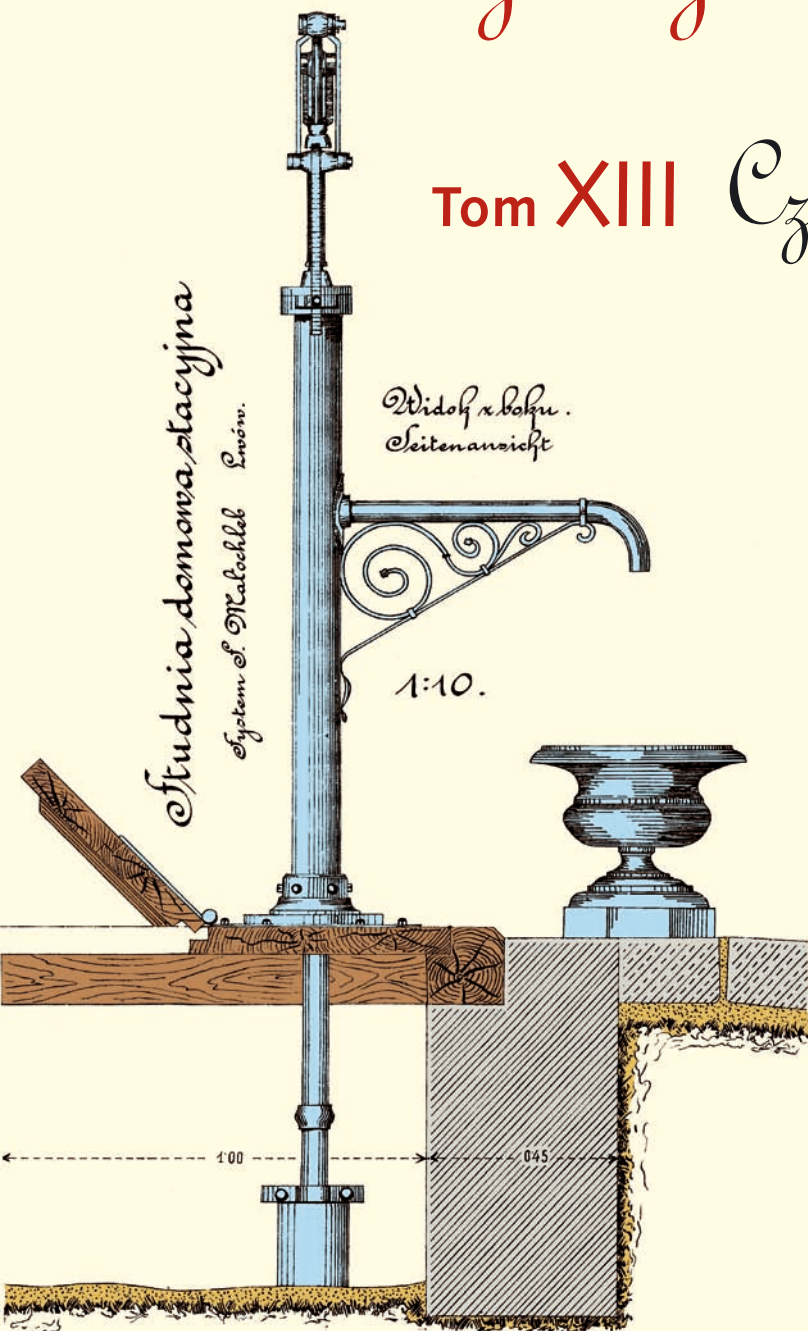


# Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 2.





Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez  
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska  
Wojciech Ciężkowski  
Józef Górski  
Andrzej Kowalczyk  
Ewa Krogulec  
Grzegorz Malina  
Jerzy Małecki  
Marek Marciniak  
Jacek Motyka  
Marek Nawalany  
Jan Przybyłek  
Andrzej Rózkowski  
Andrzej Sadurski  
Andrzej Szczepański  
Stanisław Staško  
Stanisław Witczak  
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku  
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ : pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, [www.pretext.com.pl](http://www.pretext.com.pl)

Druk: ROMA-POL, [www.romapol.pl](http://www.romapol.pl)

ISBN-13 978-83-88927-16-4

Tomasz Kasela, Knud Erik Klint

**Badania szczelinowatości nadkładu drobnoziarnistych osadów morenowych pod kątem zdolności ochronnych poziomu wodonośnego w rejonie byłego lotniska wojskowego Kluczewo**

**Investigation of Fractures in Clay Tills Cover for an Aquifer Protection at the Former Military Airport in Kluczewo**

**Słowa kluczowe** szczelinowatość, gliny morenowe, substancje ropopochodne, zdolności ochronne nadkładu

**Key words** clay tills, LNAPL, cover protective capacity

**Abstract** In a clay tills cover of an aquifer in the former Kluczewo airport systematic fractures were discovered that were generated by deformation processes. In glacio-lacustrine sediments desiccation fractures were found. In basal till glaciotectionic fractures were discovered. In the paper the methodology of fracture investigation and its classification were presented. Systematic fractures in clay tills constitute preferential migration paths for free-phase oil hydrocarbons (LNAPL) to the aquifer. Thus, such a clay tills should not be considered to form a sufficient natural protection for groundwater reservoirs.

## 1. Wstęp

Obecności drobnoziarnistych osadów morenowych w nadkładzie poziomu wodonośnego, w tym glin polodowcowych powszechnie występujących w północnej Europie, zwykle przypisywało się zdolności ochronne warstw wodonośnych przed zanieczyszczeniami z powierzchni. Pomimo tego faktu, wielokrotnie wykryto zanieczyszczenia substancjami ropopochodnymi (SR) w tak chronionych warstwach wodonośnych i nie potrafiono wyjaśnić przyczyny szybkiego przenikania SR do wód podziemnych.

Badania wykonane w Danii i na Grenlandii wykazały, że glinach polodowcowych w strefie aeracji zwykle wykształcona jest naturalna szczelinowatość będąca wynikiem procesów glacictonicznych, neotektonicznych lub kurczenia (Klint, 2006). Zwłaszcza systematyczna szczelinowatość tworzy uprzywilejowane drogi przepływu w gruntach nadkładu (Fredericia, 1990, 1993).

Na terenie poradzieckiego lotniska Kluczewo w Stargardzie Szczecińskim, pomimo występowania nadkładu drobnoziarnistych osadów morenowych, doszło do silnego zanieczyszczenia wód podziemnych SR. Nie wyjaśniono przyczyny łatwości pionowego przesączania lekkich cieczy organicznych (LNAPL) jako produktu wolnego SR przez słabo przepuszczalne grunty strefy aeracji (Kasela, 2002). W latach 2004-2007 prace wykonane w ramach 6. Projektu Ramowego STRESOIL, między innymi pozwoliły na zbadanie naturalnej szczelinowatości gruntów nadkładu na terenie zanieczyszczonej SR Centralnej Stacji Tankowania (CST) i wyjaśniły przyczynę słabych zdolności ochronnych gruntów spoistych nadkładu na terenie lotniska Kluczewo. W artykule omówiono wyniki badań terenowych dotyczących litologii i szczelinowatości gruntów spoistych nadkładu, wpływ szczelin na przesączanie LNAPL, a także przedstawiono metodykę badań polowych. Metodyka ta została wypracowana na terenie Danii (Klint, 2001, 2004). Zasluguje ona na rozpowszechnienie w Polsce, ze względu na powszechność występowania osadów morenowych w nadkładach warstw wodonośnych.

## 2. Metodyka badań

Badanie szczelinowatości wymagało wykonania 2 specjalnych wykopów badawczych, o wymiarach ok. 10 · 10 m i głębokość ok. 5 m. Wykonano również 4 transeje o głębokości ok. 2,5 m i liczne wiercenia. Wyniki badań terenowych pozwoliły na rozpoznanie przestrzennej zmienności litologicznej osadów, analizy struktur sedymentacyjnych, badanie elementów kierunkowych świadczących o ruchu łądolodu (np. imbrykacji i lineacji otoczków), struktur deformacyjnych, a także oceny wytrzymałości osadów. Podstawowe prace były ukierunkowane na kartowanie szczelin, makroporów pochodzenia biologicznego oraz przewartwień piaszczystych, co wykonano na dwóch prostopadłych ścianach wykopu, aby uzyskać przestrzenny obraz tych struktur. Właściwa charakterystyka i klasyfikacja osadu jest istotna dla oceny genezy i charakteru występującej szczelinowatości (Klint, 2006). Zastosowano klasyfikację osadów morenowych dla potrzeb badania szczelinowatości (tab. 1-2) oraz klasyfikację szczelin (tab. 3-4). Pomimo, że klasyfikacje zostały wypracowane na terenie Danii, to są one uniwersalne i zaleca się ich stosowanie w Polsce.

**Tabela 1.** Klasyfikacja podlodowcowych osadów morenowych dla potrzeb badania szczelinowości (Klint, 2004; Klint i in., 2005)  
**Table 1.** Classification of subglacial tills for fractures examination (Klint, 2004, Klint et al., 2005)

Podlodowcowe/denne osady morenowe (Subglacial Tills) (Basal Tills)	Proces depozycji	Szczególna cecha charakterystyczna
Denny osad morenowy (Lodgement till) Typ-A	Osad formowany w wyniku akumulacji warstwy osadu i jego deformacji przez poruszający się lodowiec. A - dominują deformacje ciągłe powstałe zapewne w warunkach nawodnienia	Zwykle masywne. Obecność rys i wyżłobień na materiale skalnym. Bruki morenowe. Liczne eratyki.  A - Niska lub średnia wytrzymałość, masywne spoiwo, zazwyczaj bez szczelin, niekiedy szczeliny hydrauliczne, sporadyczne płaszczysty ścięcia. Tekstura średnio zbita. Fałdy izoklinalne.
Typ-B	B - dominują deformacje nieciągłe powstałe zapewne w warunkach odwodnienia	B - Wysoka wytrzymałość, masywne spoiwo, struktura klastyczna. Systematyczne uskoki, systematyczne szczeliny: płaszczysty ścięcia, szczeliny z rozszerzania i niskokątowe szczeliny ze ścięcia.
Zdeformowany osad morenowy (Deformation till) Typ A Typ B	Osad będący wynikiem deformacji podłoża skalnego przez poruszający się lodowiec.	Przeważa materiał lokalnego. Obecność deformacji spotykanych w dennych osadach morenowych.
Glacitektonit (Glacitectonite)	Osad jest brekcją glacialną uformowaną w rezultacie zgniatania i kruszenia skał podłoża przez poruszający się lodowiec.	A – Dominują deformacje ciągłe. Niska wytrzymałość. B – Dominują deformacje nieciągłe. Wysoka wytrzymałość.
Podlodowcowy osad wytopiskowy (Subglacial melt-out till)	Osad deponowany przez powolne wytapianie materiału ze spągu stagnującego lodowca.	Średnia/wysoka wytrzymałość, silnie zdeformowane (zbrekcjowane) przejście osadu od skał podłoża. Osad zawiera wciąż rozpoznawalny materiał podłoża zmieszany z materiałem morenowym.  Niska wytrzymałość. Tekstura zbita, struktura klastyczna, ugięcia lamin nad klastami. Klasy mniej otoczone niż w dennym osadzie morenowym. Częste kry materiału podłoża. Zwykle bez szczelin.

**Tabela 2.** Klasyfikacja nadlodowcowych osadów morenowych dla potrzeb badania szczelinowatości (Klint, 2004; Klint i in., 2005)  
**Table 2.** Classification of supraglacial tills for fractures examination (Klint, 2004, Klint et al., 2005)

Nadlodowcowe osady morenowe (Supraglacial Tills)	Proces depozycji	Szczególna cecha charakterystyczna
Spływowy osad morenowy (Flow till)	Osad złożony z materiału uwalnianego przez lodowiec lub osadu świeżo zdeponowanego, który został redeponowany przez procesy grawitacyjne.	Niska wytrzymałość. Urozmaicony materiał klastyczny, czasami warstwony z inkluzjami osadów fluwioglacjalnych. Rzadka orientacja szczelin i osi fałdów. Czasami sekwencje gruzów spięrzonych przez spływy. Mogą występować nie systematyczne fałdy, uskoki i szczeliny w rejonach topnienia brył martwego lodu.
Nadlodowcowy osad wytopiskowy (Supraglacial melt-out till)	Osad złożony z wolno wytapianego materiału lodowcowego bez jego redepozycji.	Niska wytrzymałość. Osady wysortowane oraz nie wysortowane. Niewielkie baseny z pierwotnymi strukturami sedymentacyjnymi, czasami z fałdami o małej skali; powstałymi przez struktury zawalowe po wytapieniu brył martwego lodu.
Osady ze zrzucania (Waterlain Tills) (drop-till)	Lodowce lub góry lodowe pływające w jeziorach lub morzach zrzucają materiał do osadów dennych, czasami widoczne deformacje wywołane grzeźnięciem otoczaka w osadzie. Niekiedy występują turbidyty.	Osady jezior lodowcowych: zwykle bogate w materiał ilasty, miększe czasami laminowane spoiwo zawiera materiał zrzucony. Rzadkie tekstury, niekiedy zdeformowane soczewki piaszczyste, poligonalne szczeliny z wysychania powyżej zwierciadła wody podziemnej. Morskie osady pochodzenia lodowcowego: jak powyżej lecz zawierające morską faunę.

**Tabela 3.** Klasyfikacja szczelin glaciektonicznych w osadach morenowych (Klint, 2004; Klint i in., 2005)  
**Table 3.** *Glacitectonic fractures types and characteristic in diamict deposits (Klint, 2004, Klint et al., 2005)*

Typy szczelin	Typowy przebieg szczeliny	Kształt, długość	Kształt szczeliny (skala w m) Charakter i chropowatość powierzchni (skala w cm)
Glaciektonity ( <i>Glacitectonites</i> )	Horyzontalne zbrekcjowane strefy ścienia	0.1–1 m grubość stref	Małe nieregularne zagłębienia (średnica > 1–4 cm)
Strefy ścienia/ Płaszczyzny ścienia ( <i>Shear zones/</i> <i>Shear planes</i> )	Systematyczne. Horyzontalne, prawie horyzontalne.	2–>20 m długości	Kształt: prostoliniowy–przypadkowy Charakter pow.: płaska–falowana Chropowatość pow.: lustra tektoniczne–chropowata Częste wypełnienie pyłem/drobnym piaskiem
Niskokatowe szczeliny ze ścienia ( <i>Low-angle shear-fractures</i> )	Systematyczne. Upad ukośny w dół lodowca, bieg prostopadły do kierunku ruchu lodowca.	1–>12 m	Kształt: łyżkowaty-sigmoidalny Charakter pow.: płaska-pofalowana Chropowatość pow.: lustra tektoniczne–chropowata, często wypełnione pyłem lub drobnym piaskiem
Sprężone szczeliny ze ścienia ( <i>Conjugating shear fractures</i> )	Systematyczne. Ukośne/pionowe, Bieg prostopadły do kierunku ruchu lodowca	1–>12 m	Kształt: prostoliniowy/łyżkowaty/sigmoidalny Charakter pow.: płaska/pofalowana Chropowatość pow.: lustra tektoniczne/wygładzona/szorstka
Kąt pomiędzy sprzężzonymi zespołami ok. 30°			
Szczeliny z rozszerzania ( <i>Extension fractures</i> )	Systematyczne. Upad: Pionowy, Bieg: równoległy do ruchu lodowca.	0.1–>10 m	Kształt: przypadkowy/prostoliniowy Charakter pow.: nieregularna/pofalowana Chropowatość pow.: szorstka
Szczeliny hydrauliczne ( <i>Hydro fractures</i> )	Upad: pionowy lub horyzontalny, generalnie w dół lodowca, Bieg prostopadły do kierunku ruchu lodowca, Wypełnione: Systematyczne	0.1–>2 m Grubość kilka cm	Kształt: przypadkowy Charakter pow.: nieregularna/pofalowana Masywne lub warstwiane wypełnienie item/pyłem/piaskiem/żwirem

**Tabela 4.** Klasyfikacja szczelin z kurczenia i szczelin neotektonicznych w osadach morenowych (Klint, 2004; Klint i in., 2005)  
**Table 4.** *Contraction of neotectoc fractures types and characteristic in diamict deposits (Klint, 2004, Klint et al., 2005)*

Typy szczelin	Typowy przebieg szczeliny	Kształt, długość	Kształt szczeliny (skala w m) Charakter i chropowatość powierzchni (skala w cm)
<b>Szczeliny z kurczenia (Contraction Fractures)</b>			
Szczeliny z wysychania ( <i>Desiccation fractures</i> )	Prawie pionowe Systematyczne Nie systematyczne Nie systematyczne	Poligony 5–40 cm szerokości	Kształt: prostoliniowy–przypadkowy Charakter pow.: nieregularne kolumny Chropowatość pow.: szorstka Wypełnienie osadem przy powierzchni, głównie w osadach ilastych
Kliny lodowe ( <i>Ice wedges</i> )	Prawie pionowe Systematyczne Nie systematyczne Nie systematyczne	Poligony 1–>10 m szerokości	Otwarte, wypiętione osadem szczeliny, często nieregularne o klinowatym kształcie. Głównie w osadach piaszczystych.
Szczeliny z rozciągania ( <i>Tensile fracturing</i> )	Nie systematyczne Prawie pionowe	< 1 m głębokość szczelin	Przypadkowe, nieregularne szczeliny o kształcie klinowatym.
Spowodowane wysadziną mrozową	Nie systematyczne Prawie pionowe	0,3–5 cm odległości, wzrastające ku dołowi	Kształt: nieregularny "cegłany zwór" Charakter pow.: przypadkowa Chropowatość pow.: szorstka
Pełnięcia mrozowe ( <i>Frost cracks</i> ) (Spowodowane niejednorodnością lodu)	Nie systematyczne Mikroszczeliny w strefach prawie horyzontalnych; w osadach piaszczystych		
<b>Szczeliny neotektoniczne (Neotectonic Fractures)</b>			
Szczeliny neotektoniczne ( <i>Neotectonic fractures</i> )	Systematyczne Pionowe/prawie pionowe	<10–>100 m	Kształt: płaski Charakter: prostoliniowy, Chropowatość: gładka/lustra tekt.



### 3. Wyniki badań terenowych

Na terenie CST nadkład warstwy wodonośnej stanowią grunty spoiste o miąższości 5-7 m. Naporowe zwierciadło wód podziemnych stabilizowało na głębokości ok. 4,5 m.

#### **Litologia osadów**

Dokonano schematyzacji osadów i wyróżniono cztery jednostki litologiczne gruntów nadkładu, a także piaski warstwy wodonośnej.

Jednostkę nr 1 tworzą gleby oraz nasypy, a ich miąższość wynosi 0-0,5 m.

Jednostkę nr 2 budują masywne, słabo warstwowane ility i pyły, przewarstwione piaskami pylastymi. Osady zalegają na głębokości 0,5-1,8 m. Małe otoczaki świadczą o zrzucaniu materiału przez lądolód do osadów dennych, natomiast brak jest dużych głazów lub deformacji wywołanych grzęźnięciem otoczek w osadzie. Grunty zaklasyfikowano jako osady ze zrzucania zdeponowane w jeziorze lodowcowym.

Jednostka nr 3 jest złożona ze źle wysortowanych piasków z przewarstwieniami pyłów i żwirów, z pojedynczymi głazami. Reprezentuje typ diamikrytu piaszczystego. Osady występują na głębokości 1,8-2,6 m. Na materiale skalnym czasami widoczne są rysy i wyżłobienia, lecz brak jest wyraźnej imbrykacji i lineacji otoczek. Osad jest silnie heterogeniczny. W interwale osadu o miąższości 1 m występuje ok. 20-40 przerostów piaszczystych, w odległościach 2,5-5,0 cm, a miąższość przewarstwień wynosi od 2 mm do 20 cm. Piaski tworzące przewarstwienia są dobrze wysortowane, czasami wykazują deformacje i wskazują na depozycję w środowisku wodnym ze sporadycznymi deformacjami osadu. Grunty zaklasyfikowano jako spływowy osad morenowy.

Jednostka nr 4 to osady morenowe zbudowane z gliny pylastej, zapiaszczonej, z domieszką żwirów i głazów. Osady występują na głębokości 2,6-5,2 m. Udział frakcji piaszczystej wzrasta ku spągowi. Stropowa część o miąższości ok. 2 m, charakteryzuje się znacznym udziałem frakcji pylastej i ilastej, posiada wysoką wytrzymałość i masywne spoiwo, występują systematyczne szczeliny. Kierunkowe ułożenie otoczek oraz przebieg szczelin wskazuje, że osad został zdeponowany pod lądolodem, który nasuwał się z północnego-zachodu. Grunty te zaklasyfikowano jako denny osad morenowy typ B. Poniżej maleje wytrzymałość osadów, a grunty te zaklasyfikowano jako denny osad morenowy typ A.

Jednostkę nr 5 budują dobrze wysortowane piaski wodnolodowcowe. Osady występują na głębokości 5,2-17,5 m. Piaski tworzą warstwę wodonośną pierwszego plejstocenijskiego poziomu w rejonie lotniska Kluczewo.

#### **Wyszałcenie szczelin i makroporów pochodzenia biologicznego**

W części ilastej jednostki nr 2 – jeziorne osady ze zrzucania, na głębokości 0,4-1,5 m, zidentyfikowano systematyczne szczeliny o przebiegu pionowym, które powodują podział osadu na nieregularne kolumny. Średnio na metr długości profilu przypada ok. 14 szczelin, co oznacza, że odległości pomiędzy szczelinami wynoszą ok. 7 cm. Szczeliny posiadają pofalowane i szorstkie powierzchnie, wśród których występują otwory po korzeniach oraz jamy żerowania robaków. Te makropory pochodzenia biologicznego występują na

głębokości 0,4-1,7 m, a ich maksymalna gęstość dochodzi do ok. 400 otworów na 1 m<sup>2</sup> ściany wykopu. Szczeliny zwykle tworzą pionowe połączenia między makroporami pochodzenia biologicznego. Szczeliny kończą się w piaszczystych osadach jednostki nr 3. Tworzą one system poligonalny 1. rzędu o szerokości 10-15 cm, który przechodzi w kolejny system poligonalny 2. rzędu o szerokości 4-7 cm. Rozwartość szczelin ulegała niewielkiemu powiększaniu w miarę przesuszania osadów w ścianach wykopów. Omawiany system szczelin zaklasyfikowano jako szczeliny z wysychania.

W stropowej części jednostki nr 4 - dennych osadów morenowych typu B, na głębokości 2,9-4,0 m, wyróżniono 2 systemy regularnych szczelin: horyzontalnych i ukośnych. Ślady przebiegu obu systemów szczelin w osadzie zostały wyraźnie podkreślone rdzawo zabarwionymi związkami żelaza i ciemnobrunatnym zanieczyszczeniem SR. System szczelin ukośnych został wyraźniej uformowany, a szczeliny czasami zostały wypełnione pyłem i drobnym piaskiem. Szczeliny horyzontalne/prawie horyzontalne przebiegają w odległościach 3-10 cm, ich odległości wzrastają w dół osadów i całkowicie zanikają na głębokości ok. 4,4 m. Szczeliny ukośne przebiegają w odległościach 15-20 cm, a ich pionowy zasięg wynosi ok. 1 m. Azymut biegu szczelin ukośnych wynosi 80° i zapadają one w kierunku południowo-wschodnim pod kątem 30-45°. Badania imbrykacji i lineacji otoczków w osadach morenowych wykazały, że bieg systemu szczelin ukośnych został uformowany prostopadłe do kierunku nasuwania się lądolodu. Szczeliny występujące w dennych osadach morenowych typu B zaklasyfikowano jako szczeliny glacictektoniczne, a w szczególności jako: płaszczyzny ścięcia oraz sprzężone szczeliny ze ścięcia. Zanotowano brak pionowych szczelin w dolnej części jednostki nr 4 - dennych osadach morenowych typu A.

### **Niejednorodność zanieczyszczenia SR w badanych osadach**

Wyniki badań terenowych, w połączeniu z rezultatami analiz laboratoryjnych pobranych próbek gruntów, wykazały silne zanieczyszczenie SR pięciu jednostek litologicznych. W obrębie gruntów nadkładu (jednostki nr 1-4) makroskopowa ocena zanieczyszczenia wykazała jego znaczną niejednorodność. Najsilniej zanieczyszczona rezydualnymi SR była jednostka nr 3 – sływowy osad morenowy, która charakteryzowała się największym udziałem frakcji piaszczystej. Wśród drobnoziarnistych osadów jednostki nr 2 największe nagromadzenie SR stwierdzono w systemach szczelin z wysychania, jak również makroporach pochodzenia biologicznego. Zestalone SR występowały na ścianach powyższych pustek i szczelin obecnych w osadach. Makroskopowe obserwacje wykazały, że w drobnoziarnistych dennych osadach morenowych jednostki nr 4 systemy szczelin podkreślone zostały rdzawo i brunatno zabarwionymi związkami żelaza i manganu, a także ciemnobrunatnym zanieczyszczeniem SR, w stosunku do oliwkowej barwy również zanieczyszczonego spoiwa osadu morenowego. Sugeruje to, że koncentracja SR w obrębie szczelin jest znacznie większa, w porównaniu do masy gruntu otaczającego. Poniżej głębokości ok. 4,5 m, to jest głębokości stabilizacji zwierciadła wody podziemnej, z przewarstwień piaszczystych w gruntach jednostki nr 4 stwierdzono sączenia LNAPL. Również na głębokości 5,2 m w stropie piasków wodonośnych (jednostki nr 5) występowały resztki LNAPL, pozostałej po szczypaniu. W latach 1995-2004 na badanym terenie CST szczypano ogółem około 384 m<sup>3</sup> SR.

## 4. Dyskusja wyników

Zasadniczy obraz naturalnej szczelinowatości drobnoziarnistych gruntów morenowych uzyskano z prac przeprowadzono w specjalnych wykopach, natomiast dane uzyskane z rdzeni otworów wiertniczych posiadały pomocnicze znaczenie. Istotą uzyskanych wyników badań nie było wykrycie pojedynczych szczelin, lecz systematycznej szczelinowatości, która występuje w określonym przedziale głębokości (0,4-1,5 m oraz 2,9-4,0 m) i prawdopodobnie rozprzestrzeniona jest na znacznym obszarze lotniska Kluczewo o powierzchni ok. 12 km<sup>2</sup>. Stosunkowo niewielka miąższość badanego systemu szczelin jest wynikiem znacznej pionowej zmienności litologicznej osadów. Systemy naturalnych szczelin wyodrębniono w tej części osadów, która charakteryzowała się największą zawartością frakcji ilastej i pylastej, posiadała największą wytrzymałość i ograniczoną wilgotność. Nie zidentyfikowano szczelin w gruntach jednostki nr 3 o znacznym udziale frakcji piaszczystej (spływowy osad morenowy), a także gruntów jednostki nr 4 w pobliżu stropu warstwy wodonośnej (dennych osadach morenowych typu A), co zapewne świadczy o występowaniu wysokiego ciśnienia hydrostatycznego podczas depozycji materiału, a także jest wynikiem stopniowo wzrastającej wilgotności gruntów. W strefach gruntów o znacznej wilgotności oraz gruntów nawodnionych szczeliny całkowicie zanikają. Zjawisko zanikania szczelin również ma miejsce w piaszczystych przewarstwieniach wśród osadów drobnoziarnistych.

Obserwacje w wykopach wykazały, że koncentracja SR w systemach szczelin jest znacznie większa w stosunku otaczającego spoiwa osadu morenowego. Makroskopowa analiza może jednak nie rozróżniać ciemnych pozostałości zestalonych SR i związków manganu. Wyniki analiz laboratoryjnych próbek gruntów na obecność SR wykazały, że w przedziale głębokości 2,0-4,5 m, występuje silna anizotropia przestrzenna SR w granicach 0,1-12 g/kg gruntu. Zanieczyszczenie gruntów stanowi nafta lotnicza, która została lekko zubożona w jednopierścieniowe węglowodory aromatyczne - BTEX w wyniku wietrzenia. Zazwyczaj trudno jest pobrać z samej szczeliny, o miąższości do kilku milimetrów, odpowiedniej wielkości próbki gruntu do badań laboratoryjnych i tym samym wykazać bezwzględną koncentrację SR w szczelinach. Niemniej jednak występowanie systemów szczelin przyczyniło się do znacznego zwiększenia ogólnej przepuszczalności osadów nadkładu i jest wysoce prawdopodobne, że powstała makroporowatość głównie posłużyła do intensywnego przesączania LNAPL do warstwy wodonośnej. Należy również rozróżnić udział systemu szczelin z wysychania i szczelin glacitektonicznych w zwiększeniu ogólnego współczynnika filtracji osadów nadkładu, zwłaszcza do ułatwienia migracji SR. System szczelin z wysychania (jednostka nr 2) posiada pionowy przebieg, a szczeliny łączą się wzajemnie. Szczeliny z wysychania otwierają się podczas przesuszenia osadu, a zamykają w okresach nawilżenia, natomiast rozwartość szczelin glacitektonicznych (jednostka nr 4) jest w przybliżeniu stała, przy czym większą przepuszczalność wykazuje system szczelin pionowych. Podkreślenie przebiegu szczelin w osadzie rdzawo zabarwionymi związkami żelaza, na tle spoiwa osadu o barwie oliwkowej, wskazuje na warunki tlenowe panujące wewnątrz szczelin i świadczy o ich drożności. Tak więc, wykrycie systematycznej szczelinowatości w słabo przepuszczalnych gruntach

morenowych nadkładu może wyjaśnić łatwość, z jaką doszło do zanieczyszczenia LNAPL warstwy wodonośnej o powierzchni ok. 25 ha na terenie lotniska Kluczewo.

## 5. Wnioski

Uzyskane wyniki badań pozwalają na sformułowanie ogólnych wniosków.

1. Jedynie w określonych typach drobnoziarnistych osadów morenowych w nadkładzie warstw wodonośnych może zostać wykształcona naturalna szczelinowatość. Zwykle dobrze wykształcona systematyczna szczelinowatość występuje w dennych osadach morenowych o jednorodnej budowie. Szczeliny zanikają w gruntach piaszczystych i nawodnionych.
2. Zasadnicze rozpoznanie i badania szczelinowatości osadów morenowych należy wykonywać w specjalnych wykopach badawczych, a dane z otworów wiertniczych są mało przydatne.
3. Systemy szczelin w gruntach nadkładu mogą stanowić uprzywilejowane drogi przesączania zanieczyszczeń (np. substancji ropopochodnych) do warstw wodonośnych.
4. Świadomość występowania szczelinowatości w słabo przepuszczalnych gruntach nadkładu posiada ważne znaczenie praktyczne, bowiem wykonywanie działalności gospodarczej na obszarach pokrytych drobnoziarnistymi osadami morenowymi, a zwłaszcza dennymi osadami morenowymi, wymaga zastosowania wysokiej ostrożności, aby nie dopuścić do zanieczyszczenia wód podziemnych.

## 5. Dedykacja

Artykuł poświęcony jest pamięci dr. Edmunda Goska, polskiego pochodzenia hydrogeologa ze Służby Geologicznej Danii i Grenlandii w Kopenhadze, który był twórcą projektu STRESOIL, a także jego koordynatorem w latach 2004-2006.

## 6. Literatura

- Fredericia J., 1990: *Saturated hydraulic conductivity of clayey till and the role of fractures*. Nordic Hydrology. 21.119-132.
- Fredericia J., 1993: *Fractures in Clayey Till in Denmark: Occurrence, Genesis and Hydrogeological Significance*. [in:] Geological Society of America. 1993 Annual Meeting. Boston. Massachusetts. October 25-28 1993. A-426.
- Kasela T., 2002: *Metodyka rekultywacji środowiska wodnogruntowego zanieczyszczonego produktami ropopochodnymi na przykładzie lotniska Kluczewo*. Praca doktorska. AGH. Kraków.
- Klint K. E., 2001: *Fractures in Glaciogene Diamict Deposits; Origin and Distribution*. Ph.D.-thesis. Geological Survey of Denmark and Greenland. Report 129.
- Klint K. E., 2004: *Special list for HGT*, Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen.

- Klint K. E., 2006: *Classification of fractures in glacial sediments*. [in:] In Situ Stimulation and Remediation of Contaminated Fractured Soils (STRESOIL). Szczecin. 28-29 September.
- Klint K.E., Kasela T., Nilsson B., Haessler F., 2005: *Site description, geological settings and core and soil sampling at the Kluczewo Airport, Poland*. Deliverable report of D2 and D3 to EU in relation to contract no. SSPI-CT-2003-004017. Geological Survey of Denmark and Greenland. Ministry of the Environment.