

Robert Głowski, Włodzimierz Parzonka, Jan Kempński, Hartmut Eckstädt

CHARAKTERYSTYKA REOLOGICZNA PROCESU SEDYMENTACJI I EROZJI NAMUŁÓW RZECZNYCH

REOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SEDIMENTATION PROCESS AND EROSION OF RIVER SEDIMENTS

Streszczenie

Autorzy przeprowadzili ocenę dynamiki zmian koryt rzecznych spowodowanych przez procesy sedymentacyjne i erozyjne. Zbadano cechy fizyczne i reologiczne wybranych osadów spoistych i częściowo spoistych. Próbki osadów pochodziły z nizinnych odcinków rzeki Odra (Polska) i rzeki Warnow (Niemcy). Charakterystyki reologiczne zbadano za pomocą wiskozymetrów rotacyjnych. Badane namuły miały cechy typowe dla cieczy nienewtonowskich. Charakterystyki erozyjne wyznaczono na podstawie metodyki Migniota. Sprawdzono je w skali naturalnej po przejściu fali powodziowej przez stopień Brzeg Dolny, która spowodowała częściowe wymycie osadów z górnego stanowiska jazu.

Słowa kluczowe: rumowisko unoszone i zawieszane, sedymentacja, erozja hydrauliczna

Summary

The authors performed an estimation of the dynamic of the river bed changes caused by sedimentation and erosion processes. The physical and rheological parameters for chosen cohesive and semi-cohesive sediments were investigated. Mud samples were taken from 3 different localisation on Middle Odra (Poland) and from 2 localisations on Warnow river (Germany). Rheological characteristics were studied with use of the rotative viscometer. Erosion characteristics of the mud's were studied accordingly to methodology of Migniot [1968]. Results for Middle Odra were verified in the natural scale during the passage of the catastrophic flood through barrage Brzeg Dolny in 1997. This flood caused partly erosion of mud's from the upstream part of this barrage.

Key words: *suspended and wash load, sedimentation, hydraulic erosion*

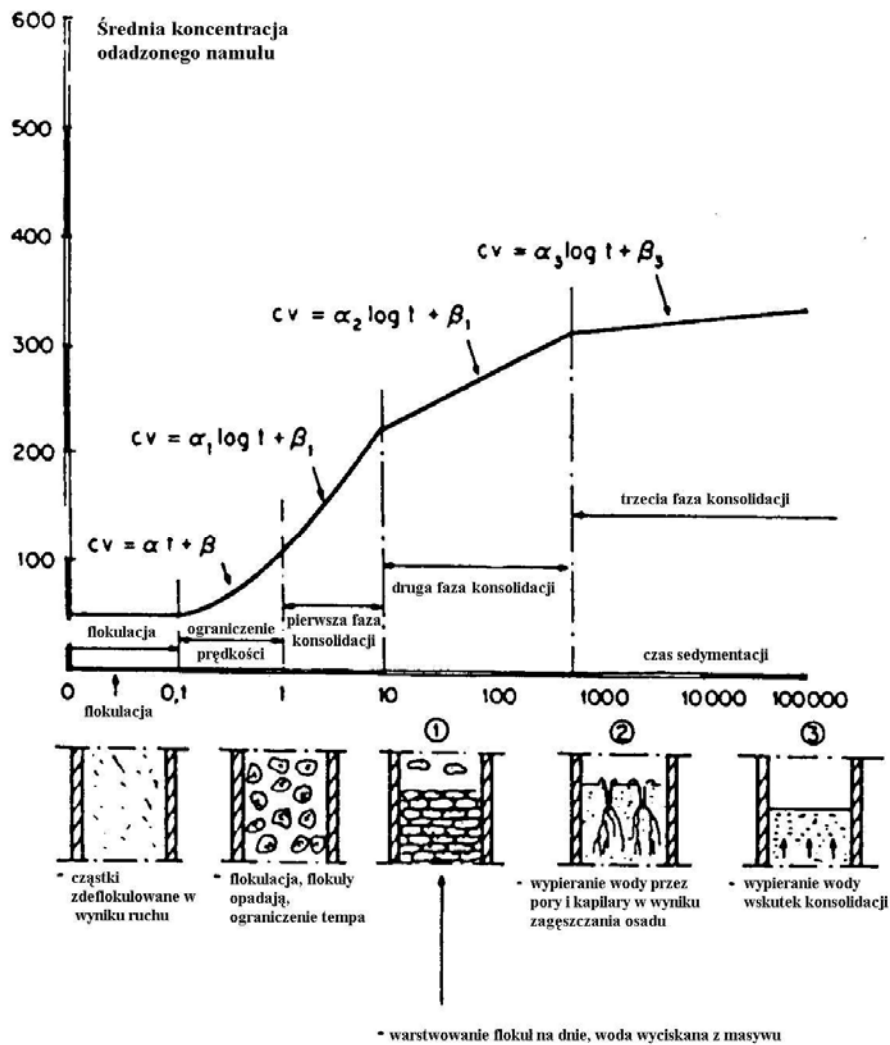
WSTĘP

Odkłady osadów o cechach spoistych lub częściowo spoistych powstają w wyniku procesu sedymentacji rumowiska unoszonego i zawieszzonego. Rumowisko to jest polifrakcyjną mieszaniną drobnych cząstek glin, ilów i pyłów, rozdrobnionej materii organicznej i szczątków organizmów żywych, zawierającej niejednokrotnie cząstki grubsze, np. drobnych piasków. Przebieg procesu sedymentacji tego rumowiska możliwy jest w miejscach, w których prędkość transportowa jest na tyle mała, że cząstki drobne mogą opadać na dno rzeki lub zbiornika pod wpływem siły grawitacji. Przebieg procesu sedymentacji zależy od wielu czynników, spośród których najistotniejszymi są: koncentracja cząstek stałych w strumieniu wody, prędkość przepływu, geometria przekroju rzeki, geometria czaszy zbiornika, występowanie roślinności, zawartość związków chemicznych i soli powodujących wystąpienie zjawiska flokulacji.

W zależności od koncentracji cząstek w strumieniu wody proces opadania cząstek może przebiegać w dwóch reżimach: jako tzw. opadanie swobodne przy niskich koncentracjach cząstek i opadanie hamowane przy wysokich koncentracjach cząstek. Wówczas dochodzi do wzajemnego oddziaływania cząstek rumowiska na siebie, któremu niejednokrotnie towarzyszy zjawisko powstawania flokuł i agregatów. Flokuły jako cząstki o dużo większych gabarytach opadają na dno ze znacznie większymi prędkościami niż cząstki elementarne. Powstające na dnie osad podlega kilku fazom sedymentacji i konsolidacji. Jest to proces bardzo złożony, poznanie jego mechanizmu i parametrów opisujących jest ważne ze względu na poznanie strukturalnej odporności osadów na procesy erozyjne [Migniot 1968; Huysentruyt 1992]. We właściwym procesie konsolidacji cząstki osadzonego materiału oddziałują pomiędzy sobą przez cały czas. Powstająca na dnie świeża, porowata warstwa osadu ma charakter żelu, który ma niską mechaniczną odporność na ścinanie. W przypadku namulów zmienne obciążenia wywołujące proces konsolidacji pochodzą od zmiennych poziomów wody nadosadowej oraz od wzrastających obciążeń od systematycznie odkładanych kolejnych warstw osadu. Warstwy niżej położone obciążane są kolejnymi warstwami wierzchnimi. W procesie konsolidacji osadów [Migniot 1968] można wyróżnić 3 fazy (rys. 1).

W pierwszej fazie sedymentacji (opadania) następuje opadanie pojedynczych cząstek zawieszonych w wodzie, a drobne cząstki (ilaste i pylaste) przy odpowiednio wysokiej ich koncentracji, łącząc się tworzą agregaty (flokuły), których prędkość opadania jest wyższa niż prędkość opadania pojedynczych cząstek. Wskutek wzrostu koncentracji osadzających się cząstek mamy tutaj do czynienia z „zakłóconym” opadaniem cząstek i wstępną fazą ich konsolidacji.

W drugiej fazie konsolidacji wskutek dalszego zagęszczania się następuje zmniejszanie się wielkości porów w osadzie. W jego masywie powstają cienkie pionowe kapilary, umożliwiające migrację wody porowej. Czas trwania tej fazy określa się w tygodniach.



Rysunek 1. Fazy konsolidacji osadu wg Migniota [1968]

Figure 1. Mud consolidation steps after Migniot [1968]

W trzeciej, najdłuższej trwającej fazie (miesiące i lata) pozostałości wody porowej są wypierane na drodze filtracji przez wstępnie skonsolidowany maszyn lub przechodzą do stanu wody błonkowej, otaczającej cząstki osadu (woda związana, trudno usuwalna). Ostatnie ślady struktury porowatej są niszczone.

Faza sedymentacji lub konsolidacji namułu determinuje jego stan, np. płynny lub plastyczno-lepki oraz jego odporność na dynamiczne działanie strumienia.

Głównymi czynnikami wpływającymi na proces konsolidacji wg Huysen-truyt [1992], są:

- początkowa miąższość osadu,
- początkowa koncentracja warstwy świeżo osadzonego namułu,
- współczynnik przepuszczalności warstwy, jej skład granulometryczny, zawartość części organicznych, zasolenie i temperatura wody.

Skutkami procesu sedymentacji są np. zmniejszanie pojemności zbiorników wodnych i powstawania podwodnych wysp, które z czasem ulegają wypiętrzeniu ponad zwierciadło wody i szybko porastają roślinnością. W ten sposób przyczyniają się do szybkich zmian morfologicznego układu czasz zbiorników i koryt cieków. Występowanie odkładów rumowiska o cechach spoistych generuje występowanie negatywnych skutków, wśród których można wymienić:

- ograniczenie żeglowności szlaków wodnych,
- zmniejszenie przepustowości koryt rzecznych dla przejścia wielkich wód oraz ograniczenie przepustowości budowli piętrzących,
- problemy z eksploatacją ujęć wodnych wynikające z okresowego pogorszenia jakości wody ze względu na resuspensję osadów i zawartych w nich zanieczyszczeń.

Artykuł prezentuje wyniki badań cech fizycznych i reologicznych dla rzecznych osadów o cechach spoistych pochodzących z różnych lokalizacji na rzece Odrze i Warnow, wykonanych dla określenia reżimu wystąpienia ich hydraulicznej erozji na podstawie kryterium Migniota [1968]. Charakterystyka procesu erozji jest najczęściej opisywana za pomocą parametrów stosowanych w mechanice gruntów, takich jak: nominalna wielkość ziaren np. d_{50} , gęstość szkieletu gruntowego ρ_s , procentowa zawartość materiałów gliniastych, granica płynności, wilgotność, zawartość części organicznych i soli.

Metody oceny hydraulicznej erozji oparte są z reguły na znajomości granicznych prędkości strumienia i naprężeń krytycznych.

Migniot [1968] określił zależność pomiędzy naprężeniami krytycznymi τ_{er} dla erozji lepkoplastycznych osadów jako funkcję reologicznego progu płynięcia τ_0 . Rozgraniczył on dwa reżimy erozji, łatwą i trudną. Wartością rozgraniczającą oba reżimy wg Migniota jest wartość naprężeń $\tau_0 = 1,5$ Pa. Zależności opisujące te reżimy erozji (wg Migniota) są następujące:

$$\text{dla strefy erozji łatwej } \tau_{er} = 0,317 \tau_0^{0,5} \quad \text{dla } \tau_0 < 1,5 \text{ Pa} \quad (1)$$

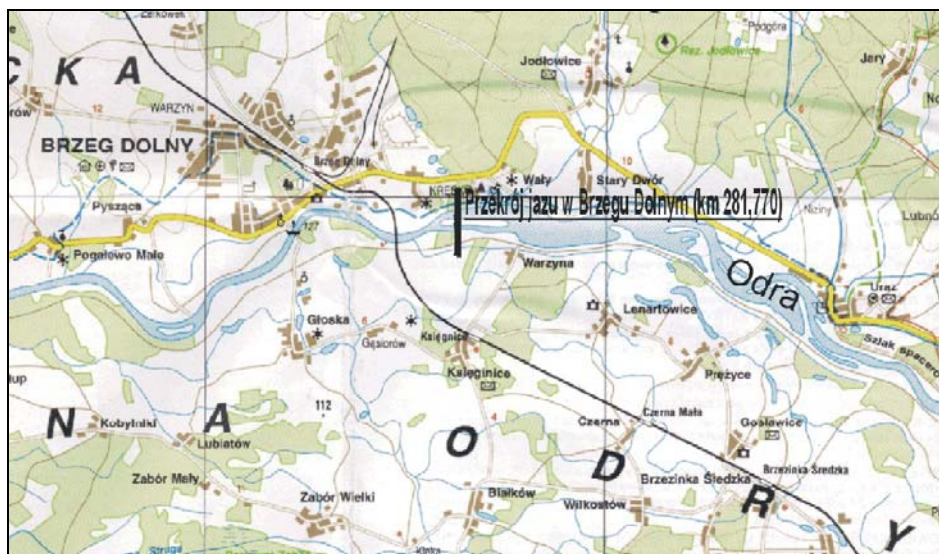
$$\text{dla strefy trudnej erozji } \tau_{er} = 0,256\tau_0 \quad \text{dla } \tau_0 > 1,5 \text{ Pa} \quad (2)$$

Ocenę własności reologicznych przeprowadzono na podstawie metodyki opracowanej przez Parzonkę [1968], Parzonkę, Omelańskiego [1970], Parzonkę, Kempiańskiego [1984], dla określenia charakterystyk reologicznych osadów ze zbiorników algierskich i polskich [Parzonka, Kempiański 1984]. Metodyka ta została również użyta z powodzeniem przez Madeyskiego [1997], dla charakterystyki osadów ze stawów rybnych. Do pomiaru charakterystyk reologicznych (pseudokrzywych płynięcia) zastosowano wiskozymetr rotacyjny Rheotest 2 firmy MEDINGEN typu Couette'a-Searla o wirującym cylindrze wewnętrznym.

CHARAKTERYSTYKA MIEJSC POBORU PRÓB OSADÓW

Badania przeprowadzono dla namulów pobranych z trzech miejsc na Odrze skanalizowanej – w Brzegu Dolnym, Rędzinie i w rejonie mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu oraz na rzece Warnow w Niemczech.

Stopień w Rędzinie (km 260,1 biegu Odry) był do 1922 r. ostatnim stopniem na skanalizowanym odcinku rzeki Odry. W 1958 r. oddano do eksploatacji stopień w Brzegu Dolnym (281,770 km) rysunek 2.



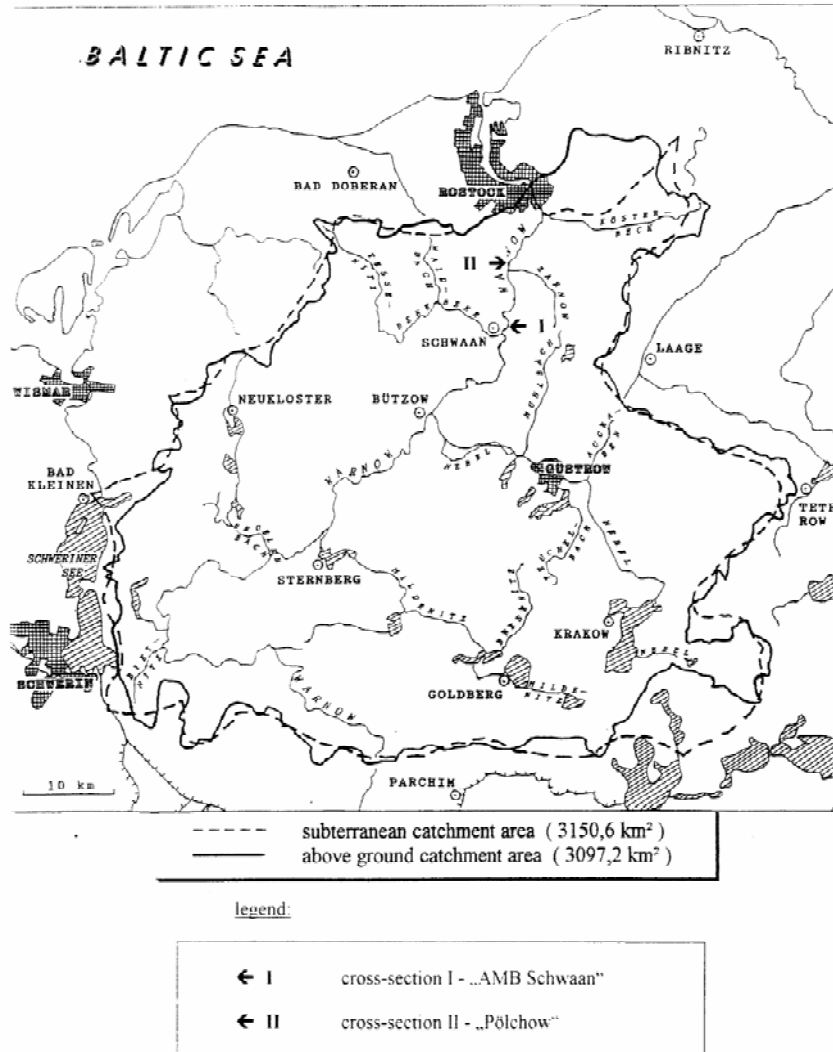
Rysunek 2. Lokalizacja stopnia w Brzegu Dolnym
Figure 2. Localization of barrage Brzeg Dolny

Badania osadów rozpoczęto od namulów pochodzących z górnego stanowiska przyjazowego zbiornika w Brzegu Dolnym. Jest on ostatnim stopniem wodnym na skanalizowanym odcinku Odry. Stopień zlokalizowano w łuku koryta w 281,770 kilometrze biegu rzeki Odry. Między wlotem do górnego awanportu śluzy a jazem koryto składa się z dwóch części (lewej półki zalewowej i koryta właściwego), gdzie cztery skrajne przęsła jazu usytuowane są na półce zalewowej, zaś piąte przęsło i budynek elektrowni w nurcie rzeki. Jaz przystosowany jest do piętrzenia wody na poziomie 108,00 m NN. Ostatnim obiektem wchodzącym w skład omawianego stopnia jest śluza żeglugaowa.

Powstały powyżej jazu zbiornik wodny zajmuje powierzchnię około 5 km² przy szerokości zwierciadła wody od 400 do 700 m na długości około 8 km. Na dalszym odcinku, o długości około 13 km zwierciadło spiętrzonyj wody mieści się w obrębie koryta rzeki. Średnie głębokości na zalewie wynoszą od 0,85 do 2,5 m, a w bezpośrednim sąsiedztwie jazu dochodzą do 8 m. W pierwotnym stanie (1958 r.) zbiornik miał pojemność ca 7 mln m³. Wskutek zamulenia jego pojemność zmalała i wynosi dziś około 6 mln m³. Wybudowanie stopnia piętrzącego w Brzegu Dolnym spełniło z jednej strony stawiane przed tą budowlą zadanie zahamowania postępu procesu erozji lokalnej i liniowej poniżej stopnia w Rędzinie, z drugiej jednak strony, powstanie zbiornika zintensyfikowało zachodzące w jego obrębie i na odcinku do Rędzina procesy sedymentacyjne [Mokwa 2002].

Próby namułu pobrano z czaszy zbiornika Brzeg Dolny, ze zbiornika jazu w Rędzinie oraz z swobodnie płynącego odcinka rzeki Odry w pobliżu mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu.

Dolina rzeki Warnow położona jest w północno-wschodniej części Niemiec (rys. 3.) z ujściem w rejonie Rostocku (Warnemünde). Dolny odcinek rzeki charakteryzuje się małymi spadkami rzędu 0,01‰. Uniwersytet w Rostocku od wielu lat prowadzi badania nad spływem powierzchniowym, transportem rumowiska unoszonego w rzece oraz modelowaniem procesu opad – spływ powierzchniowy. Zagadnienia te ważne są ze względu na jakość wody, która wykorzystywana jest dla zaopatrzenia miasta Rostock w wodę pitną. Charakterystyczną cechą osadów rzecznych Warnow jest warstwowa budowa ich odkładów. Cienkie warstwy namulów pokrywają warstwy osadów zbudowane z materiału organicznego i mineralnego. Taka struktura namulów powoduje, że mają one cechy osadów spoistych lub częściowo spoistych. Do badań reologicznych pobrano trzy próby osadów – dwie w przekroju wodowskazowym Schwaan i jedną w Pölchow. Charakterystykę geotechniczną osadów zawiera tabela 1.



Rysunek 3. Lokalizacja rzeki Warnow z oznaczonymi przekrojami wodowskazowymi I i II

Figure 3. Localization of the river Warnow with marked mud sampling gauging stations I and II

METODYKA BADAŃ PRÓB OSADÓW DROBNOZIARNISTYCH

Autorzy przeprowadzili badania właściwości fizycznych i reologicznych dla ww. pobranych prób osadów. Metodyka pomiarów obejmowała:

1. pobór prób osadów do badań z różnych rejonów rzeki Odry i Warnow,
2. określenie podstawowych cech fizycznych badanych osadów,
3. wyznaczenie cech reologicznych dla poszczególnych prób osadów,
4. ocenę możliwości hydraulicznej erozji badanych osadów na podstawie kryterium Migniota [1968].

PODSTAWOWE CECHY FIZYCZNE BADANYCH OSADÓW

Podstawowymi parametrami opisującymi cechy fizyczne badanych materiałów, ważnymi również z reologicznego punktu widzenia są:

- skład ziarnowy – jako parametr reprezentatywny stosowana jest nominalna średnica d_{50} (mm) lub średnica miarodajna d_m ; niektórzy badacze podają jako istotną zawartość cząstek $d < 0,02$ mm (%) i zawartość cząstek $d > 0,05$ mm (%),
- zawartość części organicznych I_{om} (%),
- gęstość szkieletu gruntowego ρ_s ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
- wilgotność naturalna W_{nat} (%),
- granica płynności Atterberga określona metodą Casagrande lub za pomocą stożka opadowego.

Zestawienie podstawowych parametrów geotechnicznych charakteryzujących badane materiały podano w tabeli 1. Na podstawie wstępnej analizy cech fizycznych można stwierdzić, że badane próbki namułów odrzańskich stanowią wielofrakcyjną kompozycję gruntów spoistych (pyły, gliny i ily) i niespoistych (drobnych piasków) z wysoką zawartością części organicznych I_{om} ($13,0 \leq I_{om} \leq 19,7\%$). Osady te można zakwalifikować jako organiczny namuł ilasto-pylasty. Namuły z rzeki Warnow (por. tab. 1.) w obu analizowanych przekrojach wodowskazowych Schwaan i Pölchow mają niższe zawartości, tak części organicznych, jak i drobnych cząstek o $d < 0,02$ mm. Zarówno wysoka zawartość części organicznych $I_{om} > 10\%$ jak i drobnych frakcji o średnicach $d < 0,063$ mm (powyżej 10%) decyduje o tym, czy badany namuł ma cechy namułu spoistego lub częściowo spoistego.

Tabela 1. Parametry geotechniczne badanych osadów
Table 1. Geotechnical parameters for studied mud samples

| Parametr Parameter | Lokalizacja prób osadu Localization of th mud samples | | | | | |
|-------------------------------|--|--|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Brzeg Dolny | Most Grunwaldzki Grunwaldzki bridge | Rędzin | Warnow (Schwaan) | Warnow (Schwaan) | Warnow (Pölchow) |
| d_{50} (mm) | 0,015 | 0,04 | 0,026 | - | - | - |
| $d < 0,02$ mm | 55 | – | 45 | 7,03 | 11,8 | 4,81 |
| $d > 0,05$ mm | 71 | – | 76,4 | – | – | – |
| I_{om} (%) | 19,7 | 14,8 | 13,0 | 3,51 | 2,03 | 1,63 |
| W_{II} (%) | 60,45* | 118,8* | 85,7* | – | – | – |
| ρ_s (kg/m ³) | 2370 | 1657 | 2532,4 | – | – | – |

* – granica płynności według metody Casagrande

* – liquid limit by Casagrande method.

REOLOGICZNE BADANIA OSADÓW

Ocenę własności reologicznych przeprowadzono dla poszczególnych prób i warstw osadu, na podstawie metodyki opracowanej przez Parzonkę [1968], Parzonkę, Omelańskiego [1970], Parzonkę, Kempnińskiego [1984]. Metodyka ta została również użyta przez Madeyskiego [1997] dla charakterystyki osadów ze stawów rybnych. Do pomiaru charakterystyk reologicznych namulów zastosowano wiskozymetr rotacyjny typu Couette'a-Searla o wirującym cylindrze wewnętrznym Rheotest 2.

Do wyrównania liniowej części badanych pseudokrzywych płynięcia można zastosować dwuparametrowy model Bingham (rys. 5.). Równanie modelu Bingham ujmuje dwa podstawowe parametry reologiczne, tj. próg płynięcia τ_0 i lepkość plastyczną η_p .

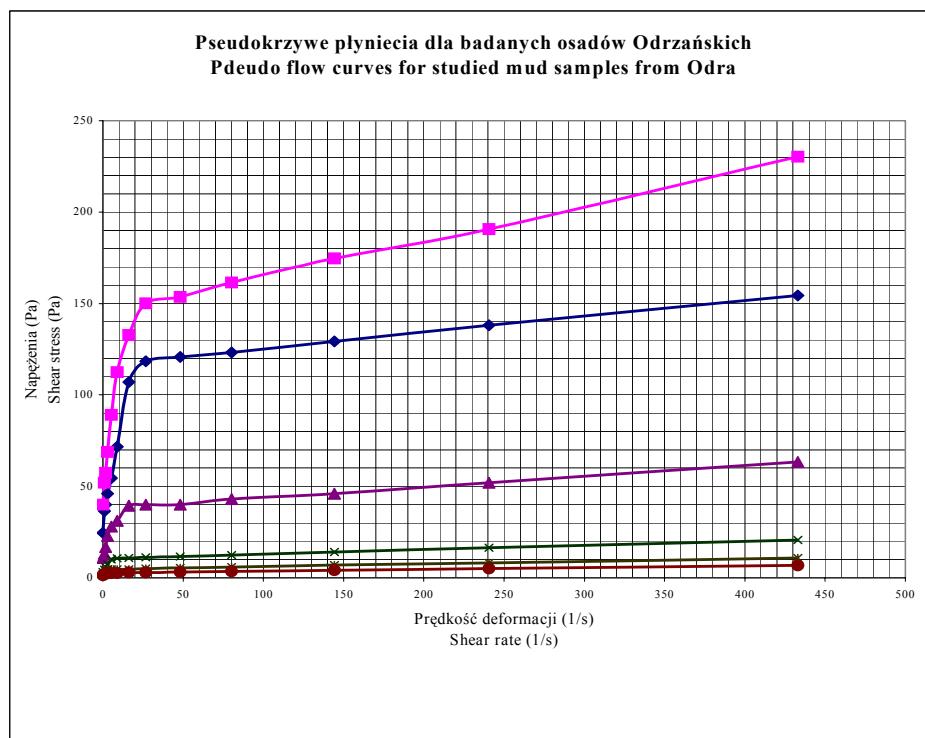
$$\tau = \tau_0 + \eta_p G_p \quad \text{dla } \tau > \tau_0$$

$$i \quad G_p = 0 \quad \text{dla } \tau < \tau_0$$

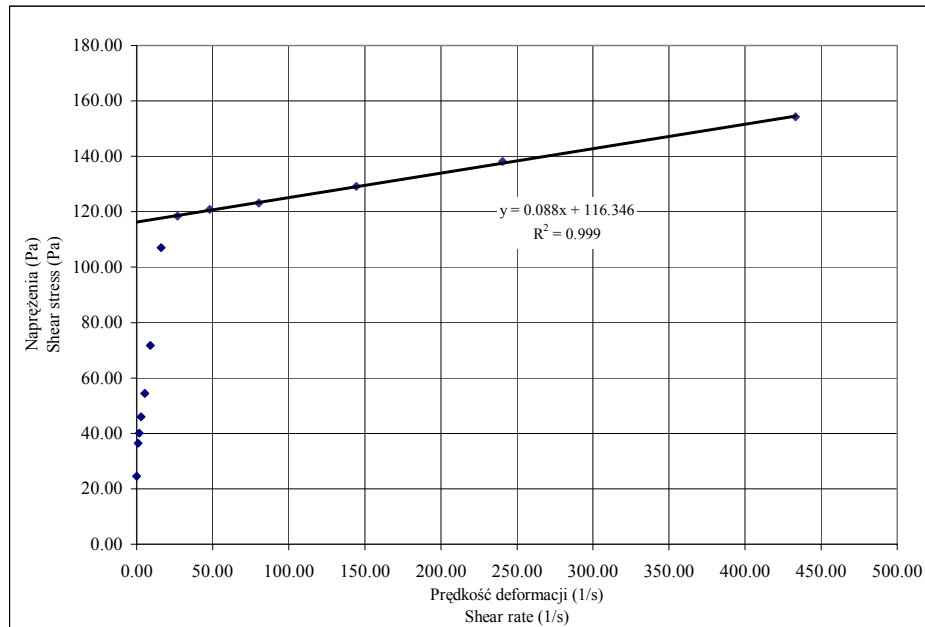
Dla oceny procesów erozyjnych istotna jest znajomość reologicznego progu płynięcia τ_0 . Jak pokazują rysunki 4 i 5, uzyskane z wyrównania modelem Bingham wartości reologicznego progu płynięcia τ_0 dla namulów odrzańskich są wyższe od wartości 1,5 Pa. Stanowi ona granicę pomiędzy reżimem erozji łatwej i trudnej. Wartości progów płynięcia τ_0 badanych osadów znajdują się w reżimie trudnej erozji, co świadczy o ich wysokiej odporności na dynamiczne działanie strumienia.

Cytowane badania pozwoliły na określenie koncentracji granicznych $T_{s,lim}$ określających przejście danej mieszaniny z reżimu newtonowskiego do nie-newtonowskiego zachowania się. Wartości koncentracji $T_{s,lim}$ zmieniały się w granicach od 25 do 240 $g \cdot dm^{-3}$. Określono również koncentracje $T_{s,er}$ materiału, przy których występuje przejście namulów z reżimu erozji łatwej do trudnej. Wartości tych koncentracji zmieniają się od 215 $g \cdot dm^{-3}$ do 595 $g \cdot dm^{-3}$.

Z przeprowadzonych badań reologicznych dla osadów z rzeki Warnow można stwierdzić, że podobnie jak osady odrzańskie charakteryzują się one wysoką odpornością na proces erozji hydraulicznej ze względu na wysokie wartości progu płynięcia τ_0 , [Parzonka i in. 1997]. Ze względu na małe wartości prędkości średnich przepływu w rzece Warnow (prędkości rzędu $0,3 m \cdot s^{-1}$) nawet podczas przepływów powodziowych osad ten nie jest erodowany i jego sedimentacja powoduje deformację przekroju tej rzeki.



Rysunek 4. Charakterystyczne pseudokrzywe płynięcia dla namulów odrzańskich
Figure 4. Characteristic pseudoflow curves for mud from Odra river



Rysunek 5. Przykład aproksymacji pseudokrzywej płynięcia dla namułu z Odry za pomocą modelu Binghama

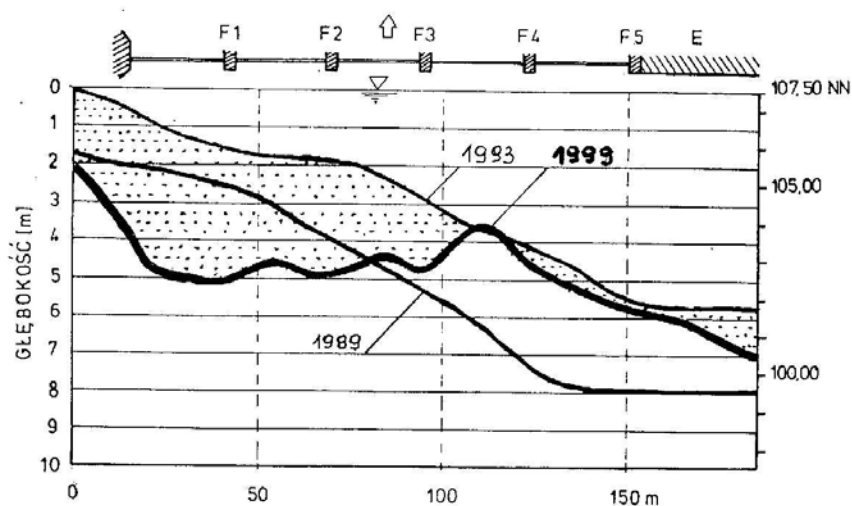
Figure 5. An example of the approximation of the pseudoflow curve for Odra mud by Bingham model

Na podstawie analizy warunków przepływu panujących podczas powodzi w 1997 r. nad powierzchnią wyspy osadów w Brzegu Dolnym oraz znajomości jej geometrii przestrzennej oszacowano rzeczywiste wartości parametrów erozji namułów, tj. prędkość średnią v_{sr} , prędkość dynamiczną v_{kr} oraz naprężenia krytyczne τ_{kr} . Zestawienie uzyskanych wartości pokazano w tabeli 2. Średnia głębokość panująca na górnym stanowisku w 1997 r. w momencie wystąpienia ekstremalnego przepływu $Q = 2882 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ wynosiła $h_{sr} = 3,44 \text{ m}$, a średnia prędkość przepływu $4,61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Erozja osadu w warunkach powodzi 1997 r. świadczy o wystąpieniu nad powierzchnią wyspy głębokości, naprężeń i prędkości większych od naprężeń krytycznych charakterystycznych dla osadu.

Z zestawienia (tab. 2) widać, że podczas przepływu powodziowego w 1997 r. zostały przekroczone wartości średnich prędkości koniecznych do wywołania procesu erozji. Powierzchnia wyspy została rozmyta (rys. 6), a jej poziom obniżył się średnio o około 3 m. Wskutek przyrostu przekroju przepływu, dla tych samych warunków, tj. $Q = 2882 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $h_{sr} = 3,44 \text{ m}$ wartości średniej prędkości przepływu spadła do wartości $v_{sr} = 3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a naprężeń krytycznych do wartości $\tau_{kr} = 16,9 \text{ Pa}$, tj. poniżej wartości określonych z kryterium Migniota [1968].

Tabela 2. Parametry erozji namulów z górnego stanowiska jazu w Brzegu Dolnym.
Table 2. Erosion parametrem for mud from upstream of the barrage Brzeg Dolny

| Analizowane warunki Analyzed conditions | τ_0 | τ_{kr} | V_{kr} | v_{sr} |
|--|----------|-------------|----------------------|----------------------|
| | [Pa] | [Pa] | [m·s ⁻¹] | [m·s ⁻¹] |
| próba 1 sample 1 | 89 | 22,8 | 0,15 | 3,62 |
| próba 2 sample 2 | 80 | 20,5 | 0,14 | 3,43 |
| powódź 1997r. | – | 36,9 | 0,19 | 4,61 |



Rysunek 6. Zmiany geometrii wyspy osadów powyżej jazu w Brzegu Dolnym w okresie od 1989–1999

Figure 6. Changes in mud island geometry upstream of the barrage Brzeg Dolny in the period 1989–1999

WNIOSKI

1. Badane osady z rzeki Odry i Warnow różnią się zarówno pod względem zawartości części organicznych I_{om} , jak i zawartości cząstek o średnicach $d < 0,02$ mm. Obecność cząstek mniejszych od $d < 0,02$ mm decyduje często o pojawieniu się cech osadu spoistego lub częściowo spoistego.

2. Osady odrzańskie charakteryzują się wyższymi wartościami zawartości części organicznych I_{om} (rzędu 13 do 20%) i cząstek o $d < 0,02$ mm (rzędu 45–60%). Na tej podstawie można je zakwalifikować jako typowe organiczne osady o cechach spoistych. Cechy te zostały potwierdzone badaniami ich cech reologicznych.

3. Osady z rzeki Warnow mają niską zawartość części organicznych I_{om} (rzędu 1–4%) oraz stosunkowo niskie zawartości cząstek o średnicy $d < 0,02$ mm (rzędu 4–11%). Na tej podstawie można wnioskować, iż są to osady o cechach częściowo spoistych.

4. Namuły z rzeki Warnow i Odry należą do osadów trudno erodowalnych, których erozja możliwa jest tylko w warunkach wystąpienia przepływów ekstremalnych, takich jak podczas powodzi na Odrze w 1997 r.

BIBLIOGRAFIA

- Huysentruyt H. *Consolidation of mud – settling column tests*, Final Report. Katholieke Universiteit te Leuven, 1992.
- Madeyski M. *Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka procesu zamulania stawów rybnych*. Rozprawa habilitacyjna, Akademia Rolnicza w Krakowie, 1997.
- Migniot C. *Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques*. La Houille Blanche, no 7, 1968.
- Mokwa M. *Fluvial processes control in anthropogenically modified river beds*. Scientific Papers of Agriculture University of Wrocław, 439, Dissertation XXXIX, 2002.
- Parzonka W. *Teoria wiskozymetrów dla jednorodnych mieszanin gruntowo-wodnych*. Rozprawy Inżynierskie 1, 16, Wrocław 1968.
- Parzonka W., Omelański A. *Metoda pomiaru reologicznych charakterystyk i opis płynięcia homogenicznych mieszanin gruntowo-wodnych*. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Sanitarnej i Wodnej, Politechnika Wrocławska, nr 7, Studia i Materiały nr 6, 1970.
- Parzonka W., Kempiański J. *Badania cech reologicznych zawieszin z uwzględnieniem efektu skalowego*. V Seminarium Transport i Sedymentacja Cząstek Stałych, Wrocław, 03–07.09.1984.
- Parzonka W., Kempiański J., Eckstädt H. *Physical and Rheological features of liquid river mud*. Scientific Papers of Agricultural University of Wrocław, 9th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Cracow 1997.

Dr inż. Robert Głowski
e-mail: glowski@iis.ar.wroc.pl

Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka
e-mail: parzonka@poczta.onet.pl

Dr hab. inż. Jan Kempiański prof. UP
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Środowiska
50-363 Wrocław
Pl. Grunwaldzki 24
e-mail: kempinski@iis.ar.wroc.pl

Robert Głowski, Włodzimierz Parzonka, Jan Kempański, Hartmut Eckstädt

Prof. dr hab. Hartmut Eckstädt
Universität Rostock
Institut für Umweltingenieurwesen
18059 Rostock, Germany
Satower Strasse 48
e-mail: hartmut.eckstaedt@uni-Rostock.de

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