INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 9/2008, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 297–306
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Robert Głowski, Włodzimierz Parzonka

EROZYJNA CHARAKTERYSTYKA DROBNOZIARNISTYCH OSADÓW O CECHACH SPOISTYCH Z JEZIORA DĄBIE

EROSIONAL CHARACTERISTIC OF COHESIVE FINE GRAINED SEDIMENTS FROM LAKE DĄBIE

Streszczenie

Jezioro Dąbie położone jest w obrębie ujściowego odcinka Dolnej Odry. Akwen ten ma ważne znaczenie dla żeglugi, gdyż przez jego czaszę przechodzi główny tor wodny pomiędzy portem Schwedt a Zatoką Pomorską. Zbiornik ten jest intensywnie zanoszony rumowiskiem polifrakcyjnym ze znaczną zawartością cząstek pylastych i ilastych oraz materii organicznej. Wysoka zawartość cząstek pyłów i iłów nadaje rumowisku cechy materiału częściowo spoistego względnie spoistego. Osadzające się rumowisko powoduje utrudnienia w eksploatacji zbiornika oraz istotne zmniejszenie jego pojemności. W ciągu 34 lat jego pojemność zmniejszyła się o 12,1 mln m^3, a średni roczny przyrost objętości osadów oceniany jest na 356 000 m^3.

Autorzy przeprowadzili wstępną ocenę parametrów erozji osadów z jeziora Dąbie na podstawie jego cech fizycznych i reologicznych.

Słowa kluczowe: osady jeziorne, zamulanie, erozja, cechy reologiczne osadów

Summary

The Lake Dąbie is located in Lower Odra estuary. That water region plays very important role for navigation, because through the Lake Dąbie the main seaway between Schwedt and Pomeranian Gulf is running. The Lake in strongly silted with polyfractional sediments with high clay and silt particles content and also with high organic matter content. That high clay and silt particles content causes that muds from the Lake have semi-cohesive or cohesive properties. Settled muds

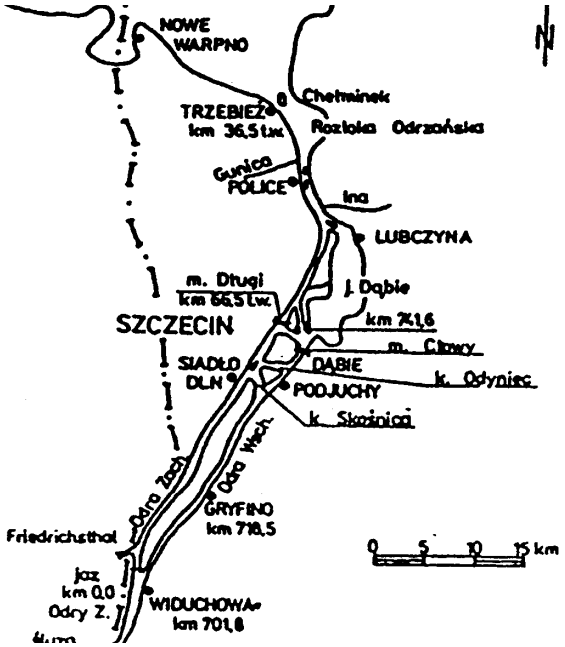
cause difficulties in seaway exploitation and significant decrease of its capacity. During 34 years the Lake Dąbie capacity decreased about 12,1 mln m^3. The estimated mean year increase of sediments volume is equal about 356 000 m^3.

The authors performed the preliminary estimation of erosion parameters for sediments from Lake Dąbie on the base of theirs physical and rheological properties.

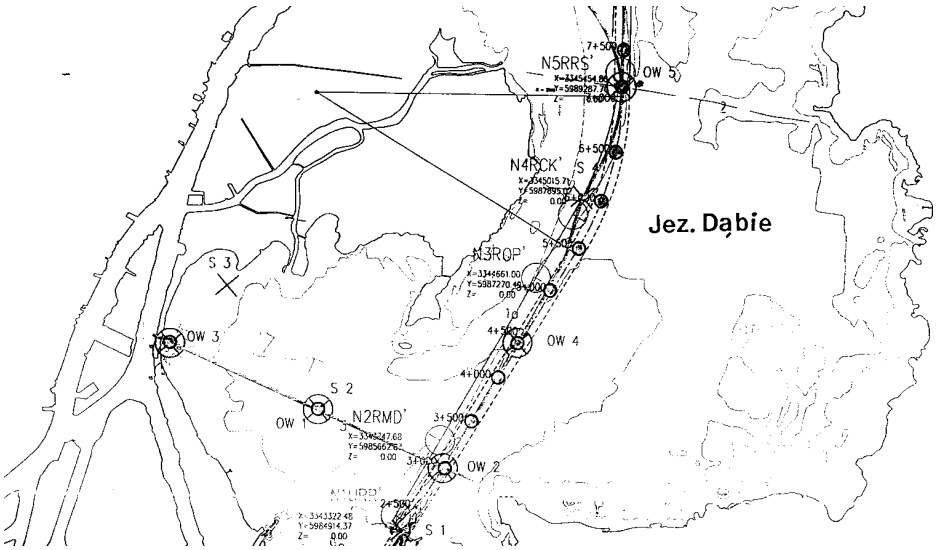
Key words: *lake sediments, silting, erosion, sediment rheological properties*

WSTĘP

Jezioro Dąbie jest naturalnym zbiornikiem wodnym powstałym w ujściowym odcinku Dolnej Odry. W przekroju Widuchowa (km 701,8 Odry) około 40 km powyżej jeziora Dąbie koryto rzeki Odry dzieli się na dwie części tj. tzw. Odrę Zachodnią przez którą przebiega częściowo granica polsko-niemiecka oraz Odrę Wschodnią (Regalicę), która uchodzi w km 741,6 bezpośrednio do Dąbia (rys. 1). W obszarze ujściowym, w którym znajduje się omawiany akwen, Odra tworzy skomplikowany, naturalny układ hydrograficzny [Wolski 2004], który nie pozostaje bez wpływu na hydrologię tego zbiornika i zachodzące w nim procesy transportu rumowiska. Jezioro to zajmuje powierzchnię około 54 km^2. Długość tego zbiornika wynosi około 15 km, największa szerokość około 2,5 km, a średnia jego głębokość wynosi około 2,5 m. Odra Wschodnia (Regalica) zasila wodami i rumowiskiem bezpośrednio jezioro Dąbie. Położenie jeziora Dąbie w granicach administracyjnych miasta Szczecina powoduje, że zbiornik ten znajduje się pod silnym wpływem działalności człowieka. W obszarze ujściowym jeziora Dąbie istnieje, oprócz naturalnej sieci koryt łączących Odrę Wschodnią (Regalicę) i Odrę Zachodnią, wiele sztucznie wykonanych przekopów. Przez jezioro wytyczony jest ważny tor żeglugowy łączący porty w Szczecinie z portami w Świnoujściu i w Schwedt (rys. 2), o szerokości 150 m i głębokości gwarantowanej równej 3,2 m. Jest on okresowo pogłębiany za pomocą refulerów, przy czym urobek pogłębiarek składowany jest z reguły w innym rejonie jeziora (ostatnio np. w pobliżu lewego brzegu). Ważną funkcją jeziora jest to, iż w okresie lodołamania i pochodu lodów stanowi ono odbiornik (magazyn) kry lodowej praktycznie z całego odcinka Dolnej Odry. Od północy akwen jeziora Dąbie łączy się z Roztoką Odrzańską, a następnie z Zalewem Szczecińskim. Bliskie położenie jeziora w stosunku do Morza Bałtyckiego powoduje, iż prądy jeziora, układ zwierciadła wody i hydrologia modyfikowane są często przez zjawiska odmorskie [Wolski 2004].



Rysunek 1. Lokalizacja i układ hydrograficzny jeziora Dąbie [Wolski 2004]
Figure 1. Localization and hydrographic layout of Lake Dąbie [Wolski 2004]



Rysunek 2. Szlak żeglugowy na jeziorze Dąbie
Figure 2. Seaway through Lake Dąbie

Jezioro Dąbie nieprzerwanie zanoszone jest rumowiskiem unoszonym, deponowanym przez Regalicę. Odkłady rumowiska powodują utrudnienia w żegludze i utrzymaniu drożności toru wodnego. Wskutek wieloletnich zaniedbań w zakresie pogłębiania jeziora, a zwłaszcza toru wodnego, nastąpiło znaczne jego wypłycenie. Warstwa osadu dennego ma miąższość rzędu 3–5m, większą od średniej głębokości wody. Woda i namuły jeziora zawierają znaczne ilości zanieczyszczeń zrzucanych do jeziora, głównie przez miasto Szczecin i inne miejscowości nadodrzańskie, oraz przez rolnictwo i przemysł. Wg Szutowicz [1999] oraz Hydroprojektu Warszawa [2004] w osadach dennych jeziora Dąbie występują duże stężenia metali ciężkich, jak również znaczne ilości związków ropopochodnych. Odkłady rumowiska ograniczają pracę lodołamaczy, zmniejszeniu ulega pojemność jeziora i możliwość przyjmowania połamanej kry. Zanieczyszczenie wody i osadów zagraża środowisku naturalnemu, a zwłaszcza parkom krajobrazowym – tak po polskiej, jak i po niemieckiej stronie rzeki.

Aby zapobiec negatywnym skutkom dla środowiska naturalnego, żeglugi i ochrony przeciwpowodziowej w estuarium Odry, Polska i niemiecka administracja wodna podjęły wspólny program techniczno-badawczy związany z Odrą graniczną. Program ten przewiduje m.in. pogłębienie jeziora Dąbie dla zapewnienia utrzymania toru wodnego i odbioru kry.

Właściwa charakterystyka ilości i jakości osadów dennych zalegających w jeziorze Dąbie oraz warunków zamulania i odmulania jeziora (zwłaszcza w rejonie toru wodnego) są ważnym problemem technicznym i naukowym, mającym swoje implikacje międzynarodowe.

WSTĘPNE BADANIA CECH FIZYCZNYCH I REOLOGICZNYCH NAMUŁÓW Z JEZIORA DĄBIE

Dla przeprowadzenia oceny warunków mobilności osadów oraz bagrowania toru wodnego potrzebna jest znajomość podstawowych cech fizycznych i reologicznych osadów. W warunkach naturalnych cechy dynamiczne osadu zależą głównie od właściwości rumowiska. Rumowisko rzeczne stanowi mieszaninę grubych i drobnych cząstek mineralnych (np. mieszanina piasku, gliny, iłu), zanieczyszczeń oraz materii organicznej. Duża zawartość procentowa (rzędu 20%) cząstek drobnych o średnicach $d<6{,}3$ μm powoduje, że odłożone rumowisko ma cechy rumowiska spoistego lub niespoistego. Wraz ze wzrostem zawartości cząstek gliniastych, pylastych i ilastych, rumowisko wykazuje coraz wyraźniejsze cechy materiału spoistego. Dodatkowo o występowaniu cech spoistości rumowiska decyduje zawartość części organicznych I_{om}.

Do badań cech fizycznych i reologicznych pobrano cztery próby namułów z południowo-zachodniego rejonu ujściowego rzeki Regalicy do jeziora Dąbie.

Dla wstępnej charakterystyki cech erozyjnych badanych prób namułów wykonano oznaczenie następujących cech fizycznych:

– składu ziarnowego, na podstawie którego wyznaczono średnicę reprezentatywną d_{50} (mm) oraz stopień wysortowania materiału wg Hazena $U_H \quad \frac{d_{60}}{d_{10}}$.

– zawartości części organicznych I_{om} (%),

– gęstości szkieletu gruntowego ρ_s (kg/m^3),

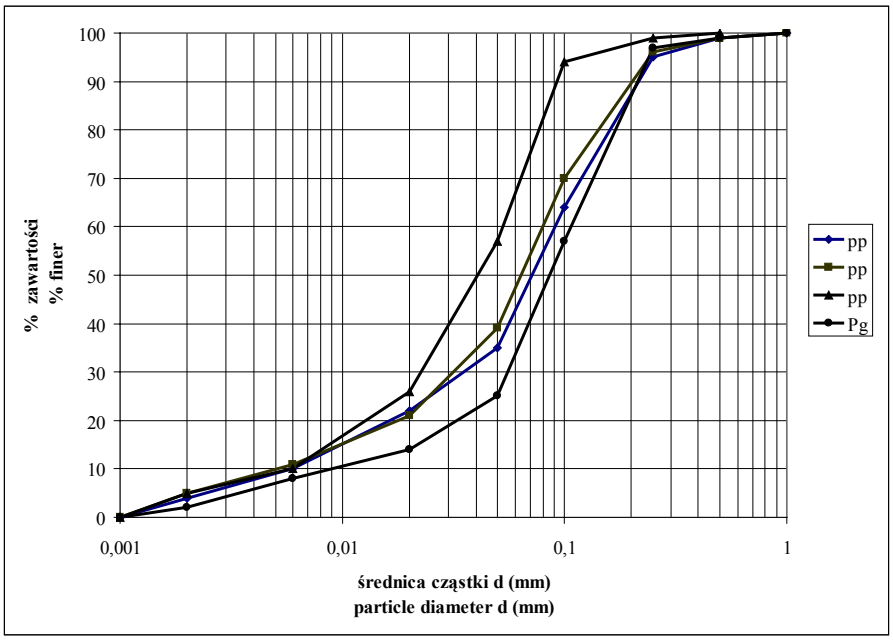
– wilgotności W (%).

Określenie charakterystyk reologicznych osadów polegało na:

– pomiarze pseudokrzywych płynięcia oraz aproksymacji ich części liniowej z wykorzystaniem dwuparametrowego modelu Binghama,

– określeniu wartości naprężeń progu płynięcia τ_0 (Pa), których znajomość umożliwia wyznaczenie krytycznych naprężeń początku erozji badanych osadów.

Skład ziarnowy rumowiska określono zgodnie z obowiązującymi normami geotechnicznymi. Uzyskany rozkład uziarnienia dla badanych trzech prób namułów z jeziora Dąbie pokazuje rysunek 3.



Rysunek 3. Krzywe ziarnowe badanych osadów z jeziora Dąbie
Figure 3. Sieve curves for investigated sediments from Lake Dąbie

Określone parametry fizyczne dla badanych osadów zestawiono w tabelach 1 i 2.

Badania składu ziarnowego wykazały, że badane osady mają zbliżony skład ziarnowy. Trzy próbki miały materiał odpowiadający pyłowi piaszczystemu z ok. 10% zawartością cząstek o średnicach d<0,63 μm a jedna próba piasku gliniastego o zawartości cząstek o średnicach d<0,63μm, poniżej 10%. Nominalne średnice cząstek d_{50} (mm) zmieniały się w granicach od 0,040 do 0,09 mm (tab. 1), co potwierdzają badania Hydroprojekt Warszawa [2004], Parzonka, Buchholz, Coufal, Kreft, Meyer [2007]. Obliczone stopnie wysortowania U_H mają wartości powyżej 5, co świadczy o tym, że badane rumowisko jest materiałem różnoziarnistym o małym stopniu wysortowania.

Tabela 1. Analiza składu ziarnowego osadów z jeziora Dąbie
Table 1. Analysis of grain size distribution of sediments from Lake Dąbie

Analiza składu ziarnowego Grain size distribution analysis				
Średnica cząstki d (mm) Particie diameter d (mm)	Nr próbki/Sample №			
	1	2	3	4
d_{50}	0,070	0,062	0,040	0,086
d_{10}	0,006	0,0059	0,006	0,0086
d_{60}	0,090	0,080	0,051	0,105
d_{90}	0,210	0,200	0,091	0,210
U_H	15	13,56	8,5	12,21

Tabela 2. Cechy fizyczne osadów z jeziora Dąbie
Table 2. Physical properties of sediments from Lake Dąbie

Nr próbki Sample №	I_{om}	ρ_s	W	Rodzaj osadu Kind of mud
	(%)	(kg/m^3)	(%)	–
1	13,42	2474	159,06	pył piaszczysty sandy dust
2	13,38	2494	203,54	pył piaszczysty sandy dust
3	–	–	395,63	pył piaszczysty sandy dust
4	9,57	2510	187,10	piasek gliniasty silty sand

ρ_s – gęstość szkieletu, solid density – (kg/m^3),

I_{om} (%) – zawartość części organicznych, organic matter content,

W (%) – wilgotność, water content,

d_{50} (μm) – reprezentatywna średnica cząstki, representative particle diameter.

Wartości gęstości ρ_s zmieniały się w granicach od 2474 do 2510kg/m^3, charakterystycznych dla osadów mineralnych. Zawartość części organicznych określono metodą wyżarzania stosowaną w geotechnice. Kształtowała się ona na poziomie 10–14%, co jest charakterystyczne dla typowych rzecznych i jeziornych osadów organicznych.

Tabela 3. Wyniki badań laboratoryjnych osadów z jeziora Dąbie wg Hydroprojekt [2004]
Table 3. Results of laboratory tests for deposits from Lake Dąbie, after Hydroprojekt [2004]

Numer otworu Number of forage	Głębokość poboru prób pod dnem jeziora [m] Depth of soil sample	Rodzaj gruntu kind of soil	Zawartość frakcji [%] Fraction content [%]			d_{50} [mm]	W_n [%]	I_{om} [%]
			ił clay	pył silt	piasek sand			
OW-1	5,0	Nm (Pg)	9	27	64	0,095	279	21,7
OW-2	3,0	Nm (Gp)	10,9	26,1	63			
OW-3	5,0	Nm (G0	12	38	50	0,050	388,3	24,0
OW-4	5,0	Pd	0	0	100	0,15	27,2	0,1
OW-5	4,0	Pd	0	0	100	0,15		
OW-6	5,0	Nm (G)	12	38	50	0,050		
OW-7	4,0	Nm (G)	14,2	3,1	52,7	0,055		
OW-8	4,0	Nm (G)	12	40	48	0,044	438	30,4
OW-9	5,0	Pd	0	1	99	0,16		

Badania cech reologicznych osadów przeprowadzono z zastosowaniem wiskozymetru rotacyjnego firmy HAAKE, zgodnie z metodyką opracowaną przez Parzonkę [Parzonka 1968, 1994]. Pomiary pseudokrzywych płynięcia wykonano dla tych prób osadów, które posiadały przynajmniej 10% zawartość cząstek pylastych. Przeprowadzone badania potwierdziły wyniki badań składu ziarnowego. Wszystkie trzy badane próby (1, 2 i 3) miały cechy materiału spoistego, tj. ich pseudokrzywa płynięcia jest charakterystyczna dla ciała lepkoplastycznego Binghama. W modelu Binghama zależność dla naprężeń ścinających od parametrów reologicznych określa równanie:

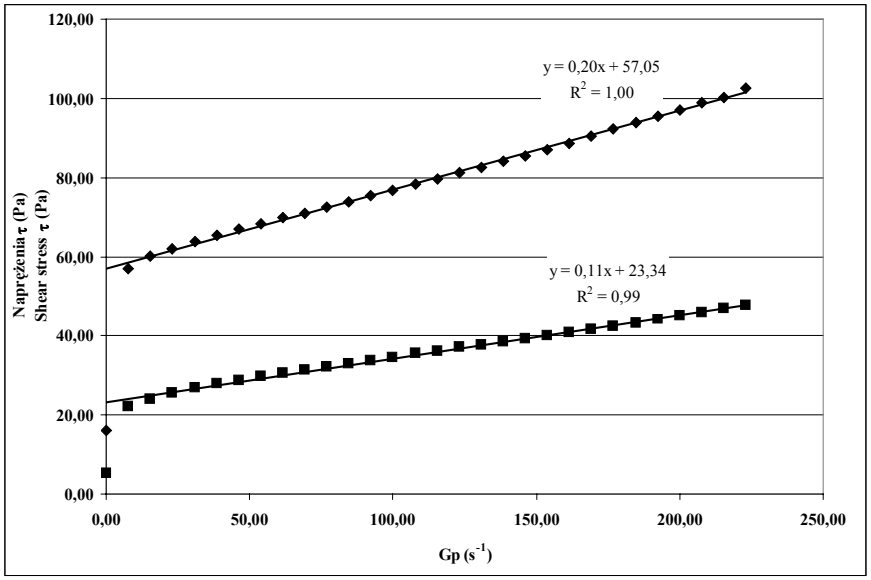
$$\tau = \tau_0 + \eta_p G_p \text{ (Pa)}$$

gdzie:

τ – naprężenie ścinające,
τ_0 – reologiczny próg płyniecia,
η_p – lepkość plastyczna,
G_p – prędkość deformacji.

Pomierzoną pseudokrzywą płynięcia wraz z jej wyrównaniem modelem Binghama przedstawia rysunek 4. Regularny kształt pseudokrzywej płynięcia

pokazuje, że wpływ 10% zawartości drobnych cząstek o d<6,3 μm jest wystarczający, aby nadać badanej próbce osadu typowe cechy materiału spoistego.



Rysunek 4. Przykładowe reologiczne pseudokrzywe płynięcia dla osadów z jeziora Dąbia
Figure 4. Examples of rheological pseudoflow curves of sediments from Lake Dąbie

Krytyczne naprężenia erozyjne dla osadów o cechach spoistych wyrażane są jako funkcja reologicznego progu płynięcia τ_0. Migniot [1968] przedstawił zależność pomiędzy naprężeniami krytycznymi τ_{kr} dla początku erozji osadów o cechach lepko-plastycznych jako funkcję reologicznego progu płynięcia τ_0. Rozgraniczył on dwa obszary erozji, przy czym wartość naprężeń τ_0 = 1,5 Pa została uznana za wartość graniczną pomiędzy strefą erozji łatwej i trudnej Parzonka (1994). Wartości naprężeń dla poszczególnych reżimów wyrażone są zależnościami:

- dla strefy erozji łatwej $\tau_{kr} = 0{,}317\ \tau_0^{0,5}$ dla $\tau_0 \leq 1{,}5$ Pa
- dla strefy erozji trudnej $\tau_{kr} = 0{,}256\ \tau_0$ dla $\tau_0 > 1{,}5$ Pa

Uzyskane z wyrównania pseudokrzywych płynięcia wartości progu płynięcia τ_0 dla poszczególnych badanych prób zmieniały się w przedziale od 10,22 do 57,05Pa. Tak wysoka wartość tych naprężeń, w zestawieniu z kryterium Migniota wskazuje na to, że badany materiał mimo stosunkowo niskiej zawartości drobnych cząstek (około 10%) jest materiałem trudno erodowalnym.

Porównano obliczone wartości napełnień (tab. 4), przy których generowane są na dnie zbiornika przepływowego krytyczne naprężenia ścinające z wartością średniego napełnienia wynoszącego około 2,5 m. Z tego porównania widać, że dla osadów o niższych wartościach reologicznego progu płyniecia (τ_0<57Pa) napełnienia te mają wartości znacznie niższe od panującego średniego napełnienia w jeziorze Dąbie, co potwierdza fakt, iż rumowisko to znajduje się w ciągłym ruchu.

Tabela 4. Parametry początku erozji badanych osadów z jeziora Dąbie
Table 4. Erosion parameters of investigated sediments from Lake Dąbie

Próg płyniecia τ_0 (Pa) Yield stress τ_0 (Pa)	Reżim erozji wg kryterium Migniota Erosion regime after Migniot's criterion	napełnienie h (m) water depth h (m)	średnia prędkość przepływu $v_{śr}$ (m/s) mean flow velocity $v_{śr}$ (m/s)
57,05	Trudna/hard	2,98	1,45
30,40	Trudna/hard	1,59	1,06
23,34	Trudna/hard	1,22	0,93
18,33	Trudna/hard	0,96	0,82
10,22	Trudna/hard	0,53	0,61

WNIOSKI

1. Badania składu ziarnowego prób osadów z jeziora Dąbie wykazały, że są to pyły piaszczyste i piaski gliniaste. Tylko 3 próby osadów wykazały cechy charakterystyczne dla rumowiska o cechach spoistych, przy 10% zawartości cząstek drobnych o średnicach d<6,3.

2. Gęstości szkieletu gruntowego dla badanych osadów wynosiły od 2474 do 2510 kg/m^3 i są charakterystyczne dla rzecznych osadów o podwyższonej zawartości części organicznych.

3. Średnice reprezentatywne d_{50} zmieniały się w granicach od 0,040 do 0,090 mm.

4. Badane próbki mają małą zawartość części organicznych I_{om} od 10 do 14% i wilgotności W rzędu 160–400%. Są to wartości charakterystyczne dla osadów spoistych z zawartością części organicznych.

5. Przeprowadzone pomiary charakterystyk reologicznych potwierdziły spoisty charakter badanego materiału. Wartości reologicznego progu płynięcia zmieniały się w przedziale 10,22<τ_0<57,05 Pa. Określono je na podstawie aproksymacji pseudokrzywych płynięcia za pomocą modelu Binghama. Klasyfikuje to badany materiał do osadów trudno erodowalnych.

6. Porównanie głębokości krytycznych ze średnim napełnieniem jeziora Dąbie wynoszącym 2,5 m potwierdziło występującą permanentną mobilność rumowiska.

BIBLIOGRAFIA

Hydroprojekt Warszawa. *Badania geotechniczne oraz składu chemicznego osadów dennych jeziora Dąbie dla zadania „Udrożnienie toru wodnego w j. Dąbie"*. 2004.

Kurnatowski J., Orlewicz St. Mroziński Z., Kreft A. *Badania rozmywalności organicznych osadów dennych z koryta dolnej Odry*. Gospodarka Wodna, nr 9, Warszawa 1988.

Madeyski M., Parzonka W. *Physical and rheological features of bottom sediments from selected fish ponds*. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, CCCX, 1999.

Migniot C. *Etude des proprietes physiques de differents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques* La Houille Blanche, 7, 1968.

Parzonka W., Wolski W. *Przybliżone określanie charakterystyk plastyczno-lepkiego płynięcia jednorodnych mieszanin gruntowo-wodnych za pomocą pojedynczego cylindra wiskotestera*. Arch. Hydrotechniki, t. XV, z. 2, 1968.

Parzonka W. *Teoria wiskozymetrów dla jednorodnych mieszanin gruntowo-wodnych*, Rozprawy Inżynierskie 1, 16 (1968), Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1968.

Parzonka W. *Deposition and erosion of fine sediments in rivers*. Tempus Course on Erosion, Sediment Transport and Deposition Processes. SGGW, Warszawa 1994.

Parzonka W., Buchholz W., Coufal R., Kreft A., Meyer Z. *Wstępna ocena zamulania jeziora Dąbie*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich 4/1, Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie 2007.

Szutowicz J., *Studies of feasibility of using the dredging material in aspects of environmental engineering. Seminar on problems of environmental engineering in the Odra river mouth*. Technical University Szczecin, Department of Geotechnical Engineering, 1999.

Wolski T. *Prądy jeziora Dąbie i ich związek z reżimem hydrologicznym obszaru ujściowego Odry*. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Szczeciński 2004.

Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Środowiska
50-363 Wrocław
Pl. Grunwaldzki 24
e-mail: parzonka@poczta.onet.pl

Dr inż. Robert Głowski
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Środowiska
50-363 Wrocław
Pl. Grunwaldzki 24
e-mail: glowski@iis.ar.wroc.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Marek Madeyski*