INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND EKOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 4/2/2007, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 149–157
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Włodzimierz Parzonka, Robert Głowski, Andrzej Kreft

WSTĘPNA OCENA CECH DYNAMICZNYCH NAMUŁÓW Z JEZIORA DĄBIE

PRELIMINARY ESTIMATION OF DYNAMIC FEATURES OF MUDS FROM LAKE DĄBIE

Streszczenie

Namuły zalegające w jeziorze Dąbie mają cechy plastyczno-lepkie. Zawierają one dużą ilość materii organicznej oraz są zanieczyszczone przez ścieki komunalne i przemysłowe. Obecność tych substancji zmienia w istotny sposób cechy dynamiczne rumowiska drobnoziarnistego oraz warunki sedymentacji i resuspensji cząstek stałych. Przez jezioro Dąbie przechodzi ważny tor wodny o długości 14,5 km, szerokości 150 m i o głębokości gwarantowanej 3,2 m. Jest on okresowo pogłębiany za pomocą refulerów.

Autorzy przeprowadzili wstępną ocenę własności fizycznych i reologicznych próbek pobranych z dna jeziora Dąbie w rejonie toru wodnego. Miąższość warstwy namułów wynosi od 3 do 5 m. Mają one konsystencję płynną, a ich wilgotność wynosi od 300–500%. Nominalna średnica ziarn d_{50} waha się od 12–15 μm na powierzchni do 44–95 μm przy dnie, a zawartość części organicznych zmienia się od 10–30%. Badania cech reologicznych namułów organicznych wykazały, że zachowują się one jak ciecze nienewtonowskie. Ich cechy można opisać za pomocą dwuparametrowego modelu Binghama.

Słowa kluczowe: osady jeziorne, cechy fizyczne i reologiczne namułów

Summary

The muds settled in the Lake Dąbie have visco-plastic properties. They contain many organic matter and are polluted by sewage from communities and industry. The presence of this substances changes clearly the dynamic properties of the fine grained material, as well the conditions of sedimentation and resuspension of solid particles. An important navigation way is located in the lake Dąbie with following parameters: length 14.5 km, width 150 m and guaranteed depth 3.2 m. This way is periodically deepened by dredgers.

The authors have performed a preliminary estimation of the physical and rheological features of mud samples from the Lake Dąbie in the region of the navigation way. The thickness of the mud layer is equal 3–5 m. The fine grined sediments have a liquid consistency, and their water content is equal to some 300-500%. The nominal granulometric size d_{50} changes between 12–15 μm for superficial muds and between 44-95 μm for bottom muds, and the organic matter content varies between 10 – 30%.

The studies on rheological features of organic sediments proved that they behave as non-newtonian liquids. Their behaviour can be described by the two-parameter rheological model of Bingham.

Key words: *lake sediments, physical and rheological features of muds*

WSTĘP

Jezioro Dąbie wchodzi w skład następujących 4 regionów wodnych, związanych ze szlakami wodnymi, [Szutowicz 1999]:

– szlak wodny Zatoki Pomorskiej,
– szlak wodny ujścia Świny,
– szlak wodny przecinający Zatokę Szczecińską,
– szlak wodny Dolnej Odry, wraz z portem Szczecińskim, obejmujący jezioro Dąbie.

Jezioro to położone jest w granicach aglomeracji miasta Szczecina. Ma ono powierzchnię rzędu 54 km^2, długość równą 15 km i szerokość maksymalną rzędu 7,5 km. Wg Krefta [1989] stanowi ono naturalny odbiornik kry lodowej z dolnego odcinka Odry granicznej i pełni ważne zadanie w ramach ochrony aglomeracji szczecińskiej przed powodziami zatorowymi. Wskutek wieloletnich zaniedbań w zakresie pogłębiania jeziora, a zwłaszcza toru wodnego, nastąpiło znaczne jego wypłycenie. Ogranicza to pracę lodołamaczy, a w konsekwencji zmniejsza się pojemność jeziora i możliwość przyjmowania połamanej kry.

Przez jezioro przechodzi ważny tor wodny długości 14,5 km, 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).

Jezioro Dąbie jest w znacznym stopniu zamulone. Warstwa osadu dennego ma miąższość rzędu 3-5 m, większą od średniej głębokości wody równej 2,61 m (1996). Woda i namuły jeziora zawierają znaczną ilość 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, w tym Al, Zn, Cu, Cd, Hg, jak również znaczne ilości związków ropopochodnych. Nie stwierdzono natomiast przekroczenia dopuszczalnych wartości fenoli, cyjanków i detergentów oraz lotnych węglowodorów aromatycznych.

Wg Szutowicz [1999] koncentracje zanieczyszczeń w wodach Dolnej Odry są najwyższe w rejonie Szczecina i w samym jeziorze Dąbie. Koncentracje te, poniżej Szczecina wyraźnie maleją z biegiem rzeki. Zanieczyszczenie wody i osadów zagraża środowisku naturalnemu, a zwłaszcza Parkom Krajobrazowym – tak po polskiej, jak i po niemieckiej stronie rzeki.

Pogarszający się stan środowiska naturalnego oraz warunków żeglugi i ochrony przeciwpowodziowej w estuarium Odry spowodował podjęcie wspólnych prac technicznych i badawczych przez polską i niemiecką administrację wodną, związaną z Odrą graniczną. Zawarto polsko-niemieckie porozumienie na szczeblu rządowym (2006–2007). Opracowany program i harmonogram realizacji zadań inwestycyjnych, dotyczących ochrony przeciwpowodziowej, oraz modernizacji zabudowy regulacyjnej Dolnej Odry [por. Kreft 1989] obejmuje:

a) harmonogram modernizacji zabudowy regulacyjnej granicznego odcinka Odry (2007–2030); prace te będą finansowane przez każdą ze stron na swoim brzegu,
b) pogłębienie jeziora Dąbie,
c) realizację połączenia żeglugowego dla statków morsko-rzecznych pomiędzy miejscowością Schwedt i Zatoką Pomorską.

Pogłębienie jeziora Dąbie planowane jest w latach 2007–2011 w dwóch etapach:

– 2007–2008 – projekty i uzgodnienia,
– 2009–2011 – przetargi i realizacja zadania.

Przewidywana ilość urobku z pogłębienia toru wodnego wynosi około 810 tys. m^3. Strona polska i niemiecka mają w równych częściach partycypować w kosztach pogłębienia jeziora Dąbie oraz, w następnych latach, w kosztach utrzymania parametrów toru wodnego.

Z powyższego wynika, że 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 oceny warunków resuspensji osadów oraz bagrowania toru wodnego konieczne jest wyznaczenie podstawowych cech fizycznych i reologicznych osadów. W warunkach naturalnych cechy dynamiczne osadu zależą od właściwości rumowiska. Rumowisko o przeważającej zawartość grubych cząstek mineralnych (piaski drobne i grube, żwiry) z niewielką zawartością (z reguły poniżej 20%) drobnych cząstek o średnicach $d < 6{,}3$ μm ma cechy rumowiska niespoistego. Wraz ze wzrostem zawartości cząstek gliniastych, pylastych i ilastych, gdzie dominuje wpływ oddziaływań kohezyjnych, rumowisko wykazuje

wyraźne cechy materiału spoistego. Dodatkowo o występowaniu cechy spoistości rumowiska decyduje zawartość części organicznych I_{om}. W ciekach i akwenach wodnych podlegających antropopresji (zrzut zanieczyszczeń przemysłowych, ścieków) naturalne właściwości rumowiska ulegają deformacji. Często w takich warunkach mamy do czynienia z tzw. rumowiskiem częściowo spoistym, gdzie cząstki rumowiska oklejane są przez drobne cząstki zanieczyszczeń, nadając im w sposób sztuczny cechy spoistości.

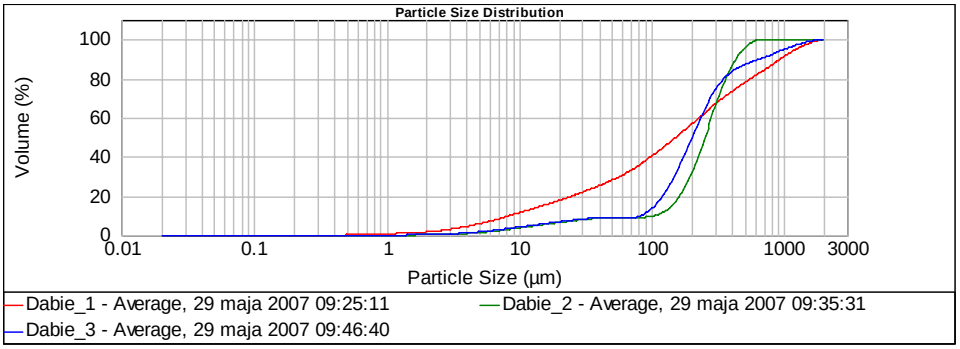
Do badań cech fizycznych i reologicznych pobrano trzy próby namułów z południowo-zachodniego rejonu ujściowego rzeki Regalicy do jeziora Dąbie.

Dla wstępnej oceny cech dynamicznych badanych prób namułów wykonano oznaczenie następujących cech fizycznych:

– gęstości szkieletu gruntowego ρ_s (kg·m^{-3}),
– zawartości części organicznych I_{om} (%),
– wilgotności W (%),
– składu ziarnowego, na podstawie którego wyznaczono średnicę reprezentatywną d_{50} (μm).

Wartości koncentracji objętościowej c_v i wagowej T_s (g·dm^{-3}) zostały obliczone z wykorzystaniem wyznaczonych wyżej parametrów fizycznych rumowiska.

Skład ziarnowy rumowiska określono metodą laserową z wykorzystaniem analizatora Malver Master Sizer 2000. Badanie składu ziarnowego wykonano bez użycia jakichkolwiek środków do deflokulacji cząstek i bez stosowania ultradźwięków do rozbicia mikroagregatów. Uzyskany rozkład uziarnienia dla badanych trzech prób namułów z jeziora Dąbie pokazuje rysunek 1. Określone parametry fizyczne dla badanych osadów zestawiono w tabeli 1.



Rysunek 1. Skład ziarnowy namułów z jeziora Dąbie. Oznaczenia: Dąbie_1 – próbka nr 1, Dąbie_2 – próbka nr 2 i Dąbie_3 – próbka nr 3

Figure 1. Grain size distribution curves for mud samples from Lake Dąbie. Sample description: Dąbie_1 – sample № 1, Dąbie_2 – sample № 2, Dąbie_3 – sample № 3

Badania składu ziarnowego wykazały, że osady są drobnymi piaskami. Z rysunku 1, przedstawiającego skład ziarnowy badanych prób osadów wyraźnie widać, że podwyższoną zawartość drobnych cząstek o d < 6,3 μm, nadających materiałowi cechy spoistości miała tylko próbka nr 1. Zawartość tych cząstek sięga około 10%. Reprezentatywne średnice cząstek d_{50} zmieniały się w granicach od 150 do 250 μm (0,15–0,25 mm), co potwierdzają badania Geoteko Warszawa (2004), (por. tab. 2).

Tabela 1. Zestawienie parametrów fizycznych osadów z jeziora Dąbie
Table 1. Physical parametrs for mud samples from Lake Dąbie

Parametr Parameter	Numer próbki Sample number		
	1	2	3
ρ_s (kg·m^{-3})	2480	–	2640
I_{om} (%)	0,52	1,32	2,41
W (%)	143,5	44	44,8
d_{50} (μm)	150	200	250
c_v (-)	0,22	0,46	0,46
T_s (kg.m^{-3})	543,9	1215,3	1209,5

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 particie diameter,
c_v (-) – koncentracja objętościowa / volume concentration,
T_s (kg·m^{-3}) – koncentracja wagowa / weight concentration.

Wartości gęstości ρ_s zmieniały się w granicach 2480–2640 kg·m^{-3}, charakterystycznych dla osadów mineralnych. Zawartość części organicznych określono metodą wyżarzania, stosowaną w geotechnice.

Tabela 2. Wyniki badań laboratoryjnych osadów z jeziora Dąbie wg Geoteko (2004)
Table 2. Results of laboratory tests for deposits from Lake Dąbie, after Geoteko (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 kontent [%]			d_{50} [mm]	W_n [%]	I_{om} [%]
			iłowa clay	pylasta silt	piaskowa 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		

Widok próbki osadów po wysuszeniu przedstawia rysunek 2. W wysuszonym materiale widać dużą zawartość części muszli.

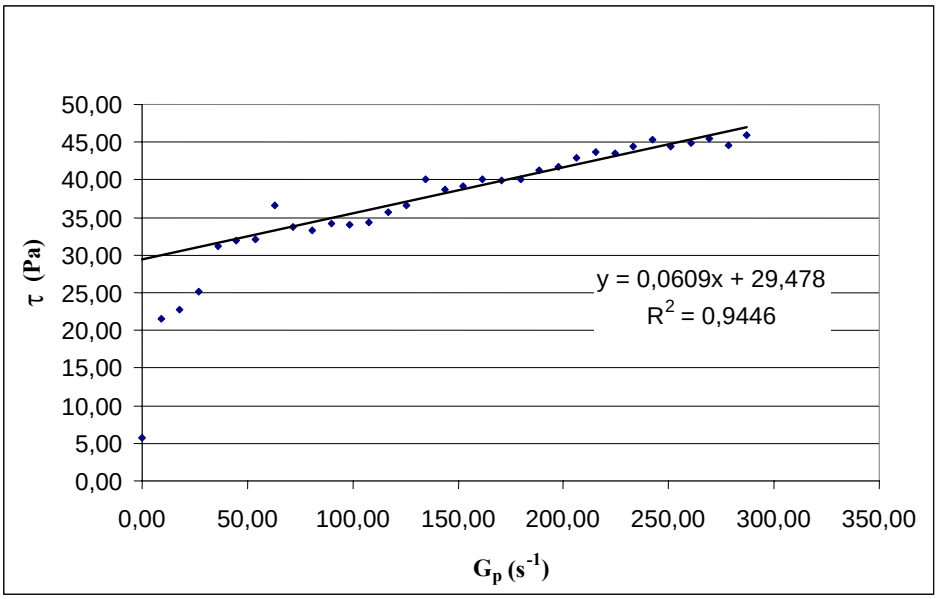
Rysunek 2. Wysuszona próbka osadów z jeziora Dąbie
Figure 2. Dry mud sample from Lake Dąbie

Badania cech reologicznych osadów przeprowadzono z zastosowaniem wiskozymetru rotacyjnego firmy HAAKE. Pomiary pseudokrzywych płynięcia wykonano dla wszystkich trzech prób osadów. Przeprowadzone badania potwierdziły wynik badań składu ziarnowego, tylko próbka nr 1 (rys. 3.) ma cechy materiału spoistego. Pseudokrzywa płynięcia odpowiada wg metodyki opracowanej przez Parzonkę [1968] modelowi ciała lepko-plastycznego 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 3. Nieregularny kształt pseudokrzywej pokazuje, że wpływ 10% zawartości drobnych cząstek o d < 6,3 μm nie jest wystarczający, aby nadać badanej próbce osadu typowe cechy materiału spoistego, a jedynie wykazuje, że ma ono właściwości częściowo spoiste.



Rysunek 3. Pseudokrzywa płynięcia dla próbki 1 osadu z jeziora Dąbie
Figure 3. Pseudoflow curve for mud sample 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 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. 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

Uzyskana z wyrównania pseudokrzywej płynięcia wartość naprężeń progu płynięcia τ_0 wyniosła około 29 Pa. Tak wysoka wartość tych naprężeń, w zestawieniu z kryterium Migniota wskazuje, że materiał próby 1 mimo stosunkowo niskiej zawartości drobnych cząstek (około 10%) jest materiałem trudno erodowalnym.

WNIOSKI

1. Badania składu ziarnowego 3 prób osadów z jeziora Dąbie wykazały, że są to drobne piaski. Tylko próba osadów nr 1 wykazała cechy charakterystyczne dla rumowiska o cechach częściowo spoistych, przy zawartości cząstek drobnych o średnicach d < 6,3 μm wynoszącej około 10%.

2. Gęstości szkieletu gruntowego dla badanych osadów zmieniały się w granicach od 2480–2640 $kg \cdot m^{-3}$, charakterystycznych dla rumowiska mineralnego z niewielką zawartością części organicznych.

3. Średnice reprezentatywne d_{50} zmieniały się w granicach od 150 do 250 μm.

4. Badane próbki mają małą zawartość części organicznych I_{om} od 0,52 do 2,41% i wilgotności W rzędu 44–143,5%. Są to wartości charakterystyczne dla osadów niespoistych i częściowo spositych.

5. Przeprowadzone pomiary charakterystyk reologicznych potwierdziły częściowo spoisty charakter materiału próby 1. Wartość reologicznego progu płynięcia $\tau_0 = 29{,}48$ Pa, określona na podstawie wyrównania uzyskanej pseudokrzywej płynięcia modelem Binghama, klasyfikuje badany materiał wg kryterium Migniota do osadów podlegających trudnej erozji.

6. Dla dokładnego rozpoznania cech dynamicznych osadów z jeziora Dąbie i ich przestrzennej zmienności w zbiorniku konieczne jest pobranie dużych prób osadów spoistych.

7. Autorzy planują przeprowadzenie kolejnej serii badań poświęconej namułom z jeziora Dąbie o zawartości części organicznych I_{om} rzędu 20–30% i o wyraźnych właściwościach plastyczno-lepkich.

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.

Kreft A. *Wpływ zdolności retencyjnej jeziora Dąbie na rozpływy w sieci rzecznej dolnej Odry*. Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, 1989.

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, 1968, 7.

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. 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.

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

Dr inż. Andrzej Kreft
Politechnika Szczecińska
Katedra Budownictwa Wodnego
70-311 Szczecin
Al. Piastów 50
e-mail: Andrzej.Kreft@RZGW.Szczecin.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Wojciech Bartnik*