania, głównie gazu ziemnego. Do magazynu-

nowania gazu ziemnego wykorzystywane są również poziomy wodonośne.

Po raz pierwszy magazynowanie gazu ziemnego przetestowano w 1915 r. na złożu gazu w Welland County w Ontario (Kanada). Pierwszy komercyjny magazyn gazu powstał w Stanach Zjednoczonych w 1916 r. (złoże gazu ziemnego *Zora Field*). W 2006 r. na świecie było zlokalizowanych około 610 instalacji magazynowania gazu, w Europie – 127. Większość magazynów zlokalizowana jest w wyeksploatowanych złożach (81,6%) i poziomach wodonośnych (14,5%), reszta – w kavernach solnych (3,9%) i wyeksploatowanych kopalniach (0,02%) (Wallbrecht, 2006).

Do podziemnego składowania CO₂ proponuje się: wyeksploatowane złoża ropy naftowej i gazu ziemnego, eksploatowane złoża ropy naftowej (zaawansowane metody wydobycia ropy), nieeksploatowane pokłady węgla (w połączeniu z wydobyciem metanu), głębokie poziomy wodonośne (Holloway & van der Straaten, 1995; Holt i in., 1995; Holloway, 2005). Obecnie działają przemysłowe i badawczo-wdrożeniowe instalacje podziemnego składowania CO₂. Przemysłowe składowiska CO₂ zlokalizowane są na złożach gazu ziemnego *Sleipner* (Morze Północne), *Snohvit* (Morze Barentsa) i *In Salah* (Algieria) oraz na złożu ropy naftowej *Weyburn* (Kanada). Pierwsza instalacja na złożu *Sleipner* powstała w 1996 r., rocznie zatłacza się tam ok. 1 mln ton gazu. Składowanie CO₂ na złożu *Sleipner* i *Snohvit* prowadzone jest w poziomach wodonośnych. Składowisko *In Salah* zlokalizowane jest w złożu gazu ziemnego. W przypadku *Weyburn* składowanie dwutlenku węgla prowadzone jest w złożu ropy naftowej, gdzie dodatkowo zatłaczany gaz powoduje wzrost wydobycia ropy naftowej.

Stan wykorzystania górotworu w Polsce

W Polsce stopień wykorzystania płytkich stref górotworu na obszarach zurbanizowanych jest niewielki. Dopiero pod koniec XX w. zaczęła powstawać infrastruktura transportowa zlokalizowana pod powierzchnią ziemi (metro w Warszawie, podziemny tramwaj w Krakowie, dworce kolejowe). Budowane są również parkingi podziemne. Pierwszy pozamijski tunel drogowy o długości 670 m pod Sobczakową Grapą w Lalikach został otwarty w marcu 2010 r., jest to fragment drogi ekspresowej S-69 z Bielska do Zwardonia (Czyżewski, 2010). Najdłuższy tunel drogowy w Polsce (2290 m) powstanie na drodze ekspresowej z Legnicy do Lubawki w pobliżu miejscowości Stare Bogaczowice.

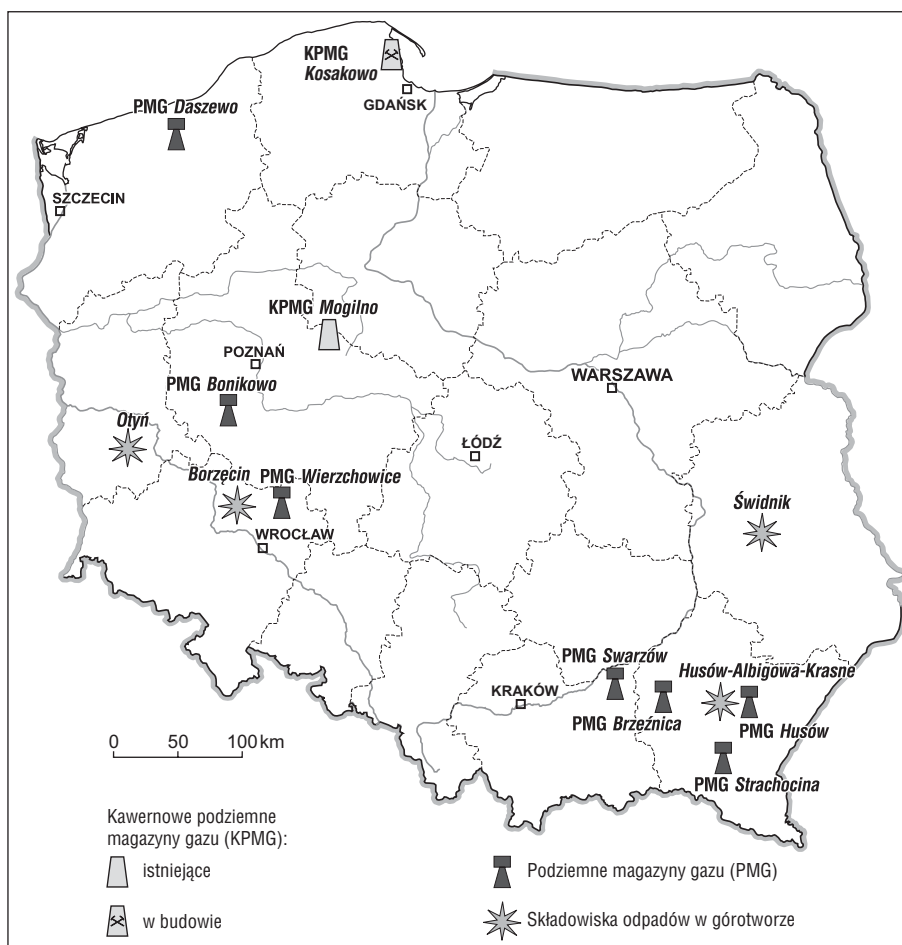
Głębsze strefy górotworu wykorzystywane są w Polsce do bezbiornikowego magazynowania gazu ziemnego w górotworze, w tym w podziemnych wyrobiskach górniczych, podziemnego magazynowania ropy naftowej i paliw

oraz do składowania odpadów w górotworze, w tym w podziemnych wyrobiskach górniczych (Reinisch 2000; Macuda & Zawisza, 2006a, 2006b, 2006c; Zawisza & Macuda, 2006). Według stanu na dzień 1 kwietnia 2010 r. wydano: 10 koncesji na bezbiornikowe magazynowanie gazu ziemnego (PGNiG S.A. – 9, *Termogaz Sp. z o.o.* – 1); 1 koncesję na podziemne magazynowanie ropy naftowej i paliw płynnych (Inowrocławskie Kopalnie Soli *SOLINO S.A.* – 1). Na składowanie odpadów w górotworze, w tym w podziemnych wyrobiskach górniczych, wydano 4 koncesje (*DPV Service Sp. z o.o.* – 1, PGNiG S.A. – 3). Składowane są odpady z wydobywania kopalin innych niż rudy metali – wody złożowe pochodzące z różnych złóż węglowodorów i inne niewymienione odpady (dotyczy to wyłącznie cieczy stosowanych do osuszania gazu, jak ni nadające się do regeneracji metanol, dwuetyloglikol – DEG) (*Sprawozdanie z realizacji Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2010 za okres od dnia 1 stycznia 2007 r. do dnia 31 grudnia 2008 r.*, 2009).

Bezziornikowe magazynowanie gazu ziemnego.

Pierwsze próby magazynowania gazu podjęto w 1954 r. w szcerpanym złożu gazu ziemnego *Roztoki* w Karpatach (okolice Jasła). W 1976 r. w zaazotowanym złożu gazu ziemnego *Tarchały* utworzono pierwszy w Europie magazyn helu. Spośród działających obecnie podziemnych magazynów gazu najstarszymi są *Swarzów* i *Brzeźnica*, które uruchomiono pod koniec lat 70. XX wieku.

Obecnie w Polsce funkcjonuje osiem podziemnych magazynów gazu (ryc. 2): siedem w wyeksploatowanych



Ryc. 2. Lokalizacja podziemnych magazynów gazu i składowisk odpadów w górotworze na terenie Polski

złożach i jeden w kawernach solnych. Cztery podziemne magazyny gazu: *Husów*, *Strachocina*, *Brzeźnica* i *Swarzów* znajdują się w południowo-wschodniej Polsce. Magazyn *Wierzchowice* zlokalizowany jest na Dolnym Śląsku, a kawernowy podziemny magazyn gazu (KPMG) *Mogilno* w pobliżu Inowrocławia, PMG *Bonikowo* – w Wielkopolsce, PMG *Daszewo* – w województwie zachodniopomorskim. W celu uzyskania większej pojemności magazynowej prowadzona jest rozbudowa podziemnych magazynów gazu (*Mogilno*, *Strachocina*, *Wierzchowice*) oraz budowa nowych (KPMG *Kosakowo*) (tab. 1).

KPMG *Mogilno* zlokalizowany jest na terenie województwa kujawsko-pomorskiego – w gminie Mogilno i Rogowo, eksploatacja tego magazynu jest prowadzona od roku 1996. Magazyn zlokalizowany jest w wysadzie solnym w rejonie Mogilna, w którym wykorzystano osiem wyługowanych kawern zlokalizowanych na głębokości od 600 do 1600 m. Pojemność czynna magazynu wynosi ok. 378 mln m³, a wydajność ok. 20 mln m³/d. Jest to typowy magazyn szczytowy, umożliwiający pokrywanie szczytowych zapotrzebowań na gaz, pracujący na krótkich i nieregularnych cyklach zatłaczania odbioru, w przeciwieństwie do pozostałych magazynów, mających charakter magazynów sezonowych, których czas zatłaczania wynosi ok. 160 dni, a czas odbioru ok. 90 dni (Reinisch, 2000; Kidybiński & Siemek, 2006; <http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>).

PMG *Wierzchowice* jest magazynem gazu wysokometanowego, utworzonym w częściowo wyeksploatowanym złożu gazu zaazotowanego położonym w środkowej części monokliny przedsudeckiej, w województwie dolnośląskim, na terenie gmin Milicz oraz Krośnice. Magazyn jest zlokalizowany w utworach wapienia podstawowego na głębokości od 1500 do 1600 m. Zatłaczanie gazu rozpoczęto w 1995 r., pojemność czynna magazynu wynosi 575 mln m³, docelowa – 4,3 mld m³. Eksploatacja magazynu odbywa się 20 odwiertami w zakresie ciśnień od 6 do 9,5 MPa. W celu zwiększenia pojemności czynnej magazynu oraz uzyska-

nia większych wydajności odbioru zaplanowano odwiercenie 12 otworów poziomych, z których 8 zostało już wykonanych, a jeden został włączony do eksploatacji. Magazyn ten był planowany jako „euromagazyn” z uwagi na budowę gazociągu Jamał–Europa Zachodnia (Reinisch, 2000; Kidybiński & Siemek, 2006; <http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>).

PMG *Strachocina* jest zlokalizowany na terenie województwa podkarpackiego – w gminie Sanok i Brzozów. Eksploatacja magazynu w częściowo wyeksploatowanym złożu gazu ziemnego w utworach kredowych na głębokości od 900 do 1100 m rozpoczęła się w roku 1982. Magazyn ten jest magazynem bezsprężarkowym, do którego zatłaczanie odbywa się bezpośrednio z gazociągu. Eksploatacja odbywa się w zakresie ciśnień od 2,9 do 3,8 MPa, przy użyciu 35 odwiertów z wydajnością 1,5 mln m³/d. Pojemność całkowita magazynu wynosi obecnie 600 mln m³, przy czym istnieje możliwość zwiększenia jej do wartości ok. 1 mld m³, przy maksymalnym ciśnieniu pracy około 9 MPa. Aktualna pojemność czynna magazynu wynosi 150 mln m³. Napełniany jest on gazem importowanym z kierunku Drozdowice-Hermanowice (Reinisch, 2000; Kidybiński & Siemek, 2006; <http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>). Rozbudowa PMG *Strachocina* pozwoli na zwiększenie jego pojemności czynnej do 330 mln m³, zakończenie rozbudowy planowane jest na rok 2011.

PMG *Swarzów* zlokalizowany jest na terenie województwa małopolskiego, w gminie Dąbrowa Tarnowska i Oleśko. Zatłaczanie gazu do złoża zalegającego na głębokości 630–650 m w utworach miocenu rozpoczęto w lipcu 1979 roku. Pojemność całkowita magazynu wynosi 200 mln m³, pojemność czynna 90 mln m³. Eksploatacja magazynu odbywa się 8 odwiertami w zakresie ciśnień 6–8,2 MPa, z wydajnością ok. 1,0 mln m³/d. Magazyn napełniany jest z magistrali południowej i wykorzystywany do pokrycia nierówności zużycia gazu w rejonie aglomeracji krakowskiej (Reinisch, 2000; Kidybiński & Siemek, 2006; <http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>).

Tab. 1. Podziemne magazyny gazu w Polsce (<http://www.pgnig.pl/osm/magazyny/parametry>; <http://www.pgnig.pl/pgnig/com>)

Nazwa magazynu	Typ magazynu	Pojemność robocza [mln m ³]	Maksymalna wydajność odbioru [mln m ³ /d]
Istniejące			
<i>Bonikowo</i>	szcerpane złożo gazu	200	2,4
<i>Brzeźnica</i>	szcerpane złożo gazu wysokometanowego	65	0,9
<i>Daszewo</i>	szcerpane złożo ropy	30	0,4
<i>Husów</i>	szcerpane złożo gazu wysokometanowego	350	5,8
<i>Swarzów</i>	szcerpane złożo gazu wysokometanowego	90	1,0
Istniejące, w rozbudowie			
<i>Mogilno</i>	kawerny solne	378	20,6
<i>Strachocina</i>	szcerpane złożo gazu wysokometanowego	150	1,5
<i>Wierzchowice</i>	szcerpane złożo gazu zaazotowanego	575	4,8
Razem		1838	37,4
W budowie			
<i>Kosakowo</i>	kawerny solne	250	9,6
Razem		250	9,6

PMG Brzeźnica zlokalizowany jest na terenie województwa podkarpackiego – w gminie Dębica. Zatłaczanie gazu do złoża zalegającego na głębokości 380–400 m w utworach kredowych rozpoczęto w 1979 r., a właściwą pracę – w 1985. Całkowita pojemność magazynu to 130 mln m³, z czego pojemność czynna wynosi 65 mln m³. Magazyn ten znajduje się w korzystnych warunkach geologiczno-złożowych pozwalających na optymalną pracę od przeszło 20 lat w zakresie ciśnień od 3,1 do 4,2 MPa. Wydajność magazynu wynosi 0,9 mln m³/d. Zatłaczanie i odbiór odbywa się 5 odwiertami (Reinisch, 2000; Kidybiński & Siemek, 2006; <http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>).

PMG Husów znajduje się w województwie podkarpackim – w gminie Markowa. Magazyn zlokalizowany jest w XII poziomie (miocen) szczypanego wielopoziomowego złoża gazu ziemnego na głębokości 1250–1300 m. Zatłaczanie gazu do PMG *Husów*, rozpoczęto w 1987 roku. Pojemność całkowita magazynu wynosi ponad 900 mln m³, z czego pojemność czynna magazynu to 350 mln m³. Maksymalna moc odbioru wynosi ok. 5,8 mln m³/d. Planowana jest rozbudowa PMG *Husów* do pojemności czynnej 500 mln m³. Magazyn pracuje w zakresie ciśnień 5,8–10,5 MPa z wydajnością 5,8 mln m³/d. Eksploatacja magazynu odbywa się 29 odwiertami, z których 12 to nowo wykonane odwierty wiercone techniką otworów kierunkowych w celu zwiększenia mocy magazynu. PMG *Husów* współpracuje z magistralą południową krajowego systemu przesyłowego. Jest przeznaczony do pokrycia nierównomierności lokalnego zużycia gazu w południowo-wschodniej Polsce (Reinisch, 2000; Kidybiński & Siemek, 2006; <http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>).

PMG Bonikowo jest zlokalizowany w częściowo wyeksploatowanym złożu gazu ziemnego, znajdującym się na terenie województwa wielkopolskiego – w gminie Kościan i Kamieniec. Został oddany do eksploatacji w 2010 r., pojemność czynna magazynu wynosi 200 mln m³. Maksymalna wydajność zatłaczania gazu wynosi 1,68 mln m³/d, a maksymalna wydajność odbioru gazu z magazynu – 2,40 mln m³ (<http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>).

PMG Daszewo zlokalizowany jest w częściowo wyeksploatowanym złożu ropno-gazowym *Daszewo*, które znajduje się na terenie województwa zachodniopomorskiego – w gminie Karlino i Białogard. Magazyn uruchomiono w 2009 r., pojemność czynna magazynu wynosi 30 mln m³ przy maksymalnej wydajności ok. 0,4 mln m³/d. W przyszłości jego docelowa pojemność ma być dwukrotnie większa, przewiduje się również zmianę zatłaczanego gazu z zaazotanego na wysokometanowy. Magazyn ten ma wyrównywać niedobory gazu i spadki ciśnienia w gazociągach w rejonie Pasa Nadmorskiego, pozwoli również na racjonalne wykorzystanie potencjału lokalnych złóż gazu poprzez równomierne szczypanie zasobów (<http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>; <http://www.pgnig.pl/pgnig/com/archiwum>).

KPMG Kosakowo będzie zlokalizowany w kawernach solnych na terenie województwa pomorskiego – w gminie Kosakowo. Do 2014 r. planuje się uzyskać 100 mln m³ pojemności czynnej, przewidywany termin zakończenia rozbudowy magazynu do pojemności 250 mln m³ to koniec 2020 r., kiedy powstanie 10 komór magazynowych (<http://www.pgnig.pl/osm/magazyny>).

PMG Nowa Ruda jest magazynem planowanym w istniejących wyrobiskach górniczych kopalni węgla kamiennego. Spółka *Termogaz* sp. z o.o. w 2000 r. uzyskała kon-

cesję na bezzbiornikowe magazynowanie gazu ziemnego w podziemnym magazynie gazu *Nowa Ruda*, zlokalizowanym w złożu węgla kamiennego. Pojemność magazynu ma wynosić 200 mln m³. W latach 2000–2003 na polu *Stupiec* kopalni *Nowa Ruda* przeprowadzono wstępne prace związane z budową magazynu gazu, nie zostały one zakończone ze względu na niesprzyjające warunki geologiczne oraz brak inwestora i przyszłego użytkownika zbiornika gazu (Kidybiński & Siemek, 2006; Siemek & Nagy, 2007).

Składowanie odpadów w górotworze. Składowanie odpadów w górotworze, w tym w podziemnych wyrobiskach górniczych, nie należy w Polsce do działalności szeroko rozpowszechnionych. Możliwości lokalizacji podziemnych składowisk odpadów, jakie daje budowa geologiczna Polski, są znacznie większe i niewykorzystane. Obecnie nie istnieje żadne składowisko zlokalizowane w wyrobiskach górniczych, w których można składować nawet najbardziej niebezpieczne rodzaje odpadów. Jedyną formą podziemnego składowania odpadów w Polsce jest ich zatłaczanie do szczypanych złóż węglowodorów. Działalność ta dotyczy jedynie odpadów płynnych pochodzących z poszukiwania i wydobywania ropy naftowej i gazu ziemnego, klasyfikowanych jako inne niż niebezpieczne i obojętne.

Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A. posiada 3 koncesje na podziemne składowanie odpadów płynnych w horyzontach złóż: *Husów-Albigowa-Krasne*, *Świdnik* oraz *Borzęcin*.

Borzęcin. Złoże gazu ziemnego *Borzęcin* znajduje się w województwie dolnośląskim; zakumulowane jest w wapieniu podstawowym i czerwonym spągowcu w środkowej części monokliny przedsudeckiej. Na złożu prowadzona jest różnorodna działalność eksploatacja gazu ziemnego, zatłaczanie odpadów płynnych i gazów kwaśnych. Instalacja odpadów płynnych powstałych podczas eksploatacji węglowodorów została wybudowana w 2009 r., jej projektowa przepustowość wynosi 300 m³/d (Cygnaar, 2007; Cygnaar, 2009). Przemysłowa instalacja przemysłowego składowania gazów kwaśnych zlokalizowana jest w zawodnionej części złoża, uruchomiono ją w 1996 roku. Zatłaczanie gazów kwaśnych prowadzone jest w ramach koncesji na eksploatację gazu ziemnego ze złoża *Borzęcin*. Zatłaczany do górotworu gaz jest produktem odpadowym z aminowego oczyszczania gazu ziemnego. Węglowodory są wydobywane na powierzchnię ziemi, składniki kwaśne odseparowywane (60% – CO₂, 15% – H₂S) i powrotnie zatłaczane do strefy zawodnionej, podścielającej złożu gazu ziemnego. Kwaśne gazy pochodzące z instalacji aminowej nie są dopalane w piecach, dzięki czemu nie powodują zanieczyszczenia powietrza. Zatłaczane gazy wypierają rodzimy gaz ziemny rozpuszczony w wodach złożowych. Dodatkowe ilości wypieranego gazu ziemnego wzbogacają wyżej ległą czapę gazową, z której wydobywany jest gaz ziemny (Lubaś, 2007). W ciągu 12 lat wtłoczono do złoża blisko 3 mln m³ gazu. Proces powrotnego zatłaczania rozpoczęto w chwili, gdy ze złoża wydobyto już 3,5 mld m³, a więc 67% gazu.

Husów-Albigowa-Krasne. Składowanie odpadów prowadzone jest w złożu gazu ziemnego *Husów-Albigowa-Krasne*, które znajduje się w południowej części przedgórze Karpat środkowych. Akumulacja gazu związana jest z utworami miocenu autochtonicznego i występuje w 7 poziomach gazonośnych zalegających na głębokości 500–

–1000 m. Każdy z horyzontów izolowany jest od stropu i spagu utworami ilasto-lupkowymi. Do zatłaczania wód odpadowych w rejonie Krasnego wykorzystywane są horyzonty VII i VIIa, charakteryzujące się najkorzystniejszymi warunkami geologicznymi i złożowymi, zalegające odpowiednio na głębokości 900–1000 m i 940–1040 m. Planowana do zatłoczenia całkowita ilość odpadów ciekłych wynosi ok. 75 tys. m³. Zatłaczanie odpadów prowadzone jest obecnie jednym odwiertem (Krasne-8).

Świdnik. Składowanie cieczy odpadowych prowadzone jest w złożu ropy naftowej *Świdnik* znajdującym się w obrębie synklinorium lubelskiego. Warstwami chłonnymi są górnokarbońskie utwory piaskowcowe stanowiące skałę zbiornikową zalegające na głębokości ok. 1083–1126 m. Obliczono, że istnieje możliwość wtłoczenia do warstw chłonnych (poziomu zbiornikowego) ok. 36,5 tys. m³ cieczy. Zatłaczanie odpadów prowadzone jest dwoma odwiertami (Świdnik-13 i Świdnik-15).

Dodatkowo działa jeszcze podziemne składowisko odpadów *Otyń*, zlokalizowane w wyeksploatowanym złożu ropy naftowej i gazu ziemnego *Otyń* położonym na terenie gminy Otyń w województwie lubuskim. W utworach dolomitu głównego składowane są odpady powstające podczas wydobywania ropy naftowej i gazu ziemnego (http://www.dpvservice.com.pl/o_firmie/zatlaczenie_wod_zlozowych).

W 2007 r. w wyżej wymienionych składowiskach zdeponowano łącznie ok. 42 480 Mg odpadów. W 2008 r. całkowita ilość składowanych odpadów wyniosła 15 764,09 Mg. Wszystkie odpady były składowane metodą zatłaczania do złoża przystosowanymi do tego celu otworami wiertniczymi (*Sprawozdanie...*, 2009).

Perspektywy wykorzystania górotworu w Polsce

W Polsce największe perspektywy rozwoju ma składowanie i magazynowanie substancji w przestrzeni porowej. Wynikają one z obecności grubego (kilka kilometrów miąższości) kompleksu skał osadowych permio-mezozoicznych. Występują w nim wyniesione (antyklinalne) struktury związane zasadniczo z tektoniką salinarną. Podobna sytuacja występuje w krajach zachodniej Europy (Niemcy, Dania), położonych na terenie permio-mezozoicznego basenu Europy centralnej i północno-zachodniej.

W utworach mezozoicznych najkorzystniejsze warunki dla podziemnego składowania i magazynowania substancji wykazują piaszczyste poziomy wodonośny triasu dolnego (pstry piaskowiec dolny i środkowy), triasu środkowego i górnego (warstwy sulechowskie i piaskowiec trzcinyowy), jury dolnej (plienbach i toark) oraz kredy dolnej (barrem–alb środkowy) (Tarkowski & Uliasz-Misiak, 2006). W ostatnich latach w Polsce wykonano szereg prac mających na celu zidentyfikowanie i rozpoznanie struktur w kompleksie permio-mezozoicznym odpowiednich do magazynowania substancji lub składowania dwutlenku węgla albo odpadów. Wstępnie wytypowano 48 struktur tektonicznych do podziemnego składowania dwutlenku węgla: 17 w poziomie dolnokredowym, 18 – w dolnojurańskim; 10 – w dolnotriasowym i 4 – w górnortriasowym (Tarkowski, 2008). Obecnie na zamówienie Ministra Środowiska prowadzone są prace badawcze mające na celu dokonanie przeglądu struktur geologicznych na obszarze całej Polski wraz z polskim obszarem Morza Bałtyckiego pod kątem możliwości

składowania dwutlenku węgla. Zakończenie tych badań przewidywane jest na rok 2012.

W Polsce nie ma podziemnych składowisk odpadów radioaktywnych. W ramach prac prowadzonych w celu ustalenia lokalizacji składowiska odpadów promieniotwórczych przeanalizowano możliwości wykorzystania kopalń istniejących w Polsce (po zakończeniu ich eksploatacji). Dokonano również przeglądu budowy geologicznej kraju pod kątem przydatności formacji geologicznych do lokalizacji takich obiektów. Stwierdzono, że żadna z polskich aktualnie eksploatowanych kopalń nie nadaje się do przekształcenia w składowisko odpadów promieniotwórczych. Dokonana wstępna analiza wyboru struktur wykazała, że w polskiej prowincji zagłębia cechsztyńskiego lokalizację składowiska można rozpatrywać zarówno w kompleksach soli kamiennej, jak i ilowców solnych – zębów (Ślizowski, 2006). Analiza przydatności formacji geologicznych pozwoliła na wstępne wytypowanie 44 struktur zlokalizowanych w skałach magmowych i metamorficznych (17), utworach ilastych (7) i złożach soli (20). Ze względu na silne spękanie skał magmowych dalsze badania prowadzone są nad lokalizacjami w złożach soli (wysady solne *Damasławek*, *Kłodawa*, *Łanięta*) oraz w utworach ilastych (*Jarocin*, *Pogorzal*). Wskazano również lokalizacje zapasowe w skałach magmowych (*Kruszyniany*, *Krasnopol*, *Tajno*, *Rydzewo*) (Włodarski, 2010; <http://www.atom.edu.pl/index.php/ej-w-polsce/dzis.html>).

Na zamówienie Ministra Środowiska w latach 2002–2006 prowadzono oceny możliwości magazynowania substancji w złożach soli (Ślizowski i in., 2006), w szcerpanych złożach węglowodorów i głębokich solankowych strukturach wodonośnych (Górecki i in., 2004). Badania te pozwoliły na wskazanie potencjalnych lokalizacji i pojemności struktur geologicznych (szcerpanych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego, wysadowych i pokładowych złóż soli kamiennej oraz głębokich solankowych poziomów wodonośnych korzystnych dla prowadzenia podziemnego magazynowania substancji).

Badania nad możliwościami magazynowania substancji w zaniechanych kopalniach węgla w Polsce, przeprowadzone w latach 2002–2004, pozwoliły na wskazanie kopalń *Silesia* i *Krupiński* posiadających najbardziej korzystne warunki geologiczne do magazynowania paliw lub gazu. Kopalnie te są położone w zachodniej i południowo-zachodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Nie mają połączenia z innymi kopalniami, nad utworami karbonu występują nieprzepuszczalne utwory ilaste, dopływ wody do wyrobisk jest stosunkowo niewielki. Pojemność czynna magazynów oszacowana na podstawie objętości wyrobisk górniczych i pojemności metanu zaabsorbowanego w pokładach węglowych wynosi dla PMG *Silesia* ok. 200 mln m³, dla PMG *Krupiński* – ok. 50 mln m³ (Kidybiński & Siemek, 2004, 2006; Siemek & Nagy, 2007).

Przedmiotem badań i analiz były również możliwości składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. Dokonano przeglądu polskich kopalń podziemnych (węgla kamiennego, miedzi, cynku i ołowiu, soli, rud żelaza, anhydrytu, barytu i glin białowypalających się) pod kątem możliwości wykorzystania ich jako składowiska. Spośród rozważanych lokalizacji jedynie kopalnie soli na Niżu Polskim mogą być rozważane jako miejsca składowania odpadów niebezpiecznych. Możliwości lokowania odpadów niebezpiecznych rozważano również dla skał magmowych, metamorficznych, ilastych i utworów ewaporatowych.

Przeanalizowano kompleksy krystaliczne skał Niżu Polskiego, Tatr i Sudetów; stwierdzono, że żaden kompleks nie nadaje się do poszukiwania w nim miejsc do składowania. Kompleksy skał ilastych (mułowce i iłowce z wkładkami węglanowymi i siarczanowymi przewarstwione utworami piaskowcowo-mułowcowymi wieku kajpru i retyku), w których można bezpiecznie lokować odpady niebezpieczne, występują na monoklinie przedsudeckiej. Utwory ewaporatowe na terenie Polski potencjalnie możliwe do wykorzystania jako składowiska odpadów niebezpiecznych to: wysady *Kłodawa*, *Łągnieta*, *Lubień* i *Damastawek*, pokładowe złoża soli na wyniesieniu Łęby oraz LGOM (Ślizowski i in., 2004).

Autorzy artykułu uważają, że w Polsce w najbliższych latach powinna być opracowana wszechstronna analiza oraz klasyfikacja struktur geologicznych pod kątem możliwości ich wykorzystania do składowania odpadów i substancji oraz magazynowania gazu ziemnego i paliw. Jest to szczególnie istotne na obszarze Niżu Polskiego w utworach permio-mezozoicznych, gdzie jak wspomniano istnieją największe perspektywy rozwoju składowania i magazynowania substancji w przestrzeni porowej. Wykonanie takiej analizy jest konieczne dla racjonalnego zarządzania górotworem.

Artykuł przygotowano w ramach badań statutowych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Literatura

- Background** paper on permanent storage in salt mines – German Federal Environment Agency, Berlin, Germany, 2004 [http://www.basel.int/techmatters/popguid_may2004_ge_an1.pdf, dostęp: 20.09.2010].
- BENARDOS A.G. & KALIAMPAKOS D.C. 2006 – Design of an Underground Hazardous Waste Repository in Greece. Proc. of the ITA-AITES 2006 World Tunnel Congress, Seoul, Korea 22–27.04.2006 [http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2006/data/pita06-0446.pdf, dostęp: 20.09.2010].
- BÉREST P. & BROUARD B. 2003 – Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage Blow Out; Mechanical Instability; Seepage; Cavern Abandonment. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, 58: 361–384.
- CYGNAR R. 2007 – Gaz z Borzęcina – od 35 lat. Szejki, 3(92): 4–6.
- CYGNAR R. 2009 – Wtlaczanie po nowemu. Szejki, 2(95): 10.
- CZYŻEWSKI M. 2010 – Pierwszy pozamijski tunel drogowy w Polsce otwarty. Gazeta Wyborcza, Bielsko-Biała [http://katowice.gazeta.pl/katowice/1,35019,7630803,Pierwszy_pozamijski_tunel_drogowy_w_Polsce_otwarty.html, dostęp: 15.09.2010].
- EVANS D., STEPHENSON M. & SHAW R. 2009 – The present and future use of 'land' below ground. Land Use Policy, 26S: S302–S316.
- GÓRECKI W. (red.) 2004 – Analiza możliwości wykorzystania szczyptywalnych złóż węglowodorów, zawodnionych horyzontów i wybranych warstw wodonośnych na podziemne magazyny gazu ziemnego. Ministerstwo Środowiska, CAG Warszawa.
- GRODECKI W. 2010 – Dlaczego budować pod ziemią? Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, marzec–kwiecień: 12–15.
- HOLLOWAY S. 2005 – Underground sequestration of carbon dioxide – a viable greenhouse gas mitigation option. Energy, 30: 2318–2333.
- HOLLOWAY S. & VAN DER STRAATEN R. 1995 – The Joule II project – the underground disposal of carbon dioxide. Energy Conversion and Management, 36: 519–22.
- HOLT J., JENSEN J.-T. & LINDBERG E. 1995 – Underground storage of CO₂ in aquifers and oil reservoirs. Energy Conversion and Management, 36: 535–538.
- KIDYBIŃSKI A. & SIEMEK J. (red.) 2004 – Ocena możliwości wykorzystania wyrobisk górniczych likwidowanych kopalń węgla kamiennego na podziemne magazyny gazu i paliw płynnych. Ministerstwo Środowiska, CAG Warszawa.
- KIDYBIŃSKI A. & SIEMEK J. (red.) 2006 – Podziemne magazyny gazu w zaniechanych kopalniach węgla. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K. & URBAŃCZYK K. 2009 – Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kavern solnych. Prz. Geol., 57: 819–828.
- LUBAŚ J. 2007 – Pionierskie doświadczenia Polski w zakresie sekwestracji dwutlenku węgla. Prz. Geol., 55: 663–665.
- MACUDA J. & ZAWISZA L. 2006a – Environmental hazard accompanying the liquid waste storage in the mass. Acta Montanistica Slovaca, 11(1): 98–103.
- MACUDA J. & ZAWISZA L. 2006b – Techniczne uwarunkowania składowania odpadów płynnych w górotworze metodą otworową. Wiertnictwo, Nafta, Gaz, 23(1): 333–340.
- MACUDA J. & ZAWISZA L. 2006c – Waste storage in the rock mass in the view of Poland's and EU legal regulations. Acta Montanistica Slovaca, 11(1): 108–112.
- MAZURKIEWICZ M., PIOTROWSKI Z. & POBORSKA-MŁYNARSKA K. 2000 – Przegląd światowych koncepcji składowania odpadów niebezpiecznych w wyrobiskach podziemnych. Mat. Szkoły Gospodarki Odpadami: 185–197.
- Minosus** hazardous waste project beats final legal challenge – Letsrecycle website, Waste management News, 06.12.2004 [http://www.letsrecycle.com/do/ecco.py/view item?listid=37&listcatid=256&listitemid=5934, dostęp: 10.09.2010].
- REINISCH R. 2000 – Wybrane istotne aspekty podziemnych magazynów gazu. Wyd. PLJ, Warszawa.
- REMPE N.T. 2007 – Permanent Underground Repositories for Radioactive Waste. Progress in Nuclear Energy, 4: 365–374.
- RONKA K., RITOLA J. & RAUHALA K. 1998 – Underground space in land-use planning. Tunnelling and Underground Space Technology, 13: 39–49.
- SIEMEK S. & NAGY S. 2007 – Podziemne magazyny gazu ziemnego w wyeksploatowanych kopalniach węgla. Wiertnictwo, Nafta, Gaz, 24(2): 857–878.
- Sprawozdanie** z realizacji Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2010 za okres od dnia 1 stycznia 2007 r. do dnia 31 grudnia 2008 r. – Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 2009 [http://www.mos.gov.pl/g2/big/2010_01/99835f68d76915a520653040964bf956.pdf, dostęp: 20.10.2010].
- ŚLIZOWSKI K. 2006 – Możliwości zagospodarowania podziemnych złóż i struktur solnych w Polsce na składowisko odpadów promieniotwórczych. Prz. Geol., 54: 314.
- ŚLIZOWSKI K. & LANKOF L. 2009 – Geologiczne uwarunkowania składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w złożach soli w Polsce. Prz. Geol., 57: 829–838.
- ŚLIZOWSKI K. & MACIEJEWSKI A. (red.) 2006 – Ocena możliwości magazynowania substancji w złożach soli kamiennej. Ministerstwo Środowiska, CAG Warszawa.
- ŚLIZOWSKI K., KÖHSLING J. & LANKOF L. 2004 – Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. Studia, Rozprawy, Monografie Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 129.
- TARKOWSKI R. 2008 – CO₂ storage capacity of geological structures located within Polish Lowlands' Mesozoic formations. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 4(1): 101–112.
- TARKOWSKI R. & ULIASZ-MISIAK B. 2006 – Possibilities of CO₂ Sequestration by Storage in Geological Media of Major Deep Aquifers in Poland. Chemical Engineering Research and Design, 84: 776–780.
- Underground Storage**. Mineral Planning Factsheet – British Geological Survey for the Department of Communities and Local Government, 2008 [http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/planning/mineralPlanningFactsheets.html, dostęp: 10.09.2010].
- WALLBRECHT J. 2006 – Underground gas storage. 23th World Gas Conference, Amsterdam, 5–6.06.2006 [http://www.igu.com/html/wgc2006/WOC2database/index.html, dostęp: 15.09.2010].
- WŁODARSKI J. 2010 – Co każdy powinien wiedzieć o gospodarce odpadami promieniotwórczymi. Państwowa Agencja Atomistyki [http://www.paa.gov.pl/dokumenty/odpady-wlodarski.pdf, dostęp: 20.09.2010].
- ZAWISZA L. & MACUDA J. 2006 – Ocena szczelności struktur geologicznych przeznaczonych do składowania odpadów płynnych w górotworze. Wiertnictwo, Nafta, Gaz, 23(1): 619–626.

Praca wpłynęła do redakcji 16.12.2010 r.
Po recenzji akceptowano do druku 21.02.2011 r.