

Badania bezpośrednie procesów samouszczelniania się składowisk mokrych na przykładzie składowiska w Przeworsku

Andrzej Drągowski*, Krzysztof Cabalski*, Michał Radzikowski*

Direct research of auto-sealing processes of wet waste dumps. A case study: the dump in Przeworsk. *Prz. Geol.*, 50: 975–979.

S u m m a r y. The article presents documenting and analyzing methods for indicators reflecting the level and condition of a wet dump sealing. Conditions were determined for deposit sedimentation, and silting-up of the tank bottom and slopes as the basic processes leading to its sealing. A preliminary analysis was performed to evaluate reflux reduction as the tank is sealing itself. Basic field research, "in situ", of physical characteristics and filtration properties of deposits and substrate soils of the dump, was performed from the water surface, using a specially built platform. The results allowed calculation elaboration of the dump water balance, which is important for evaluation of the dump influence on the environment.

Key words: wet dump, storage, sealing of dumps, deposit sedimentation, silting-up, filtration coefficient

Badania nad kształtowaniem właściwości gruntów namywanych w stawach osadowych zostały zapoczątkowane w Polsce w latach siedemdziesiątych (Glazer i in., 1971). Prowadzone przez A. Drągowskiego badania, w warunkach laboratoryjnych, w specjalnym basenie, miały charakter modelowych, a uzyskane wyniki były weryfikowane w naturalnym środowisku składowania, na składowiskach popiołów i żużli w Łaziskach (Drągowski i in., 1973) oraz osadów poflotacyjnych siarki w Cyganach (Drągowski i in., 1983).

W wyniku zakrojonych na szeroką skalę badań, ustalono najkorzystniejszy reżim hydrologiczny składowisk dla rozfrakcjonowania materiału namywanego, rozkład właściwości osadu w obrębie plaży i poniżej zwierciadła wody nadosadowej, geometrię stożków namywania w zależności od położenia zwierciadła wody nadosadowej, zależność między składem granulometrycznym pulpy i jej gęstością a właściwościami osadu w poszczególnych strefach składowiska, w tym strefy, gdzie następuje sedimentacja materiału o właściwościach izolujących dno składowiska.

Obecnie, badania nad uszczelnieniem składowisk mokrych na drodze sedimentacji są prowadzone na wielu składowiskach. Ich celem jest określenie postępującego w czasie uszczelniania się tych składowisk i tym samym ograniczenia infiltracji wód w ich podłoże, co z kolei stanowi podstawę ograniczenia opłat za korzystanie ze środowiska.

Uszczelnianie sztucznych i naturalnych zbiorników wodnych, w tym rozpatrywanego składowiska, jest związane z przebiegiem i rozwojem różnorodnych procesów zachodzących w obrębie ich dna i zboczy. Powszechnie, jako czynnik uszczelniający, uznaje się proces sedimentacji ziaren, cząstek mineralnych oraz substancji organicznych. Badania przeprowadzone na rozpatrywanym składowisku wykazały jednak, że poza przyrostem osadu na dnie i zboczach istotny wpływ ma kolmatacja rozumiana jako odwrotność sufozji (Kowalski, 1988). Może ona przebiegać w warstwie dennej zbiornika jako kolmatacja mechaniczna i chemiczna. W obu przypadkach prowadzi do uszczelnienia warstwy gruntu, zmieniając przede wszystkim porowatość ośrodka, zwiększając

zagęszczenie lub powodując cementację w wyniku zachodzących procesów chemicznych.

Samouszczelnienie zbiorników, które w trakcie budowy nie zostały wyposażone w odpowiednie bariery izolacyjne jest istotnym czynnikiem minimalizującym w różnym stopniu wpływ składowisk na środowisko. Dotyczy to infiltracji wód ze składowiska i zmiany reżimu hydrologicznego w strefie jego oddziaływania oraz ewentualnego zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych.

Izolacyjne właściwości namytych gruntów zależą od wielu czynników, a przede wszystkim od cech fizycznych, chemicznych i mineralogicznych materiału sedimentowanego oraz technologii namywania, gdzie ważna jest gęstość pulpy, położenie zwierciadła wody nadosadowej, szerokość plaż, czas sedimentacji, obciążenia od przyrastającego materiału i in., przy czym trzy pierwsze warunki mają decydujący wpływ na rozfrakcjonowanie namywanego materiału. Wszystkie te czynniki wpływają na jakość zdeponowanego materiału jako warstwy uszczelniającej, jej cechy strukturalne oraz zmienność w przestrzeni składowiska: pionową i poziomą (facjalną).

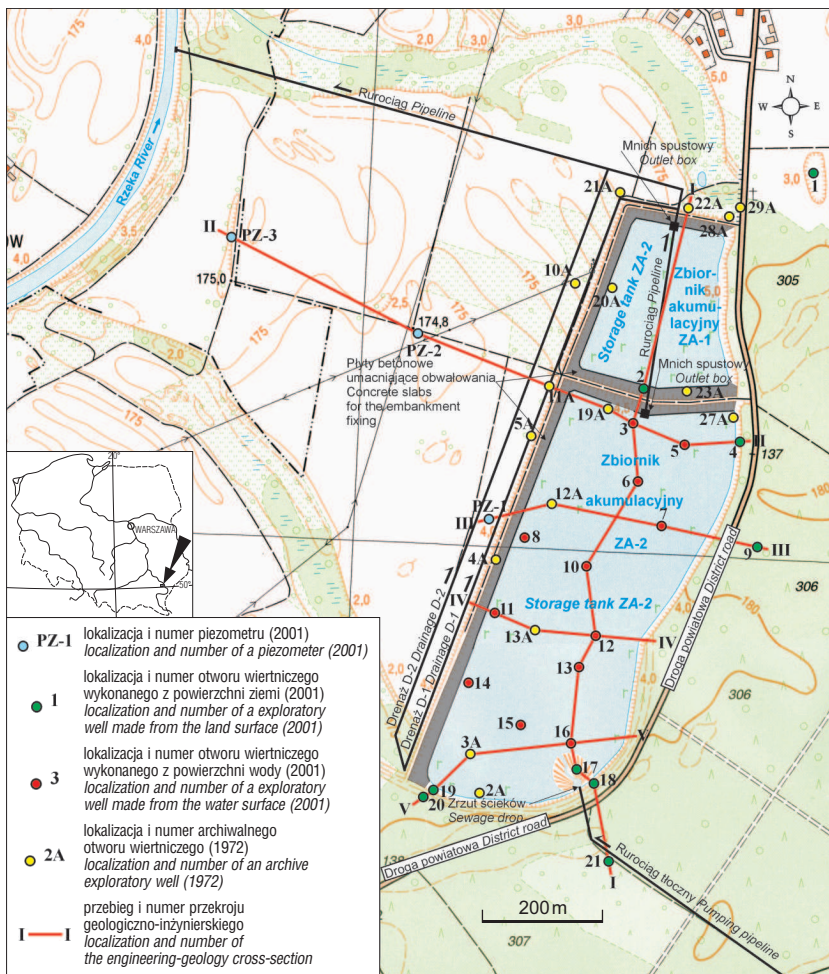
Przebieg procesów kolmatacji jest uzależniony od zróżnicowania uziarnienia warstwy kolmatowanej i osadu kolmatującego, jak również prędkości filtracji, wielkości ciśnienia panujących w ośrodku gruntowym, czasu kolmatacji, właściwości fizykochemicznych wody osadu i gruntów podłoża.

Stosowane metody badań samouszczelniania się składowisk

W Polsce problematyka oceny uszczelnień składowisk jest szczególnie aktualna i odnosi się przede wszystkim do zmian zachodzących na drodze sedimentacji namytych osadów. Badania te dotyczą lub dotyczyły m.in. wielkich składowisk odpadów poflotacyjnych miedzi — „Żelazny Most” (Werno i in., 1993), a przedtem „Gilów”, składowisk osadów poflotacyjnych cynku i ołowiu „Trzebionka” i obecnie nieczynnego składowiska osadów poflotacyjnych siarki w Cyganach.

Najpowszechniej stosowanymi metodami badań uszczelniania składowiska jest ocena zmian dopływu wód do systemów drenażowych składowiska, co stanowi element bilansu wodnego i pozwala określić odpływ wód poprzez dno składowiska oraz ocena ilościowa odpadów uszczelniających czasę składowiska, poprzez określenie ilości zdeponowanych w plażach osadów i przyjęcie, że

*Katedra Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; adro@geo.uw.edu.pl; gonio@geo.uw.edu.pl; radzik@geo.uw.edu.pl



Ryc. 1. Plan składowiska z lokalizacją punktów badawczych
 Fig. 1. Plan of the dump; the research points shown

pozostałe składowane odpady mają charakter uszczelnienia.

Na dużych składowiskach, gdzie następuje stały, duży przyrost osadu, ocenę procesów uszczelniania dna składowiska, można dokonywać poprzez:

- rejestrację zmian poziomów piezometrycznych w zaporach podstawowych,

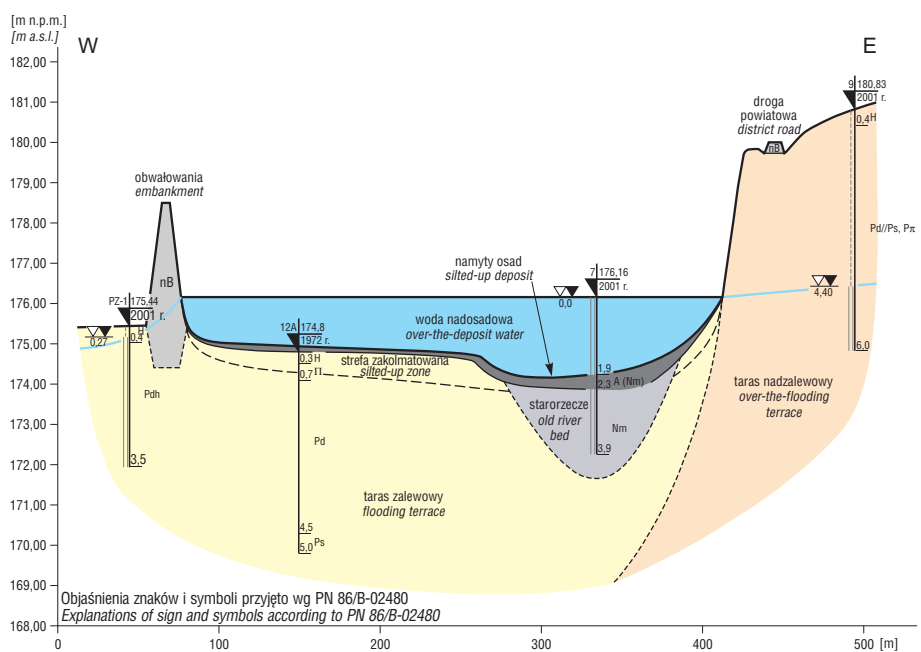
- rejestrację zmian poziomów piezometrycznych w sedymentowanych osadach.

Inną metodą stosowaną przez Instytut Morski w Gdańsku na składowiskach „Żelazny Most” (Werno i in., 1998 — 2001) i „Trzebionka” (Werno i in., 2002) są badania modelowe i ocena infiltracji wody ze składowiska na podstawie obliczeń numerycznych dla przyjętego modelu, z uwzględnieniem anizotropii współczynnika filtracji.

Jak wynika z doświadczeń Instytutu Morskiego, stosowanie metod pośrednich wymaga jednak prowadzenia odpowiednich pomiarów hydrologicznych oraz pomiarów ilości materiału osadzanego a także badań nad charakterem wykształcenia osadu, jego porowatości, gęstości i dysypacji ciśnienia porowego, a więc stosowania

np. sondowań CPTU oraz wykonywania otworów wiertniczych.

Pomiary bezpośrednie są bardziej kłopotliwe, nie zawsze mogą być zastosowane, wymagają złożonych technik badawczych umożliwiających dotarcie do dowolnego punktu na składowisku, wykonania otworów wiertniczych



Ryc. 2. Poprzeczny przekrój geologiczny z lokalizacją punktów badawczych
 Fig. 2. Geologic cross-section with localtion of the research points

Tab. 1. Właściwości filtracyjne gruntów budujących dno i zbocza składowiska
Table 1. Filtration properties of deposits and substrate soil

Wydzielone zespoły gruntowe	Rodzaj gruntu*	Współczynnik filtracji określony w terenie metodą przez zalewanie w otworze	Współczynnik filtracji określony w badaniach laboratoryjnych	Współczynnik filtracji określony na podstawie wzorów empirycznych
		m/s		
Osady namyty	A (Nm)	$< 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-6} \div < 10^{-8}$	–
Grunty budujące dno składowiska, zakolmatowane	IIph, Pg, Pd	$1,1 \times 10^{-7} \div < 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-5} \div < 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-5} \div 3,1 \times 10^{-7}$
Grunty budujące dno składowiska, niezakolmatowane	Pd, Ps	$4,3 \times 10^{-4} \div 6,6 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-4} \div 7,8 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-5} \div 6,7 \times 10^{-5}$
Osady starorzecza	Nm (I), Nm (P)	$< 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-6} \div < 10^{-8}$	–

*według normy PN 86B-02480

z powierzchni wody, pomiarów współczynnika filtracji *in situ*, pobrania próbek NU, NW i NNS.

Charakterystyka badanego składowiska

Omawiane składowisko mokre, eksploatowane od 1983 r., jest przeznaczone do samooczyszczania się zrzucanych ścieków pochodzących z przemysłu spożywczego.

Ze względów technologicznych zbiornik został podzielony na dwie części: ZA–1 i ZA–2, przy czym eksploatowana jest tylko zbiornik ZA–2 o powierzchni 24 ha (ryc. 1).

Zbiornik ma charakter przyskarpowego. Skarpa tarasu nadzalewowego o wysokości 5–6 m stanowi jego wschodni i południowy brzeg. Z pozostałych stron jest on ograniczony obwałowaniami o wysokości 5,3–5,4 m. Podobne parametry ma grobla oddzielająca zbiornik ZA–2 od zbiornika ZA–1.

Groble, po zdjęciu wierzchowiny, zostały wykonane z materiału pochodzącego z czaszy zbiornika. Są to grunty piaszczyste tarasu zalewowego. Projektowany wskaźnik zagęszczenia gruntów miał wynosić $I_s = 0,95$. Nachylenie skarp odwodnych 1 : 3. Nachylenie skarp odpowietrznych wynosi 1 : 2. Skarpa odwodna jest ubezpieczona płytami betonowymi, które mają ją chronić przed rozmywaniem. Sposób w jaki zostały połączone wskazuje, że nie stanowią ekranu wodoszczelnego.

Drenaż składa się z dwóch systemów:

□ drenażu opaskowego D₂ — znajdującego się w odległości ok. 50 m na zachód od podnóża obwałowań,

□ drenażu przyskarpowego D₁ — wykonanego w korpusie zapory zachodniej, 2 m od podnóża skarpy odpowietrznej; ma on odprowadzać ścieki filtrujące ze składowiska pod nasypem zapór oraz wody opadowe infiltrujące w korpus zapory.

Do odprowadzenia wód z drenaży oraz nadmiaru ścieków służy rurociąg odpływowy RO, którym wody są zrzucane do rzeki (ryc. 1).

Budowa geologiczna, warunki hydrogeologiczne

Przeprowadzone przez autorów badania pozwoliły na uściślenie warunków geologicznych rejonu składowiska, istotnych dla rozpatrywanego problemu oraz rozpoznanie

warunków geologiczno-inżynierskich, hydrogeologicznych i hydrologicznych.

Zbiorniki znajdują się w obrębie pradoliny Sanu, w obrębie doliny rzeki Wisłok. Składowisko zostało zlokalizowane na obszarze tarasu zalewowego rzeki (późnoplejstoceni i holoceni), przy stromej skarpie tarasu nadzalewowego (związanego z jednym ze zlodowaceń środkowopolskich; ryc. 1, 2). Pod zbiorniki częściowo zostało wykorzystane starorzecze Wisłoka (ryc. 2).

Występujące w dnie zbiornika grunty wykazują zróżnicowanie litogenetyczne. W rejonie starorzecza, w podłożu występują przede wszystkim grunty organiczne (namuły i piaski próchniczne). Pozostałe części dna zbiornika są zbudowane z gruntów sypkich: piasków różnej granulacji, pospółek, niekiedy przewarstwianych glinami i pyłami stanowiącymi twory madowe.

W związku z tym, że w dnie zbiornika nie zastosowano systemów izolacyjnych grunty tam występujące podlegają procesom kolmatacji. W wyniku namywania ścieków zawierających duże ilości zawiesiny (głównie substancji organicznych), następuje sedymentacja materiału na dnie zbiornika. Minimalna stwierdzona warstwa osadów wynosi 0,05 m, maksymalna, stwierdzona w rejonie zagłębień starorzecza, 0,6 m. Jedynie w strefie zrzutu, gdzie wytworzył się stożek z namywania, miąższość osadów wynosi do 3,3 m. W związku z przebiegiem tych procesów (kolmatacja i sedymentacja) pierwotne właściwości gruntów naturalnych rodzimych uległy zmianom, m.in. w zakresie parametrów filtracyjnych, powodującym istotne ograniczenie odpływu ścieków ze zbiornika.

Analiza materiałów archiwalnych oraz wykonane przez autorów pomiary i badania, pozwoliły na określenie warunków hydrogeologicznych w rejonie zbiornika. Z danych tych wynika, że ogólny kierunek odpływu wód podziemnych jest na północny zachód, w kierunku rzeki Wisłok, która na badanym odcinku ma, przy stanach średnich i niższych, charakter drenujący.

Wody gruntowe na tym terenie są związane z gruntami piaszczystymi tarasu zalewowego i nadzalewowego. Zasilanie tych wód odbywa się przede wszystkim drogą infiltracji wód opadowych. Wody tarasu zalewowego są zasilane w krótkich odcinkach czasu (przy krótkotrwałych stanach powodziowych rzeki) wskutek infiltracji wód z rzeki oraz napływu wód gruntowych wzdłuż doliny rzeki, a

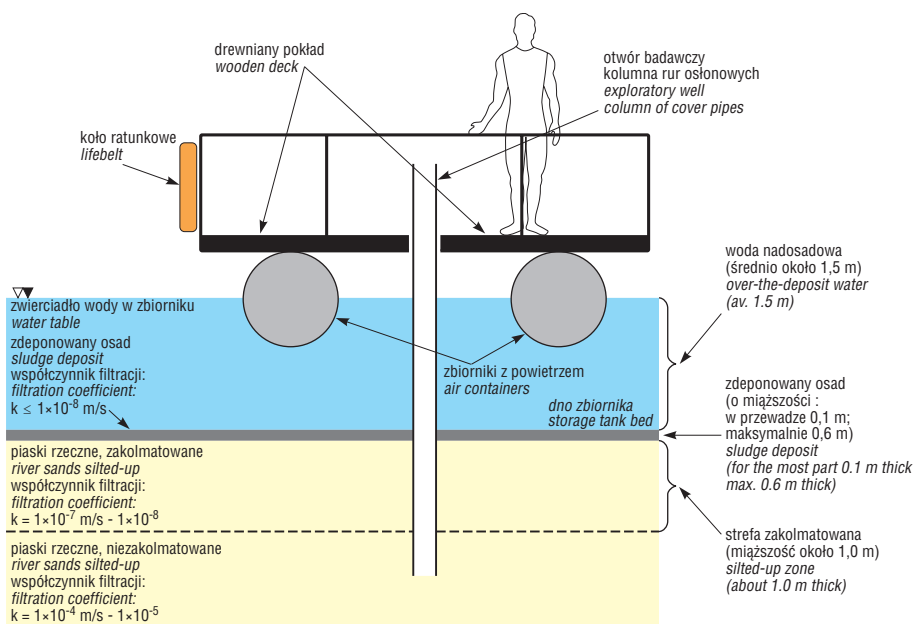
także napływu wód z tarasu nadzalewowego. Przy czym napływ wód od strony tarasu nadzalewowego (południowo-zachodniej) jest stosunkowo niewielki, ponieważ niedaleko omawianego zbiornika przebiega linia wododziałowa dolin Sanu i Wisłoka. W związku z tym obszar zasilania wód gruntowych powyżej zbiornika na kierunku spływu tych wód ma niewielką powierzchnię, a co za tym idzie ilość wód gruntowych napływających w kierunku zbiornika jest nieznaczna. Istotny jest natomiast fakt możliwości wystąpienia dużych wahań zwierciadła wody gruntowej w tym rejonie, co może powodować w okresach niżówkowych odpływ wody ze zbiornika w kierunku tarasu nadzalewowego.

Eksploatowany zbiornik, w stosunku do wód podziemnych, znajduje się w szczególnym położeniu. Przez zdecydowaną część roku poziom ścieków w zbiorniku kształtuje się poniżej zwierciadła wód w tarasie nadzalewowym. W tym układzie zbiornik dla wód podziemnych tarasu nadzalewowego ma charakter drenujący i jest zasilany tymi wodami. Ponadto zwierciadło wody w zbiorniku ZA-2 jest podniesione w stosunku do położenia wód gruntowych w tarasie zalewowym. W trakcie prowadzonych przez autorów badań różnica w położeniu zwierciadła wód w zbiorniku i wód podziemnych tarasu zalewowego wynosiła ok. 1 m w obrębie obwałowań. Taka różnica może być spowodowana kolmatacją dna i zboczyc zbiornika.

Opis zastosowanych metod badawczych

Badania sedymentacji osadów oraz procesu kolmatacji dna omawianego składowiska obejmowały badania z ładu oraz z wody.

W celu przeprowadzenia badań z wody został wykonany specjalny, pływający pomost według projektu autorów niniejszego opracowania. Pomost jest oparty na czterech zbiornikach metalowych z powietrzem. Konstrukcja posiada drewniany pokład z otworem technologicznym w centralnej części, umożliwiającym wykonywanie wierceń i badań. Specjalny system umożliwił kotwienie platformy w wybranym miejscu. Przemieszczanie się pomostu odbywało się za pomocą metalowych żerdzi (ryc. 3).



Ryc. 3. Schemat budowy pomostu badawczego

Fig. 3. Chart of the research platform

Pomost umożliwiał wykonywanie wierceń systemem ręcznym w rurach osłonowych, pobieranie próbek gruntów z różnych głębokości, prowadzenie badań współczynnika filtracji *in situ* na różnych głębokościach, poniżej dna zbiornika metodą Maga, przez zalewanie otworu, badanie zagęszczenia gruntów. Prowadzone badania z wody były jedyną możliwą do zastosowania metodą, pozwalającą na rozpoznanie budowy geologicznej dna zbiornika, właściwości filtracyjnych budujących je gruntów, warunków i zakresu sedymentacji i kolmatacji dna zbiornika, a więc warunków wpływających na jego uszczelnienie. Otwory wiertnicze zaplanowano tak, aby można było uwzględnić w badaniach obszar starorzecza i obszary przyskarpowe oraz, aby uzyskać wiele przekrojów geologicznych charakteryzujących zmienność zasięgu kolmatacji i sedymentacji osadów.

Metodyka badań *in situ* została uzupełniona przez badania laboratoryjne pobranych próbek gruntów i wody. W laboratorium dokonano badań pozwalających na identyfikację gruntów, określenie wybranych cech fizycznych gruntów oraz współczynnika filtracji w rurce Kamińskiego dla gruntów o zróżnicowanym zagęszczeniu i wzorem amerykańskim na podstawie danych z analiz granulometrycznych.

Znaczenie przeprowadzonych badań dla bilansu wodnego składowiska

W przypadku rozpatrywanego składowiska, sedymentacji podlegały znajdujące się w ściekach w postaci zawiesiny przede wszystkim substancje organiczne i w niewielkim stopniu drobnopiękiste substancje mineralne. Materiał dostarczany rurociągiem w największych ilościach, sedymentuje w strefie zrzutu tworząc, jak to jest udokumentowane obserwacjami terenowymi, stożek z namywania. Stożek powstał w miejscu, gdzie w pierwszej fazie namywania rozwijała się erozja wgłębna. Dopiero po zapełnieniu zgłębienia stożek rozbudował się nawet nad powierzchnię ścieku, tworząc tzw. nadwodną część stożka, rozcinaną każdorazowo strugami napływającego ścieku. Materiał sedymentujący na dnie podlega przemieszczaniu przez prądy wodne. Przeważnie grubość warstwy заму-

lającej osiąga, w przeważającej części zbiornika 10 cm. Niekiedy obniża się do 5 cm. Nie stwierdzono miejsc, w których dno zbiornika byłoby pozbawione tej warstwy. Najgrubsza stwierdzona badaniami warstwa osadu (do 0,6 m) osadziła się w rejonie starorzecza.

Kolmatacja może przebiegać w warstwie dennej zbiornika jako kolmatacja mechaniczna i jako kolmatacja chemiczna. W obu przypadkach kolmatacja prowadzi do uszczelnienia warstwy lub warstw gruntów, zmniejszając przede wszystkim porowatość ośrodka, zwiększając jego zagęszczenie lub powodując cementację w wyniku oddziaływania chemicznego.

Charakterystykę gruntów badanych przedstawiono w tab. 1, a syntetyczny obraz warunków uszczelniania na ryc. 3.

Oba typy kolmatacji zachodziły i zachodzą w rozpatrywanym zbiorniku. Kolmatacja mechaniczna zachodziła pod wpływem filtrujących w nieizolowane podłoże ścieków ze zbiornika. Strugi wody powodowały, że drobne cząstki przemieszczały się wraz z wodą wypełniając pory gruntu. Prowadziło to do zmniejszenia porowatości efektywnej i przepuszczalności gruntu. Proces przebiegał podobnie jak w sufozji międzywarstwowej. Z jednej warstwy drobny materiał był wynoszony i wprowadzany do drugiej. Przemieszczanie się cząstek ilastych, pylastych, a nawet piaszczystych zachodziło w obrębie warstwy dennej, po za tym wprowadzany był do niej drobny materiał przede wszystkim mineralny sedimentowany na dnie zbiornika.

Kolmatacja chemiczna zachodzi przede wszystkim na drodze wytrącania się z roztworów wodnych soli mineralnych, wypełniających pory gruntu i cementujących jego strukturę.

Miąższość strefy zakolmatowanej, jak to wykazały badania, wynosi ok. 1 m. Warstwa zakolmatowana nie jest jednorodna. Największe zmiany wystąpiły, jak to stwierdzono badaniami, w strefie przydennej o miąższości do 30 cm. Piaski w trakcie wiercenia zachowywały się jak słabo scementowane piaskowce. Niżej grunty nie były scementowane, ale wykazywały dobre zagęszczenie. Stawiały duży opór przy wierceniu, znacznie większy niż niżej występujące te same grunty, ale niezakolmatowane. Obserwacje prowadzone w trakcie wierceń potwierdziły badania laboratoryjne próbek gruntu.

Łącznie zamulanie dna oraz kolmatacja były czynnikami, które doprowadziły do wytworzenia się w dnie zbiornika i częściowo w zboczach podwodnych warstwy uszczelniającej o zróżnicowanych właściwościach, która jednak dla potrzebnych uproszczeń można określić jako warstwę gruntów słaboprzepuszczalnych, o współczynniku filtracji „k”, którego wartość można przyjąć w przedziale $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-8}$ m/s.

Parametry filtracyjne gruntów zakolmatowanych można określić, że są na ogół o rząd wielkości niższe, niż dla gruntów niżej leżących, niezakolmatowanych. Wykazały to badania *in situ* i potwierdziły generalnie badania laboratoryjne

Przeprowadzone badania i wykonane obliczenia pozwoliły na opracowanie bilansu wodnego składowiska i ustalenie objętości wody infiltrującej w dno zbiornika, co w porównaniu z wartościami początkowymi pracy zbiornika, gdy grunty budujące dno nie były zakolmatowane, pozwoliły określić ilościowy wpływ uszczelnienia na

odpływ wody ze zbiornika. Z obliczeń wynika, że po 18 latach pracy efektywnej infiltracji ulega jedynie 18% doprowadzanych ścieków.

Wnioski

1. Metody bezpośrednich badań uszczelniania składowisk mokrych można zastosować jedynie w tych warunkach, gdy jest możliwość bezpiecznego przemieszczania się pomostu ze sprzętem wiertniczym i badawczym oraz jego bezpieczne przybicie do brzegu.

2. Badania bezpośrednie pozwalają określić zmienność miąższości osadu, zróżnicowanie jego litologii, właściwości fizycznych oraz wyznaczyć strefę kolmatacji w utworach dennych składowiska.

3. Przeprowadzone wiercenia z pływającego pomostu pozwoliły na charakterystykę litologiczną przewierczanych osadów i utworów dennych, pobranie próbek, przeprowadzenie badań współczynnika filtracji oraz współczynnika zagęszczenia gruntów. Uzupełniające znaczenie miały badania laboratoryjne granulometrii, gęstości właściwej i zawartości części organicznych.

4. Przeprowadzone badania z powierzchni wody oraz szeroko zakrojone w otoczeniu zbiornika pozwoliły na ustalenie warunków geologicznych i hydrogeologicznych w strefie zbiornika, określenie jego reżimu hydrologicznego, roli drenażu.

5. Studia hydrologiczne, dokonanie bilansu wody w zbiorniku pozwoliły na oszacowanie infiltracji ścieków przez dno i zbocza zależnie od jego zmieniającego się charakteru hydrogeologicznego: z infiltrującego na okresowo drenującego.

6. Przeprowadzone badania pozwoliły na ustalenie wpływu uszczelniania się zbiornika na ograniczenie jego oddziaływania na środowisko w okresie ok. 20 lat jego eksploatacji.

Literatura

- GLAZER Z., DRĄGOWSKI A., DOMAGAŁA M., KACZYŃSKI R. & WYSOKIŃSKI L. 1971 — Problematyka badań inżyniersko-geologicznych przy składowaniu odpadów przemysłowych w stawach osadowych. *Prz. Geol.*, 19: 244–248.
- DRĄGOWSKI A., GÓRKA H. & KACZYŃSKI R. 1973 — Właściwości filtracyjne popiołów węglowych elektrowni Łaziska, Jaworzno, i Blachowni Śląskiej. *Mat. Symp. w Częstochowie nt. „Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych. Sekcja I SłiTG. Wyd. Geol.*
- DRĄGOWSKI A., GLAZER Z., KACZYŃSKI R., PINIŃSKA J. & DOBAK P. 1983 — Złożoność problemów geotechnicznych przy nadbudowie mokrego składowiska osadów poflotacyjnych. *Mat. II Kraj. Konf. Techn. Kontroli Zapór. Warszawa.*
- KOWALSKI W. C. 1988 — *Geologia inżynierska. Wyd. Geol.*
- WERNO M., DEMBSKI B., JUSZKIEWICZ-BEDNARCZYK B., MŁYNAREK Z. & TSCHUSCHKE W. 1993 — Tailing Dam Żelazny Most environmental hazard. III Int. Conf. On Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, USA.
- WERNO M. (1998–2001) — Badania skuteczności procesu uszczelnienia dna składowiska „Żelazny Most”, Raport roczny nr 1, 2, 3, 4. Instytut Morski, Zakład Geoinżynierii i Geoekologii. *Arch. Inst. Morskiego, Gdańsk.*
- WERNO M., DEMBSKI B., DEMBSKI M., INEROWICZ M. & JUSZKIEWICZ-BEDNARCZYK B. 2002 — Gospodarze wykorzystanie odpadów poflotacyjnych deponowanych w stawie osadowym ZG Trzebieńka S.A. do budowy obwałowań i minimalizacji oddziaływania stawu na środowisko. Instytut Morski, Zakład Geoinżynierii i Geoekologii. *Arch. Inst. Morskiego, Gdańsk.*