

## Wyznaczanie i ocena izolacyjności naturalnej bariery geologicznej w procesie cyfrowego przetwarzania danych geologicznych

Anna Gabryś-Godlewska\*, Tomasz Gliwicz\*, Dariusz Grabowski\*



A. Gabryś-Godlewska



T. Gliwicz



D. Grabowski

**Determination and evaluation of insulating properties of a natural geological barrier — a numerical analysis of geological data.** *Prz. Geol.*, 55, 5: 416–423.

*S u m m a r y.* Numerical analysis of data from boreholes, applied during compilation of the “waste storage” database for the Geoenvironmental Map of Poland in 1 : 50,000 scale, allows quick and objective retrieval of comparable results. The goal of the borehole analysis is to find the proper insulating layers conforming to the waste storage standards, according to criteria specified in the Proclamation of the Ministry of the Minister of Environment dated on 24th March, 2003. The final result of such analysis is locating a natural geological barrier for depositories of neutral (O), hazardous (N) or other (K) wastes, with

the most important insulative characteristics (depth of layer top, its thickness and lithology, presence of glaciectonic disturbances). The numerical analysis of data consists of 8 stages. Stage I assigns lithology of particular stratum to relevant insulation category (O, K, N). Stages II-III involve combining of the adjacent strata into stacks with the same or different insulation category and calculating their thickness. After excluding stacks thinner than 1 m (stage IV), checking the thickness of layers conforming to the hazardous waste storage standards (V) and taking into account the glaciectonic disturbances within the analyzed layers (stage VI), a natural geological barrier is delineated (stages VII-VIII). The practical advantage of the analysis is that the method is fast and gives unbiased, repeatable results.

**Key words:** waste storage, natural geological barrier, numerical analysis

Od 2002 roku w Państwowym Instytucie Geologicznym jest tworzony zasób informatyczny *Mapa geośrodowiskowa Polski w skali 1 : 50 000* (MGsP), w którego skład wchodzi trzy bazy danych GIS: *Mapa geologiczno-gospodarcza Polski* (MGGP), *Składowanie odpadów* (SO) i *Geochemia środowiska* (GS).

Głównym celem tworzenia bazy danych SO jest zebranie informacji geośrodowiskowych z wykorzystaniem istniejących materiałów archiwalnych, bez prowadzenia dodatkowych badań terenowych. Na podstawie tych danych można wyznaczyć obszary o bezwzględny zakazie lokalizacji składowisk odpadów oraz obszary, które ze względu na odpowiednie właściwości izolacyjne przypowierzchniowych warstw geologicznych mogą spełniać wymagania stawiane lokalizacjom różnego typu składowisk odpadów: obojętnych (O), niebezpiecznych (N) oraz innych niż niebezpieczne i obojętne, w tym komunalnych (K). Ogólne zasady wyznaczania tych obszarów i sposób końcowej prezentacji wyników są opisane w *Instrukcji wykonywania MGsP* (2005) i zostały opracowane zgodnie z wytycznymi zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dn. 24.03.2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów. Podstawą do wskazania tych obszarów są dostępne opracowania kartograficzne, zwłaszcza *Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000* i *Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000*. Uzupełnieniem informacji kartograficznych są dane

pochodzące z profili otworów wiertniczych, opisujące budowę geologiczną na większych głębokościach.

Ze względu na skalę opracowania (1 : 50 000) wyznaczone obszary preferowane do lokalizacji składowisk odpadów są wyłącznie propozycjami wskazującymi rejon, które z uwagi na sprzyjającą budowę geologiczną oraz warunki przyrodnicze i hydrogeologiczne są najbardziej perspektywiczne w dalszych (czyli terenowych) pracach rozpoznawczych. Szczegółowych danych o litologii, miąższości oraz głębokości położenia stropu i spągu warstw izolacyjnych dostarczają profile otworów wiertniczych. Ich analiza ma na celu wytypowanie tylko tych warstw, które mogą zostać wykorzystane jako naturalna bariera geologiczna (NBG) w trakcie budowy składowiska odpadów.

W celu przyporządkowania analizowanej warstwy izolacyjnej do określonego typu składowiska odpadów, w oparciu o wszystkie dostępne dane z profili otworów w wersji cyfrowej, postanowiono od 2006 r. wykorzystać analizę przestrzenną danych, której istotnymi zaletami są:

- 1) obiektywizm uzyskanych wyników dla dowolnie wybranych arkuszy lub regionów Polski, dający możliwość ich porównywania (eliminacja subiektywnego podejścia autorów);
- 2) unikanie przypadkowych błędów (powodowanych przez czynnik ludzki);
- 3) szybkość przetwarzania danych (analiza ponad 6000 rekordów odpowiadających wydzieleniom geologicznym w około 600 otworach zajmuje, łącznie ze wszystkimi procedurami dodatkowymi, około 10 minut);
- 4) możliwość zmiany kryteriów doboru (np. głębokości analizy) w określonym zakresie i szybkiego otrzymania nowego wyniku.

\*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; anna.gabrys-godlewska@pgi.gov.pl, tomasz.gliwicz@pgi.gov.pl, dariusz.grabowski@pgi.gov.pl

Analizą objęto dane zawarte w profilach otworów zgromadzonych w Bazie Danych Hydrogeologicznych (BDH) pod nazwą Bank HYDRO, ponieważ:

- 1) wszystkie profile w BDH były dostępne w wersji cyfrowej,
- 2) litologia poszczególnych wydzieleni jest ujęta w formie słownika.

Istotne były także informacje dotyczące stwierdzonych poziomów wodonośnych, które w opisach profili z innych źródeł niejednokrotnie pomijano.

### Podstawowe pojęcia

Poniżej podano i zdefiniowano najważniejsze pojęcia używane w dalszej części artykułu.

**Warstwa izolacyjna** — jednostka litostratygraficzna o określonym typie izolacyjności. Typy izolacyjności:

- a) O — spełniający tylko kryteria wymagane dla składowisk odpadów obojętnych;
- b) K — spełniający kryteria wymagane dla składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne (w tym komunalnych) oraz obojętnych;
- c) N — spełniający kryteria wymagane dla składowisk odpadów: niebezpiecznych, obojętnych oraz innych niż niebezpieczne i obojętne.

**Wkładka** — warstwa izolacyjna o określonym typie izolacyjności, ale o miąższości  $< 1$  m.

**Pakiet izolacyjny** — wydzielenie obejmujące jedną warstwę izolacyjną lub więcej, w obrębie którego każda z warstw ma określony typ izolacyjności. Wyróżniamy trzy rodzaje pakietów izolacyjnych:

- a) jednowarstwowy (pojedynczy) — złożony z 1 warstwy izolacyjnej (typu: O, K, N);
- b) wielowarstwowy prosty — złożony z co najmniej 2 warstw izolacyjnych o tym samym typie izolacyjności (OO, KK, NN);
- c) wielowarstwowy złożony — składa się co najmniej z 2 warstw izolacyjnych o różnym typie izolacyjności (OK, ON, KN, OKN).

**Naturalna bariera geologiczna (NBG)** — pakiet izolacyjny o miąższości co najmniej 1 m. Podczas budowy składowiska największe znaczenie ma NBG, której strop znajduje się na głębokości 0–10 m, w szczególnych przypadkach do 15 m. Rodzaje NBG:

- a) NBG1 — obejmuje pakiet izolacyjny o typie izolacyjności O, K lub N, którego strop występuje na głębokości 0–2,5 m p.p.t.;
- b) NBG2 — obejmuje pakiet izolacyjny o typie izolacyjności K lub N, którego strop występuje na głębokości 2,5–10 m p.p.t.;
- c) NBG3 — obejmuje pakiet izolacyjny o typie izolacyjności K lub N, którego strop występuje poniżej spągu NBG2, ale nie głębiej niż 10 m p.p.t.
- d) NBG4 — obejmuje pakiet izolacyjny o typie izolacyjności K lub N, którego strop występuje na głębokości 10,1–15,0 m p.p.t.

**Cechy izolacyjne** (warstwy, pakietu, naturalnej bariery geologicznej) — podstawowe cechy decydujące o typie izolacyjności: litologia, miąższość, głębokość położenia stropu i spągu oraz zaburzenia glacictektoniczne.

### Zasady wyznaczania naturalnej bariery geologicznej w profilach otworów wiertniczych

**Rodzaje skał, które mogą być wykorzystane jako naturalna bariera geologiczna.** Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dn. 24.03.2003 r. naturalna bariera geologiczna (NBG) uszczelniająca podłoże i ściany boczne składowiska powinna mieć odpowiednią miąższość i wartość współczynnika filtracji:

- 1) miąższość  $\geq 1$  m; współczynnik filtracji  $\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s — w składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne (w dalszej części będą one określone dawną nazwą — komunalne);
- 2) miąższość  $\geq 5$  m; współczynnik filtracji  $\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s — w składowiskach odpadów niebezpiecznych.

W rozporządzeniu nie ma podanej granicznej wartości współczynnika filtracji, jaką powinna wykazywać naturalna bariera geologiczna w składowiskach odpadów obojętnych, ale w *Instrukcji opracowania MGsP* (2005) na podstawie literatury przyjęto, że wartość ta nie powinna być większa od  $1,0 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Skały, które mogą spełniać wymagania izolacyjności w zakresie składowania odpadów komunalnych i niebezpiecznych, to przede wszystkim skały ilaste o dużej zawartości frakcji iłowej lub minerałów ilastych. Wyniki badań przepuszczalności prowadzonych różnymi metodami w warunkach polowych i laboratoryjnych (Kowalski, 1989; Majer, 2003a) wskazują, że na obszarze Polski najniższe wartości współczynnika filtracji mają: plioceńskie iły pstrze, mioceńskie iły krakowieckie oraz jurajskie, triasowe i karbońskie skały ilaste (Pazdro, 1983; Wiłun, 1987; Wysokiński, 1995; Majer, 2003a, b). Spośród wszystkich iłów w Polsce najlepsze właściwości izolacyjne oraz najwyższą pojemność sorpcyjną mają neogeńskie iły pstrze (Wysokiński, 1995; Brański, 2002; Frankowski, 2004), ale jako materiał na przesłony izolacyjne należy wybierać jedynie te partie iłów, które są makroskopowo jednorodne i nie zawierają przewarstwień piaszczystych (Majer, 2003a).

Niskie wartości współczynnika filtracji, czyli  $\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s (wymagane rozporządzeniem), osiągają również niektóre czwartorzędowe iły warwowe (Krogulec, 1994a, b) i gliny, m.in.: gliny morenowe (Dąbrowski, 1982), gliny kaolinowe (Ossowski, 1985), zwarte gliny piaszczyste i pylaste (Wiłun, 1987; Krogulec, 1994b). W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wartości współczynników filtracji w różnych skałach słabo przepuszczalnych.

Gliny, w przeciwieństwie do iłów, są skałami o znacznym zróżnicowaniu litologicznym. Dlatego podczas realizacji MGsP przyjęto, że rozpowszechnione na obszarze Polski gliny zwałowe (morenowe) nie powinny być uznawane za naturalną barierę izolacyjną odpowiednią do składowania odpadów komunalnych oraz niebezpiecznych, poza rzadkimi przypadkami, gdy ich współczynnik filtracji jest  $\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s. Ponieważ na etapie opracowywania warstwy informacyjnej „składowanie odpadów” wartość współczynnika filtracji jest nieznaną, wszystkie gliny są traktowane jako warstwa odpowiednia jedynie do składowania odpadów obojętnych, chyba że istnieją dodatkowe informacje (pochodzące z dokumentacji geologicz-

**Tab. 1. Wartości współczynnika filtracji pionowej (w m/s) niektórych skał słabo przepuszczalnych (Dąbrowski, 1982; Pazdro, 1983; Ossowski, 1985; Wiłun, 1987; Kowalski, 1989; Wysokiński, 1995; Majer, 2003a, b; Krogulec 1994a, b)**

Table 1. Vertical filtration coefficient (in m/s) for some poorly permeable rocks (Dąbrowski, 1982; Pazdro, 1983; Ossowski, 1985; Wiłun, 1987; Kowalski, 1989; Wysokiński, 1995; Majer, 2003a, b; Krogulec 1994a, b)

Skały słabo przepuszczalne <i>Poorly permeable rocks</i>	Współczynnik filtracji pionowej [m/s] <i>Vertical filtration coefficient [m/s]</i>
Gлина <i>Till</i>	$10^{-6} - 10^{-8}$ <u><math>1,2 \times 10^{-8}</math></u> $1,7 \times 10^{-9} - 0,5 \times 10^{-9}$ $10^{-8} - 10^{-10}$
Gлина piaszczysta <i>Sandy till</i>	$6,9 \times 10^{-5} - 1,5 \times 10^{-7}$ $1,1 \times 10^{-7} - 1,1 \times 10^{-8}$
Gлина pylasta <i>Loam till</i>	ca. $10^{-8}$
Gлина zwięzła <i>Dense clay</i>	$< 1,1 \times 10^{-8}$ $3 \times 10^{-10}$ $10^{-9} - 10^{-11}$
Gлина zwałowa <i>Glacial till</i>	$6,9 \times 10^{-5} - 3,5 \times 10^{-7}$ $1,0 \times 10^{-7} - 1,0 \times 10^{-9}$ <u><math>9,2 \times 10^{-9}</math></u> $0,4 \times 10^{-9}$
Gлина kaolinitowa <i>Kaolinite till</i>	$0,14 \times 10^{-9}$
Г пылсты <i>Dusty clay</i>	$10^{-8} - 10^{-9}$ <u><math>1,6 \times 10^{-9}</math></u> $3,2 \times 10^{-11} - 2,7 \times 10^{-11}$ $10^{-10} - 10^{-12}$ $10^{-11} - 10^{-12}$
Г звięзлы <i>Dense clay</i>	$0,24 \times 10^{-9}$ $0,3 \times 10^{-10}$ ca. $10^{-11}$
Г варвовы (застойскowy) <i>Varved (ice-dammed) clay</i>	$10^{-8} - 10^{-10}$ $0,24 \times 10^{-9}$ $0,3 \times 10^{-10}$ $6,8 \times 10^{-11} - 0,8 \times 10^{-11}$
Г пстры (плиоцєнскы) <i>Variagate clay (Pliocene)</i>	$10^{-9} - 10^{-12}$ $10^{-10} - 10^{-11}$ $10^{-10} - 10^{-12}$ $1,2 \times 10^{-10} - 1,7 \times 10^{-12}$
Г краковецкы (миоцєнскы) <i>Krakowiec clay (Miocene)</i>	$10^{-5} - 10^{-6}$ $2,5 \times 10^{-8} - 9,6 \times 10^{-9}$ $10^{-9} - 10^{-10}$ $9,1 \times 10^{-11} - 9,2 \times 10^{-12}$
Г септарйовы (олигоцєнскы) <i>Septaria clay (Oligocene)</i>	$10^{-9} - 10^{-10}$
Г юрскы <i>Jurassic clay</i>	$7,1 \times 10^{-8} - 8,1 \times 10^{-9}$ $10^{-8} - 10^{-10}$ $9,7 \times 10^{-9} - 3,6 \times 10^{-10}$
Гловец триасовы <i>Triassic claystone</i>	$10^{-8} - 10^{-9}$
Г триасовы <i>Triassic clay</i>	$1,7 \times 10^{-6} - 6,0 \times 10^{-9}$ $1,0 \times 10^{-10} - 1,0 \times 10^{-11}$
Г карбоñскы <i>Carboniferous clay</i>	$1,4 \times 10^{-7} - 3,3 \times 10^{-8}$ $9,5 \times 10^{-10}$

Podkreślone wartości zostały uzyskane z pomiarów wykonanych bezpośrednio w terenie; pozostałe wartości określono różnymi metodami laboratoryjnymi. Wyniki badań porównawczych współczynnika filtracji danej skały wskazują na nieco niższe wartości uzyskiwane w badaniach laboratoryjnych niż w badaniach terenowych (Krogulec, 1994b)

*Underlined values have been measured directly in the field; others were obtained with various laboratory methods. Comparison of filtration coefficients for a given rock reveals slightly lower values obtained in the lab than in the field measurements (Krogulec, 1994b)*

nych lub innych opracowań publikowanych) na temat ich przepuszczalności.

Na podstawie zaprezentowanego przeglądu opracowań dotyczących właściwości izolacyjnych oraz wartości współczynnika filtracji skał słabo przepuszczalnych (tab. 1), a także 3-letnich doświadczeń nabytych w realizacji warstwy „składowanie odpadów” w ramach MGSP, wyznaczono rodzaje skał, które mogą być wstępnie (bez prowadzenia badań terenowych) wytypowane jako naturalna bariera geologiczna (tabela 2). Wymienione rodzaje skał zostały przypisane typom litologicznym w słowniku litologii BDH, w celu wyeliminowania typów nieujętych w słowniku. Należy podkreślić, że podział skał przedstawiony w tabeli 2 został opracowany na potrzeby przeprowadzenia analizy przestrzennej danych w otworach wiertniczych. Jej intencją jest wytypowanie odpowiednich naturalnych barier geologicznych do składowania różnych typów odpadów. W tym ostatnim znaczeniu jego główną zaletą jest przyporządkowanie określonego rodzaju skały jednemu z trzech typów składowisk odpadów.

W sposób szczególny potraktowano składowiska odpadów komunalnych (najbardziej rozpowszechniony rodzaj odpadów), których składowanie stanowi najważniejszy problem w gospodarce odpadami na terenie całego kraju. W tabeli 2 wydzielono rodzaje skał o zmiennych właściwościach izolacyjnych, które w pewnych przypadkach można rozpatrywać jako potencjalną barierę izolacyjną w składowisku odpadów komunalnych. Decydujące znaczenie ma tutaj odpowiednio duża zawartość frakcji ilowej (np. ility warwowe, pyły ilaste, gliny zwietrzelinowe), korzystnie wpływająca na właściwości izolacyjne warstwy, oraz gęsta sieć spękań lub obecność deformacji tektonicznych (np. łupki ilaste, łupki margliste, margle ilaste i mułowce ilaste), a także występowanie wkładek piaszczystych w obrębie serii ilastych (np. ility piaszczyste) negatywnie wpływających na właściwości izolacyjne. Ważnym elementem w ocenie skał, które mogą pełnić rolę bariery geologicznej, zwłaszcza w składowiskach odpadów komunalnych, jest także uwzględnienie uwarunkowań regionalnych. W obszarach całkowicie pozbawionych skał ilastych o najlepszych właściwościach izolacyjnych (takich jak ility neogeńskie) lub w regionach, w których takie skały występują na zbyt dużych głębokościach (poniżej 10 m), skały o zmiennych właściwościach izolacyjnych nabierają dużego znaczenia w typowaniu obszarów nadających się do budowy składowisk odpadów komunalnych. Dotyczy to prawie całego obszaru środkowej, północnej i wschodniej Polski.

**Analiza danych zawartych w profilach otworów wiertniczych.** Podstawowym celem analizy danych z profili otworów wiertniczych jest wskazanie, na podstawie istniejących materiałów archiwalnych, naturalnej bariery geologicznej (NBG), określenie jej podstawowych cech izolacyjnych oraz wskazanie typu odpadów (O, K, N), dla którego dana bariera będzie wystarczająca. Omawiana analiza składa się z 8 etapów (ryc. 1).

**Etap I. Wyznaczanie warstw izolacyjnych z określeniem ich typu izolacyjności.** Pierwsza faza polega na wskazaniu w profilu otworu wiertniczego wszystkich możliwych warstw izolacyjnych (słabo przepuszczalnych) i określeniu ich typu izolacyjności (O, K, N), zgodnie z tabelą 2. Na tym etapie o typie izolacyjności decyduje



**Tabela 2. Rodzaje skał, które można uznać za naturalną barierę geologiczną (NBG) spełniającą wymagania lokalizacji składowisk odpadów O, K, N**

Table 2. Rock types that can be regarded as a natural geological barrier (NBG), conforming to the standards of O, K, N waste repositories

W składowiskach odpadów O (obojętnych) (miąższość NBG $\geq 1$ m) <i>For neutral (O) waste storage (NBG thickness <math>\geq 1</math> m)</i>	W składowiskach odpadów K (komunalnych) (miąższość NBG 1-5 m) <i>For municipal (K) waste storage (NBG thickness 1-5 m)</i>	W składowiskach odpadów N (niebezpiecznych) (miąższość NBG $\geq 5$ m) <i>For hazardous (N) waste storage (NBG thickness <math>\geq 5</math> m)</i>
Gliny (Q) <i>Tills (Q)</i> Gliny piaszczyste (Q) <i>Sandy tills (Q)</i> Gliny pylaste (Q) <i>Loamy tills (Q)</i> Gliny zwałowe (Q) <i>Glacial tills (Q)</i>	Iły zwietrzelinowe skał osadowych (Q) (np. kaolinitowe, illitowe, montmorillonitowe) <i>Weathering clays of sedimentary rocks (Q)</i> (e.g., kaolinite, illite, montmorillonite) Iły pstre, poznańskie (Ng) <i>Variegated, Poznań clays (Ng)</i> Iły krakowieckie (Ng) <i>Krakowiec clays (Ng)</i> Iły septariowe (Pg) <i>Septaria clays (Pg)</i> Iły mezozoiczne (Mz) <i>Mesozoic clays (Mz)</i> Iły paleozoiczne (Pz) <i>Palaeozoic clays (Pz)</i> Iły bentonitowe i bentonity (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Bentonite clays and bentonites (Ng, Pg, Mz, Pz)</i> Iłowce (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Claystones (Ng, Pg, Mz, Pz)</i> Hołupki (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Argillaceous shales (Ng, Pg, Mz, Pz)</i>	Iły zwietrzelinowe skał osadowych (Q) (np. kaolinitowe, illitowe, montmorillonitowe) <i>Weathering clays of sedimentary rocks (Q)</i> (e.g., kaolinite, illite, montmorillonite) Iły pstre, poznańskie (Ng) <i>Variegated, Poznań clays (Ng)</i> Iły krakowieckie (Ng) <i>Krakowiec clays (Ng)</i> Iły septariowe (Pg) <i>Septaria clays (Pg)</i> Iły mezozoiczne (Mz) <i>Mesozoic clays (Mz)</i> Iły paleozoiczne (Pz) <i>Palaeozoic clays (Pz)</i> Iły bentonitowe i bentonity (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Bentonite clays and bentonites (Ng, Pg, Mz, Pz)</i> Iłowce (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Claystones (Ng, Pg, Mz, Pz)</i> Hołupki (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Argillaceous shales (Ng, Pg, Mz, Pz)</i>
<b>Wydzielane warunkowo w składowiskach odpadów K o zmiennych właściwościach izolacyjnych (miąższość NBG <math>\geq 1</math> m)</b> <i>Conditional for K waste storage with variable insulative properties (NBG thickness <math>\geq 1</math> m)</i>		
Iły zastoiskowe, warwowe (Q) <i>Varved, ice-dammed lacustrine clays (Q)</i> Iły yoldiowe – tzw. elbląskie (Q) <i>Yoldia ("Elbląg") clays (Q)</i> Gliny zwietrzelinowe skał osadowych (Q) (np. kaolinitowe, illitowe) <i>Weathering clays of sedimentary rocks (Q)</i> (e.g., kaolinite, illite clays)	Mułki ilaste (Q, Ng, Pg) <i>Clayey silts/muds (Q, Ng, Pg)</i> Pyły ilaste (Q, Ng, Pg) <i>Clayey dusts (Q, Ng, Pg)</i> Iły piaszczyste (Q, Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Sandy clays (Q, Ng, Pg, Mz, Pz)</i>	Mułowce ilaste (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Clayey mudstones (Ng, Pg, Mz, Pz)</i> Margle ilaste (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Silty marls (Ng, Pg, Mz, Pz)</i> Łupki ilaste (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Argillaceous shales (Ng, Pg, Mz, Pz)</i> Łupki margliste (Ng, Pg, Mz, Pz) <i>Marly shales (Ng, Pg, Mz, Pz)</i>

Q — czwartorzęd, Ng — neogen, Pg — paleogen, Mz — mezozoik, Pz — paleozoik  
 Q — Quaternary, Ng — Neogene, Pg — Paleogene, Mz — Mesozoic, Pz — Palaeozoic

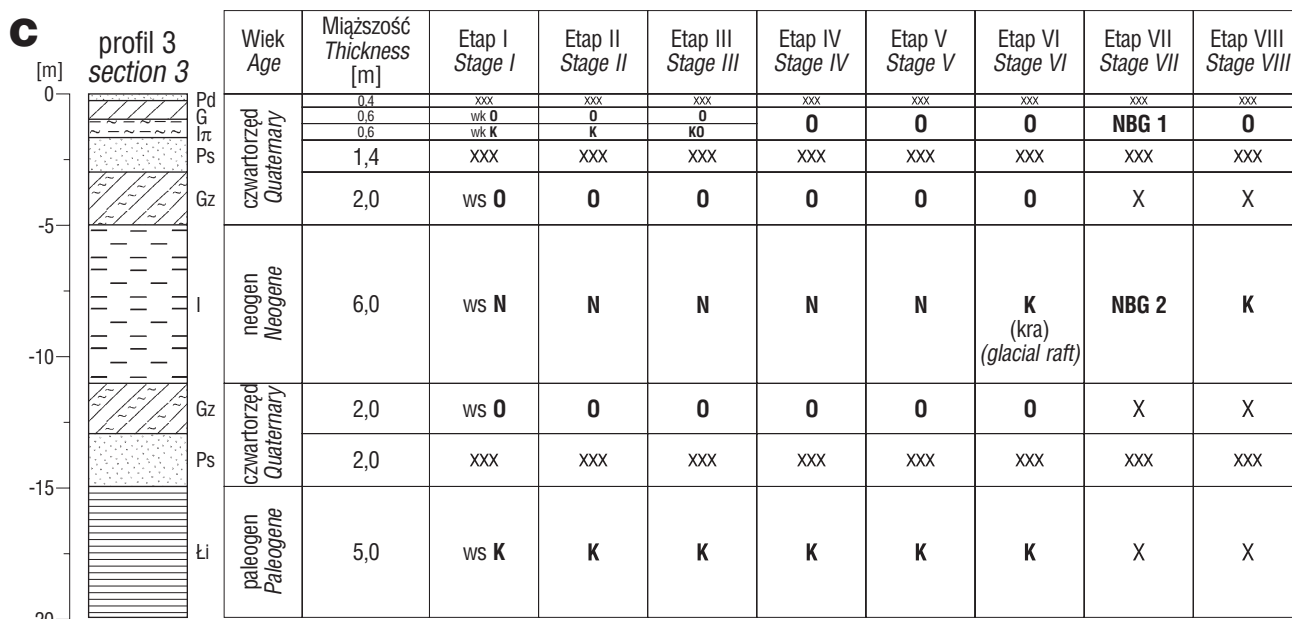
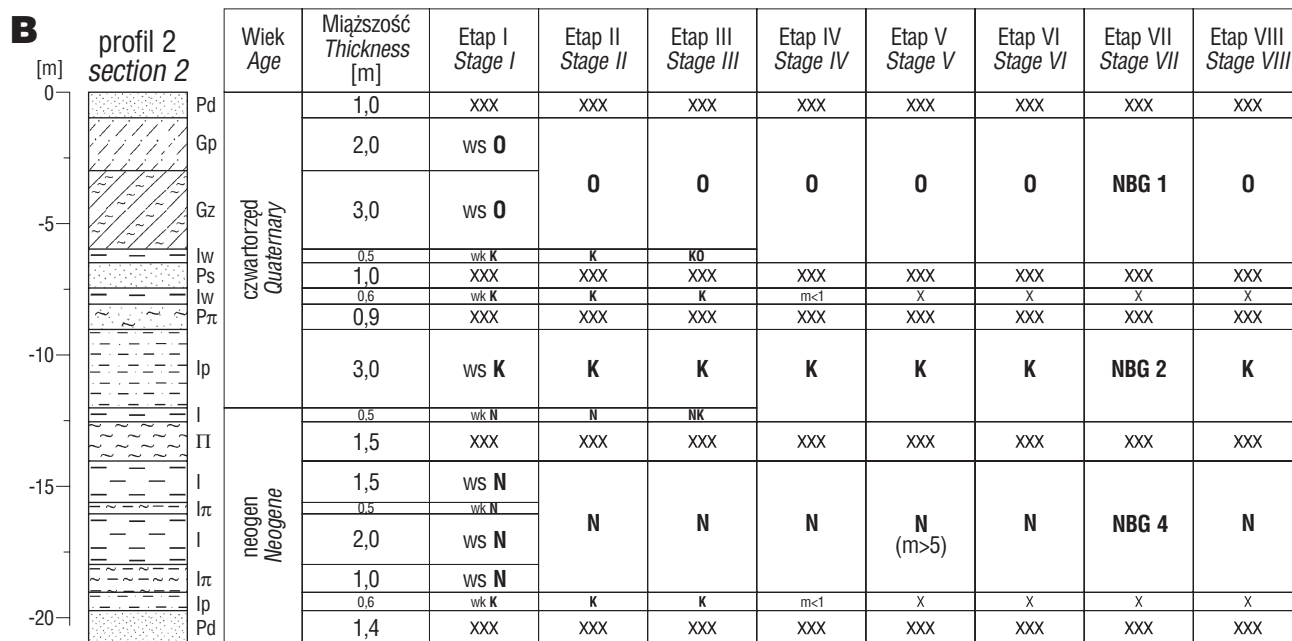
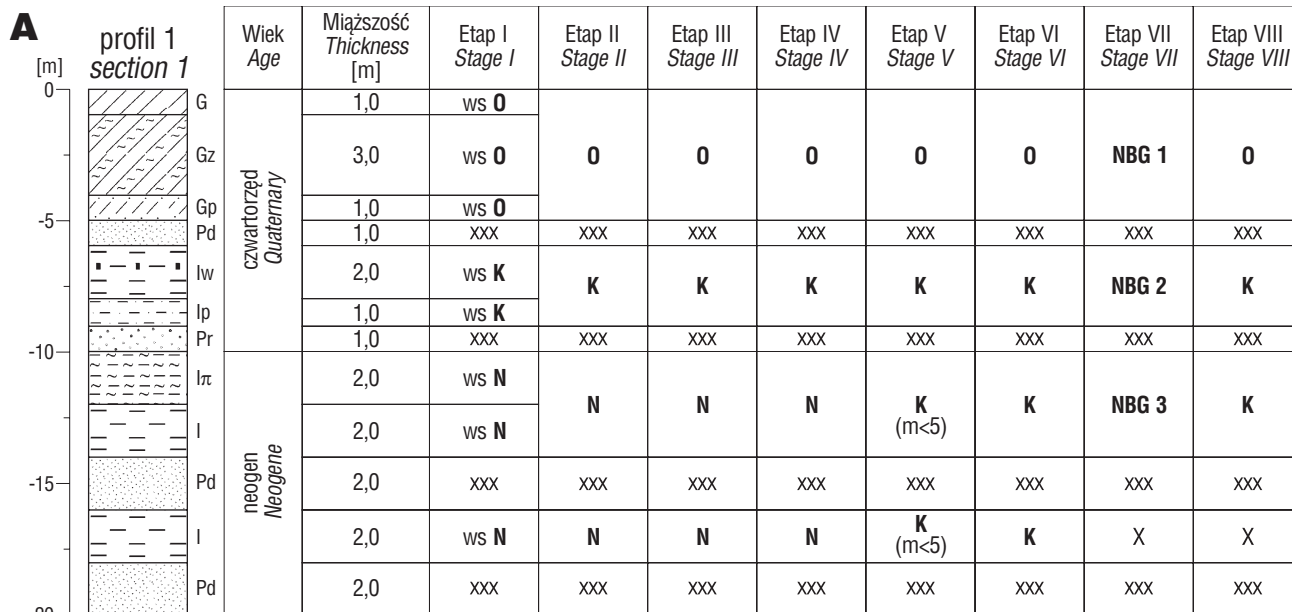
przede wszystkim litologia i wiek. Warstwy izolacyjne o miąższości  $< 1$  m zostają uznane za wkładki. Warstwy przepuszczalne, które nie zostały wymienione w tabeli 2, są oznaczane jako nieprzydatne (symbol XXX) i zostają pominięte w dalszej analizie (ryc. 1).

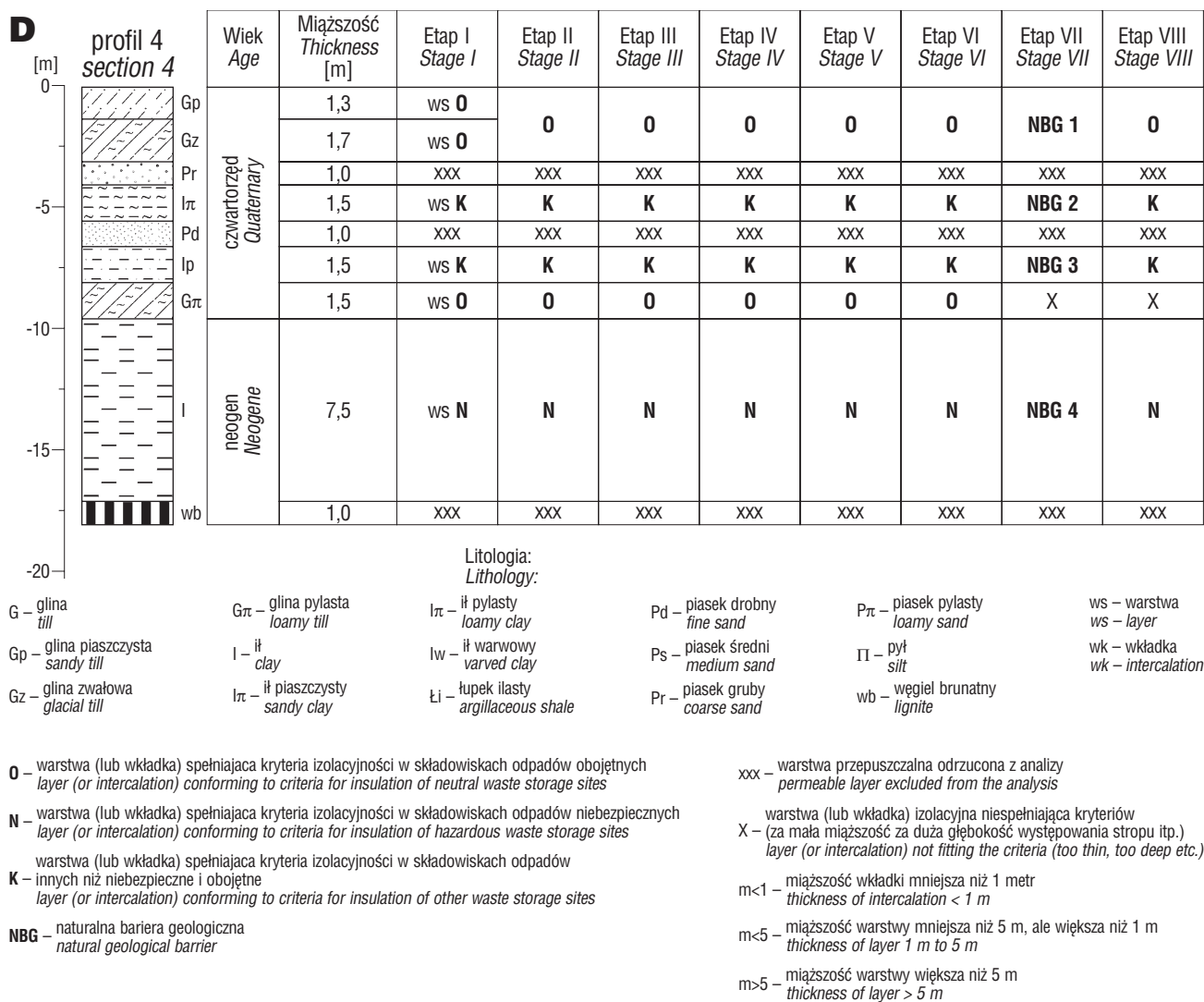
**Etap II. Wyznaczanie pakietów izolacyjnych jednowarstwowych i wielowarstwowych prostych.** To stadium polega na łączeniu wydzielonych w I etapie warstw izolacyjnych w pakiety izolacyjne jednowarstwowe lub wielowarstwowe proste. W jeden pakiet wielowarstwowy prosty są łączone warstwy, warstwy z wkładkami lub wkładki, które mają taki sam typ izolacyjności i w profilu występują bezpośrednio po sobie. W profilu 1 (ryc. 1A) występują trzy warstwy izolacyjne: „głina”, „głina zwałowa” i „głina piaszczysta” o takim samym typie izolacyjności O. Zostaną one zatem połączone w jeden pakiet prosty o typie izolacyjności O. Identycznie postępuje się, gdy wydziela się pakiety proste o typie izolacyjności K i N (ryc. 1A). Poszczególne pakiety są oddzielone od siebie warstwami przepuszczalnymi (np. piaskami, żwirami czy pyłami, oznaczonymi w etapie I symbolem XXX) lub następują bezpośrednio po sobie.

**Etap III. Wyznaczanie pakietów izolacyjnych wielowarstwowych złożonych.** Trzecim krokiem jest łączenie występujących bezpośrednio po sobie warstw izolacyjnych z wkładkami (ryc. 1B) lub samych wkładek (ryc. 1C) o róż-

nym typie izolacyjności (np. O i K, O i N, K i N) w pakiety izolacyjne złożone. Łączenie w jeden pakiet izolacyjny złożony następuje wtedy, gdy izolacyjność całego pakietu się poprawia, a nie pogarsza. Przykładowo — do warstwy o typie izolacyjności O (np. glina) dołączymy wkładkę o typie izolacyjności K (np. ilt warwowy) lub N (np. ilt pstry). Otrzymamy wówczas pakiet złożony, ale właściwości izolacyjne takiego gliniasto-ilastego pakietu są lepsze niż pakietu składającego się z samych glin (ryc. 1B i C). W myśl powyższej zasady do warstwy izolacyjnej o typie izolacyjności K możemy dołączyć jedynie wkładkę o typie izolacyjności N (gdyż poprawimy w ten sposób izolacyjność całego pakietu), nie dołączymy jednak wkładki o typie izolacyjności O (gdyż obniżymy wówczas izolacyjność całego pakietu). Do warstwy o typie izolacyjności N nie można dołączyć żadnych wkładek o innym typie izolacyjności (ryc. 1B). Typ izolacyjności całego pakietu złożonego zależy od warstwy wykazującej najniższą izolacyjność.

**Etap IV. Usuwanie pakietów izolacyjnych o miąższości  $< 1$  m.** Po wyznaczeniu wszystkich pakietów jednowarstwowych oraz wielowarstwowych prostych i złożonych następuje obliczenie ich miąższości. Pakiety, których miąższość wynosi  $< 1$  m, zostają oznaczone symbolem X i nie są uwzględniane w dalszej analizie (ryc. 1B), ponieważ zgodnie z rozporządzeniem minimalna





Ryc. 1. Ocena izolacyjności naturalnej bariery geologicznej na przykładzie profili litologicznych  
Fig. 1. Evaluation of insulating properties of a natural geological barrier on examples of lithological sections

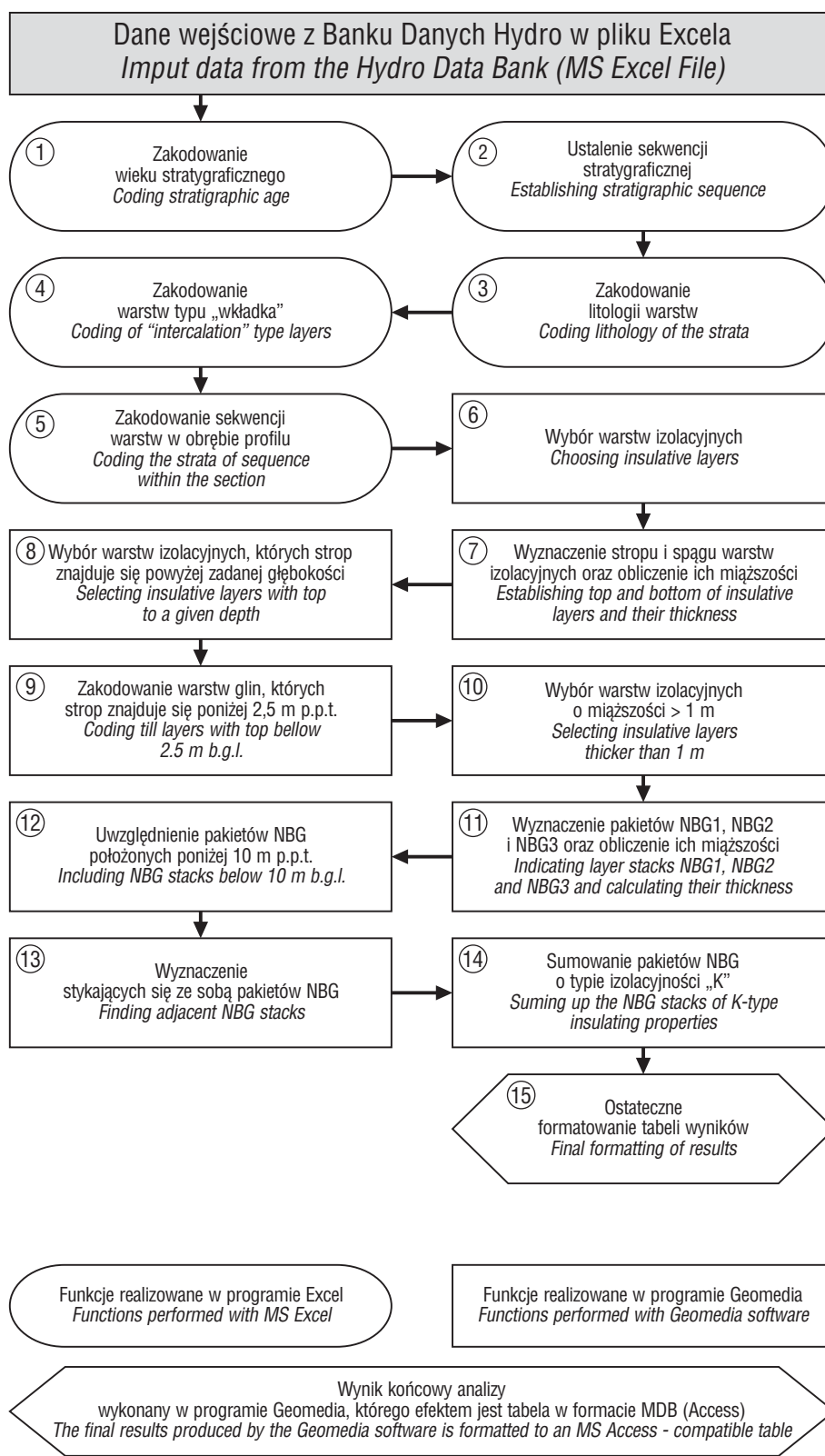
miąższość naturalnej bariery geologicznej odpowiedniej do składowania odpadów musi wynosić  $\geq 1$  m.

**Etap V. Sprawdzanie miąższości pakietów izolacyjnych o typie izolacyjności N.** Do tego etapu wszystkie pakiety o typie izolacyjności N zostały wyróżnione na podstawie litologii i wieku warstwy izolacyjnej, bez uwzględnienia ich miąższości. Zgodnie z rozporządzeniem do lokalizacji składowisk odpadów typu N jest wymagana miąższość  $\geq 5$  m. Jeżeli miąższość pakietu wynosi co najmniej 5 m, spełnia on wymagania określone dla odpadów typu N (ryc. 1B, D), jeżeli 1–5 m — spełnia wówczas wymagania ustalone dla składowisk odpadów typu K (ryc. 1A).

**Etap VI. Sprawdzanie obecności zaburzeń glaciotektonicznych w obrębie pakietów izolacyjnych o typie izolacyjności N.** W tym stadium określamy, czy dany pakiet o typie izolacyjności N nie jest krą (porwakiem), na co będzie wskazywać obecność warstw młodszych poniżej warstw starszych. Jeżeli analizowany pakiet izolacyjny jest krą, należy zmienić jego typ izolacyjności na K (ryc. 1C). Wynika to z zapisu w rozporządzeniu, że składowisk odpadów niebezpiecznych i komunalnych nie należy lokalizować na terenach zaangażowanych glaciotektonicznie lub

tektonicznie, poprzecinanych uskokami, spękanych lub uszczelinowanych. Autorzy artykułu uważają, że zapis ten w odniesieniu do obszarów zaburzonych glaciotektonicznie jest sformułowany zbyt ogólnie i nie uwzględnia specyficznej formy deformacji, którą jest kra lodowcowa. W obrębie tego typu formy lokalizacja składowiska komunalnego powinna być dopuszczona, a ewentualna eliminacja takiego obszaru powinna nastąpić dopiero po etapie szczegółowych badań geologiczno-inżynierskich. Zestaw danych zawartych w BDH nie pozwala jednak na określenie zaangażowania tektonicznego analizowanych pakietów izolacyjnych (brak w opisach profili wierceń informacji o spękaniach, szczelinach czy uskokach).

**Etap VII. Wyznaczanie naturalnej bariery geologicznej (NBG) o określonym typie izolacyjności.** W tym etapie zostaje wskazana naturalna bariera geologiczna (NBG) i zostają określone jej podstawowe cechy (litologia, miąższość, głębokość stropu i spągu) oraz typ izolacyjności (O, K, N). W trakcie realizacji MGSP uznano, że maksymalna głębokość położenia stropu warstwy izolacyjnej nie powinna przekraczać 10 m. W przypadku naturalnych barier izolacyjnych występujących na większych głębokościach (czyli poniżej 10 m) koszty usunięcia przykrywających warstw mogą być zbyt wysokie. Mało opłacalne



**Ryc. 2.** Schemat algorytmu przetwarzania danych w celu wytypowania pakietów NBG  
**Fig. 2.** Schema of data processing algorithm for choosing NBG stacks

może się okazać także wykorzystanie płycej występujących warstw izolacyjnych, jeśli są one przykryte nadkładem skał litych (np. piaskowców, zlepieńców, wapieni, skał magmowych lub metamorficznych).

Drugie założenie na tym etapie ogranicza wyznaczanie NBG do składowisk odpadów obojętnych (O). Z uwagi na

powszechność występowania kompleksów glin zwałowych na powierzchni terenu (spełniających wymagania izolacyjności w składowiskach typu O) oraz niewielkie zapotrzebowanie na tego typu składowiska, wskazuje się NBG dla odpadów obojętnych tylko wtedy, gdy jej strop występuje na głębokości 0–2,5 m.



W ten sposób wyznaczamy bariery geologiczne: NBG1 (o stropie do 2,5 m) oraz NBG2 i NBG3, których strop znajduje się na głębokości 2,5–10 m (ryc. 1). W profilu każdego otworu wiertniczego mogą występować następujące rodzaje barier: wszystkie trzy (NBG1 i NBG2 i NBG3), dwie (NBG1 i NBG2 lub NBG2 i NBG3) albo jedna (NBG1 lub NBG2).

W strefie do głębokości 15 m może się znajdować strop kolejnej bariery geologicznej (NBG4), która powinna być uwzględniona w analizie, jeżeli jej typ izolacyjności lub miąższość są korzystniejsze niż barier NBG1–NBG3 (ryc. 1B, D).

**Etap VIII. Wskazanie otworów o korzystnych warunkach do lokalizacji składowisk odpadów obojętnych i komunalnych.** W ostatniej fazie analizy sprawdza się, czy bezpośrednio pod NBG1 o typie izolacyjności O, której spąg znajduje się na głębokości poniżej 10 m, występuje pakiet o typie izolacyjności K lub N. Zapis O/K lub O/N oznacza, że bezpośrednio pod NBG1, która spełnia wymagania określone dla składowisk odpadów obojętnych (np. glina zwałowa), znajduje się pakiet o lepszym typie izolacyjności — K (np. il zastoiskowy) lub N (np. il pstry). Z uwagi na głębokie występowanie (strop poniżej 10 m) następnej bariery, jej bezpośrednie wykorzystanie jako warstwy izolacyjnej jest bardzo mało prawdopodobne. Jednakże stanowi ona dodatkowe zabezpieczenie przed zanieczyszczeniem poziomów wodonośnych. Opisana sytuacja jest korzystniejsza niż w przypadku występowania warstw przepuszczalnych (np. piasków, żwirów itp.) bezpośrednio pod NBG1. Podobną analizę należy wykonać dla NBG1 o typie izolacyjności K, poniżej której bezpośrednio występuje pakiet o typie izolacyjności N (K/N).

Pełna charakterystyka NBG powinna również uwzględnić obecność stwierdzonych poziomów wodonośnych powyżej i poniżej danej bariery izolacyjnej, a takie dane są dostępne w BDH.

### Schemat algorytmu

Sposób realizacji celu, czyli wyznaczenia naturalnej bariery geologicznej na podstawie danych z profili otworów wiertniczych, został opisany jako algorytm (ryc. 2) w piętnastu krokach, w dwóch środowiskach aplikacyjnych: programie Excel (pierwszych pięć kroków) oraz programie Geomedia Professional (kolejne dziesięć kroków). Ostateczne wyniki umieszczono w tabeli Access, z której istnieje możliwość przeniesienia ich do innych programów, np. Excela. Kolejność realizacji poszczególnych zadań algorytmu jest nieco inna niż w opisanym wcześniej, ośmioetapowej metodyce. Wynika to ze specyfiki środowiska Excel i Geomedia Professional. Wynik końcowy jest jednak identyczny — selekcja NBG o określonym typie izolacyjności i do zdefiniowanej głębokości.

### Podsumowanie

Uzyskane w wyniku opisanego analizy punktowe informacje o występowaniu utworów wykazujących odpowiednie cechy izolacyjne stanowią bardzo istotne uzupełnienie

charakterystyki obszarów wytypowanych do lokalizowania składowisk odpadów na MGSP. Opisują one miejsca o najlepszych właściwościach izolacyjnych do lokalizowania składowisk typu O, K i N, zarówno w strefie przypowierzchniowej (w przypadku NBG1), jak i w strefach głębszych (w przypadku NBG2 i NBG3). Jest to ważna informacja, pomocna w poszukiwaniach kompleksów geologicznych odpowiednich do lokalizowania składowisk typu K i N, gdyż skały ilaste, spełniające wymagania izolacyjności w tych typach odpadów, rzadko odsłaniają się bezpośrednio na powierzchni (gdzie są na ogół w pewnym stopniu zwietrzałe), natomiast znacznie częściej znajdują się na większych głębokościach.

Analiza przestrzenna danych z profili otworów, zastosowana do wyboru najkorzystniejszych pakietów izolacyjnych i oceny typu ich izolacyjności, pozwala na obiektywny i szybki przegląd otworów z dowolnego obszaru: województwa, regionu lub arkusza itd. Wyniki są jednoznaczne, porównywalne i łatwe do interpretacji, a wykonawcy poszczególnych arkuszy mogą wykorzystać te informacje do opracowania tekstu objaśniającego MGSP. Jest to jedna z możliwości, jaką daje ta analiza. Opisany w tym artykule algorytm można rozbudować o kolejne istotne informacje, które mają wpływ na wybór najlepszych obszarów do lokalizacji składowisk odpadów — np. dane o wielkości powierzchni i głębokości posadowienia dna takiego obiektu.

### Literatura

- BRAŃSKI P. 2002 — Il formacji poznańskiej — kopaliny służące ochronie i rekonstrukcji środowiska naturalnego. *Prz. Geol.*, 50, 3: 266–267.
- DĄBROWSKI S. 1982 — Współczynnik filtracji warstw słabo przepuszczalnych w świetle badań polowych i modelowych. *Tech. Poszuk. Geol.*, 21, 4: 14–17.
- FRANKOWSKI Z. 2004 — Występowanie ilów formacji poznańskiej w Warszawie. [W:] Seminarium „Ily plioceńskie Warszawy”, Warszawa, 26.02.2004. *Pr. Inst. Tech. Bud.*, 33, 3: 5–13.
- Instrukcja** opracowania Mapy geosrodowiskowej Polski w skali 1 : 50 000, 2005. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- KOWALSKI W.C. 1989 — *Geologia inżynierska*. Wyd. Geol., Warszawa.
- KROGULEC E. 1994a — Badanie własności filtracyjnych ilastych osadów zastoiskowych. *Tech. Poszuk. Geol.*, 2-3: 49–54.
- KROGULEC E. 1994b — Wpływ metodyki badań na otrzymane wartości współczynnika filtracji osadów słabo przepuszczalnych. *Prz. Geol.*, 42, 4: 276–279.
- MAJER E. 2003a — Właściwości przesłonowe ilów do budowy składowisk odpadów. [W:] Materiały 9. Konferencji „Problemy zagospodarowania odpadów” Wisła, 9–12.06.2003. Agencja Gospodarki Odpadami Agros, Katowice: 155–164.
- MAJER E. 2003b — Zastosowanie ilów beidellitowych z nadkładu KWK Bełchatów S.A. jako materiału do budowy składowisk odpadów. *Gór. Odkryw.*, 45, 6: 56–61.
- OSSOWSKI J. 1985 — Współczesne problemy pomiaru wodoprzepuszczalności ośrodków spoiwych. [W:] Aktualne problemy hydrogeologii. Materiały 3. Ogólnopolskiego Sympozjum. Kraków-Karniowice 28–30.05.1985. Wyd. AGH, Kraków: 545–552.
- PAZDRO Z. 1983 — *Hydrogeologia ogólna*. Wyd. Geol., Warszawa.
- WIŁUN Z. 1987 — *Zarys geotechniki*. Wyd. 3 popr. uzup. WKŁ, Warszawa.
- WYSOKIŃSKI L. 1995 — Projektowanie przesłon izolacyjnych na składowiskach odpadów komunalnych. Instrukcja ITB nr 337. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 4.10.2006 r.  
Akceptacja do druku 16.2.2007 r.