

Ryszard Coufal, Zygmunt Meyer, Włodzimierz Parzonka

OCENA OPORÓW RUCHU W KORYCIE DOLNEJ ODRY

ESTIMATION OF FLOW RESISTANCE IN RIVERBED OF LOWER ODRA

Streszczenie

Dolna Odra rozciąga się od ujścia Warty do Roztoki Odrzańskiej. Ma ona charakter rzeki nizinnej o małych, uśrednionych spadkach zwierciadła wody, mniejszych od 0,3%. Przepływ wody i rumowiska odbywa się w strefie ruchu spokojnego.

Można wyróżnić trzy odcinki Dolnej Odry o różnym charakterze:

- typowo rzeczny od ujścia Warty do Bielinka,
- rzeczno-morski Bielinek-Gryfino,
- typowo morski poniżej Gryfina.

Wpływ wiatru i wysokich stanów odmorskich jest wyraźny na dwóch ostatnich odcinkach rzeki.

Na całej Dolnej Odrze występuje transport, zarówno rumowiska wleczonego i unoszonego, jak i zawieszonego. Rumowisko denne składa się głównie z piasków i drobnych żwirów, których uziarnienie maleje z biegiem rzeki. Ruch rumowiska wleczonego odbywa się w sposób ciągły prawie przez cały rok. Istotną składową są opory dotyczące transportu rumowiska wleczonego, związane tak z szorstkością ziaren, jak i z formami dennymi.

Współczynniki globalnych oporów ruchu w korycie Dolnej Odry wyznaczono na podstawie klasycznej formuły Manninga, na podstawie pomiarów hydrometrycznych służb hydrologicznych oraz o wynikach badań Politechniki Szczecińskiej. Składową oporów dotyczącą szorstkości ziarnowej wyznaczono na podstawie znajomości składu ziarnowego próbek materiału dennego. Autorzy określili także głębokości krytyczne początku ruchu dla różnych frakcji ziarnowych.

Słowa kluczowe: hydraulika koryt rzecznych, ruch wody i rumowiska

Summary

The Lower Odra is located between the Warta mouth and the Odra Roztoka. It has the character of lowland river, with low averaged energy gradients, smaller than 0.3‰. The flow of water and sediments takes place in the zone of subcritical movement. One can distinguish three sectors of Lower Odra, having different character:

- the reach between the Warta mouth and Bielinek, behaving as a typical river,*
- the sector Bielinek – Gryfino, with influence of both river and sea,*
- the reach below Bielinek, typical for sea influence.*

The influence of wind and of high sea levels is marked mainly on the two last sectors. The transport of bed load, suspended load and wash load is observed in the whole Lower Odra. The bed sediments are composed mainly of sands and of fine gravels. Their grain size is decreasing in the downstream direction. The continuous bed load transport takes place in principle during the whole year.

An important resistance component is this one concerning the bed load transport, related so to the grain roughness as to the bed forms roughness. The global coefficients of flow resistance for the Lower Odra were determined on the base of classic Manning formula using the measurements performed by Technical University Szczecin and data of hydrologic services. The resistance components concerning the grain roughness were calculated on the base of the knowledge of the granulometric composition of the bed material.

The authors estimated also the critical depths for the beginning of bed load movement, for different grain fractions.

Key words: *hydraulic of riverbeds, movement of water and of sediments*

ZARYS HYDROLOGII DOLNEJ ODRY

Odcinek Dolnej Odry liczony jest od ujścia Warty (km 617,6) do Roztoki Odrzańskiej. Wg Coufala [1995] za ujście Odry przyjmowany jest południowy kraniec Roztoki (przekrój Trzebież, km 36,45 toru wodnego Świnoujście–Szczecin). W przekroju Widuchowa (km 704,1) następuje rozdział na Odrę Wschodnią i Odrę Zachodnią. Rozdział regulowany jest jazem zlokalizowanym na Odrze Zachodniej. Jaz ten jest całkowicie otwarty przy przepływach większych od $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Wg Coufala [1995] odcinek Odry od ujścia Warty (km 617,6) do Widuchowej (km 701,8) charakteryzuje się przeciętnymi głębokościami od 3,0 m w rejonie ujścia Warty, poprzez 3,5–4,2 m w rejonie Bielinka (km 672,5) do 6,3 m w przekroju Widuchowa. Szerokości koryta wynoszą od 100 do 150 m w rejonie Słubic do 170 m koło Bielinka. W rejonie Widuchowej głębokość Odry gwałtownie wzrasta na krótkim, kilkukilometrowym odcinku z 3 m do 6 m.

Odra Wschodnia w km 730,5 dzieli się na Skońnicę i Regalicę, która uchodzi do jeziora Dąbie w km 741,6. Na tym odcinku ma ona średnią głębokość 7,0 m, a szerokość koryta od 170 do 200 m.

Dolna Odra ma odcinki o różnym charakterze [Coufal 1995]:

- odcinek typowo rzeczny od ujścia Warty do Bielinka,
- odcinek rzeczno-morski Bielinek–Gryfino,
- odcinek o cechach typowo morskich poniżej Gryfina.

W niniejszej pracy określono wstępnie opory ruchu w Odrze (km 617,6–701,3) oraz w Odrze Wschodniej (km 704,1–710,1). Jako miarodajne dla Odry Granicznej [Buchholz 2005, 2006], przyjęto stacje wodowskazowe obserwowane przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, w których mierzone są okresowo przepływy:

- wodowskaz Słubice na Odrze Środkowej (km 584,1) tj. 33,5 km powyżej ujścia Warty,
- wodowskaz Gozdowice (km 645,3 Odry) poniżej ujścia Warty.

Charakterystyczne przepływy i stany wg Buchholza [2005, 2006] dla ww. przekrojów podano w tabelach 1 i 2.

Wg Buchholza [2005] stała cofka odmorska sięga aż do km 677,1, tj. do rejonu wyrobiska kopalni w Bielinku. Wg tego autora stany wody w Dolnej Odrze są więc kształtowane:

- od ujścia Nysy Łużyckiej do Bielinka – przez przepływy niezdeformowane przez zjawiska odmorskie, z okresowym wpływem pokrywy lodowej,
- od Bielinka do Widuchowej i dalej do jeziora Dąbie – przez przepływy i stany zdeformowane przez zjawiska odmorskie, z okresowym wpływem wiatru i pokrywy lodowej.

Tabela 1. Charakterystyczne przepływy (1951–2000)

Table 1. Characteristic flows (1951–2000)

Przepływ charakterystyczny Characteristic discharge	Przekrój wodowskazowy gauging station	
	Słubice	Gozdowice
maksymalny (1997) WWQ maximal	2870 m ³ * s ⁻¹	3180 m ³ * s ⁻¹
średni wysoki SWQ medium high	927 m ³ * s ⁻¹	1257 m ³ * s ⁻¹
średni SSQ medium	312 m ³ * s ⁻¹	535 m ³ * s ⁻¹
średni niski SNQ medium low	133 m ³ * s ⁻¹	252 m ³ * s ⁻¹
niski NNQ low	53,2 m ³ * s ⁻¹	134 m ³ * s ⁻¹

Tabela 2. Charakterystyczne stany i rzędne zw. wody (1951–2000)**Table 2.** Characteristic water levels and water stages (1951–2000)

Stan charakterystyczny Characteristic stage	Przekrój wodowskazowy Gauging station			
	Słubice		Gozdowice	
	stan stage [m]	rzędna level [m]	stan stage [m]	rzędna level [m]
maksymalny WWW (1997) maximal	6,51	23,96	6,59	9,61
średni wysoki SWW medium high	4,23	21,68	4,92	7,94
średni SSW medium	2,34	19,79	3,22	6,24
średni niski SNW medium low	1,30	18,75	2,08	5,10
niski NNW low	0,73	18,18	1,44	4,46

Wpływ wiatru na stany zwierciadła wody w Odrze, a tym samym na obserwacje stanów wodowskazowych, daje się jednak zauważyć również powyżej Bielinka. Libront stwierdziła, że w przekroju Gozdowice występuje deformacja krzywych natężenia przepływu przy bardzo silnych wiatrach [Meyer, Coufal 2000]. Np. przy wietrze północnym o prędkości $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ spiętrzenie (w porównaniu ze stanami bez wiatru) wynosi od $0,9 \text{ m}$ przy $Q = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,4 \text{ m}$ przy $Q = 700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wyraźnie mniejsze co do wartości liczbowych jest natomiast obniżenie zwierciadła wody stwierdzone przy wietrze wiejącym z południa, od $0,35 \text{ m}$ dla $Q = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,3 \text{ m}$ dla $Q = 700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przy prędkościach wiatru rzędu $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ przyrost względnie obniżenie zwierciadła wody w Gozdowicach jest jednak znacznie mniejsze, rzędu $0,1\text{--}0,15 \text{ m}$. Wg Buchholza [2006] bardzo silne wiatry głównie z kierunków północnych, o prędkościach wyższych niż $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, występują tylko przez około 5 dni w roku.

Buchholz [2006] podkreślił, że obliczenia hydrauliczne oparte na założeniach ruchu jednostajnego mogą być stosowane tylko dla typowo rzeczno-odcinka Odry Granicznej, tj. od ujścia Warty do Bielinka. Poniżej tego przekroju panuje często w Dolnej Odrze ruch niejednostajny, co uniemożliwia stosowanie klasycznych metod obliczeniowych, opartych na krzywej natężenia przepływu.

LOKALNE SPADKI ZWIERCIADŁA WODY W ODRZE

Spadki zwierciadła wody są funkcją warunków hydraulicznych tylko na odcinku typowo rzeczonym Odry Granicznej. Maleją one z biegiem rzeki i wynoszą wg Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej [Roczniki Hydrologiczne]:

- $0,18 \leq I \leq 0,31\%$, średnio $0,26\%$ w przekroju wodowskazowym Słubice (km 584,1),
- $0,15 \leq I \leq 0,23\%$ w przekroju wodowskazowym Gozdowice (km 645,3),
- w rejonie Bielinka (km 674,6 – 677,0) wynoszą one od 0,10 do 0,14‰ [Kudła, Bińkowski 2005].

Na rzeczno-morskim odcinku Dolnej Odry Bielinek–Gryfino spadki zwierciadła wody są funkcją tak warunków hydraulicznych, jak i zjawisk od-morskich. Zmieniają się one w związku z tym w znacznie szerszym przedziale i wynoszą przykładowo wg Coufala [1995] od 0,07 do 0,13‰, a wg Roszak [1998] od 0,05 do 0,10‰. Z naszej analizy wynika, że wymienione wartości spadków dotyczą głównie przepływów średnich i niskich. Roszak [1998] pomierzyła w 1997 r. parametry strumienia w węźle widuchowskim dla dwóch przepływów powodziowych w Odrze tj., $Q = 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q = 1265,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Określiła ona rozdział przepływu na Odrę Zachodnią i Odrę Wschodnią. Analiza nasza pokazała, że spadki w 1997 r. dla $Q = 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $I = 0,147\%$, a dla przepływu $Q = 1265,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ tylko $I = 0,00001\%$ (prawdopodobny wpływ wiatrów).

Wg Coufala [1995] w Odrze Wschodniej (Regalicy) w rejonie kanału Klucz-Ustowo spadek zwierciadła wody wynosi $I = 3,6 \cdot 10^{-6}$, tj. 0,0036‰. Na odcinku Dolnej Odry o cechach typowo morskich (Gryfino-Trzebież) spadki są już bardzo małe, rzędu 0,0001‰ – 0,01‰ [Kurnatowski 2004].

OKREŚLENIE HYDRAULICZNYCH SPADKÓW ZWIERCIADŁA WODY Z WIELOLECIA W DOLNEJ ODRZE NA DŁUGICH ODCINKACH

Dla transportu wody i rumowiska ważne są długookresowe warunki ruchu (sekularne). Procesy korytowe rzek nizinnych kształtują trasę koryta i jego geometrię. Aktualne koryto Dolnej Odry jest więc wynikiem oddziaływania strumienia wody i odporności koryta rzeki na to oddziaływanie. Jest ono kształtowane głównie przez transport wody i rumowiska. Autorzy postanowili określić te uśrednione warunki ruchu na długich, międzywodowskazowych odcinkach, jako funkcję średnich stanów głównych z wielolecia. Dla wodowskazów w przekrojach miarodajnych dla Odry Granicznej, tj. Słubice i Gozdowice podano te stany w tabeli 2. Dla pozostałych wodowskazów charakterystycznych zestawiono je w tabeli 3.

Tabela 3. Charakterystyczne stany i rzędne zw. wody w przekrojach wodowskazowych Dolnej Odry i Odry Wschodniej**Table 3.** Characteristic stages and water levels in gauging stations of Lower Odra and Eastern Odra

Stan charakterystyczny Characteristic stage	Przekrój wodowskazowy Gauging station					
	Bielinek		Widuchowa		Gryfino (Odra Wschodnia) Gryfino (Eastern Odra)	
	stan stage (m)	rzędna level (m)	stan stage (m)	rzędna level (m)	stan stage (m)	rzędna level (m)
maksymalny WWW maximal	7,54	6,44	7,71	2,55	6,85	1,74
średni wysoki SWW medium high	5,32	4,22	6,52	1,36	6,01	0,90
średni SSW medium	3,33	2,23	5,45	0,29	5,23	0,12
średni niski SNW medium low	2,09	0,99	4,79	-0,37	4,66	-0,45
niski NNW low	1,47	0,37	4,40	-0,76	4,40	-0,71

Z analizy podanych w tabeli 4 spadków zwierciadła wody wynika wyraźnie, że zjawiska odmorskie mają istotny wpływ na kształtowanie się nie tylko lokalnych spadków (chwilowych) lecz również spadków uśrednionych z wielolecia. Uśrednione spadki praktycznie nie zmieniają się w funkcji przepływu Q na odcinku Słubice–Gozdowice. W mniejszym stopniu dotyczy to również Odry między Gozdowicami a Bielinikiem, gdzie tylko spadek dla maksymalnego przepływu z 1997 r. jest wyraźnie mniejszy, prawdopodobnie wskutek wystąpienia wiatrów północnych. Natomiast na odcinku Bielinek–Widuchowa występuje już duża różnica wyrównanych spadków przy niskich i wysokich przepływach, przeszło 3-krotna. Jeszcze wyraźniejszy wpływ zjawisk odmorskich na spadki widoczny jest dla ostatniego badanego odcinka Widuchowa–Gryfino (na Odrze Wschodniej), gdzie różnice te są bardzo duże – nawet 10-krotne przy SNW i przy WWW. Przy mniejszym stanie NNW zanotowano nawet ujemny spadek zwierciadła wody, równy $I = -0,003\%$.

Tabela 4. Obliczenie uśrednionych spadków zwierciadła wody w Odrze na długich odcinkach
Table 4. Calculation of averaged hydraulic gradients in Odra on long sectors

Stan charakterystyczny Characteristic stage	Spadki I na długich odcinkach Odry Hydraulic gradients on long Odra sectors									
	Stubice-Gozdowice $\Delta L = 63,9$ km		Gozdowice-Bielinek $\Delta L = 27,2$ km		Bielinek-Widuchowa $\Delta L = 29,3$ km		Widuchowa-Gryfino $\Delta L = 16,7$ km			
	ΔH (m)	I (‰)	ΔH (m)	I (‰)	ΔH (m)	I (‰)	ΔH (m)	I (‰)	ΔH (m)	I (‰)
maksymalny W/W maximal	14,35	0,225	3,17	0,117	3,89	0,132	0,81	0,0485		
średni wysoki S/W medium high	13,74	0,215	3,72	0,137	2,86	0,098	0,46	0,0275		
średni S/SW medium	13,55	0,212	4,01	0,147	1,94	0,066	0,17	0,0102		
średni niski S/NW medium low	13,65	0,214	4,11	0,151	1,36	0,046	0,08	0,0048		
niski N/NW low	13,72	0,215	4,01	0,150	1,13	0,039	-0,05	-0,003		

UZIARNIENIE MATERIAŁU DNA KORYTA UJŚCIOWEGO ODCINKA DOLNEJ ODRY

Skład ziarnowy materiału z dna koryta właściwego rzeki Odry był przedmiotem wielu badań. Wynika z nich, że dno Odry Granicznej zbudowane jest głównie z piasków i drobnych żwirów. Ich nominalne uziarnienie d_{50} maleje z biegiem rzeki. Szczegółowe wyniki wg różnych badaczy są następujące:

W rejonie ujścia Nisy Łużyckiej [Raport BFG 2006] $d_{50} = 1,1\text{--}2,5$ mm.

Na odcinku km 542,4–553,4 [Coufal 1995] $d_{50} = 0,9\text{--}1,0$ mm.

Na odcinku km 553,4–576,8 [Coufal 1995] $d_{50} = 0,8\text{--}0,9$ mm.

W przekroju Słubice km 584,1 [Coufal 1995] $d_{50} = 0,6\text{--}0,9$ mm.

wg Paślawskiego [1971] $d_{50} = 0,64$ mm.

W przekroju Kostrzyń km 617,6 [Krupiński 2006] $d_{50} = 0,4\text{--}3,2$ mm.

Na odcinku Bielinek–Hohensaaten km 666,9–677,0 [Raport BFG, 1996] $d_{50} = 0,4\text{--}1,0$ mm.

W przekroju Widuchowa km 703,6 [Coufal 1995] – przepływy średnie i niskie $d_{50} = 0,35$ mm.

W przekroju Widuchowa km 703,65 [Roszak 1998] – przepływy powodziowe $d_{50} = 0,6\text{--}0,7$ mm.

W Odrze Wschodniej km 704,3–710,1 [Coufal 1995] – przepływy średnie i niskie średnio $d_{50} = 0,25$ mm.

W Odrze Wschodniej – przepływy powodziowe [Roszak 1998] $d_{50} = 0,61\text{--}0,63$ mm.

Zmienność uziarnienia materiału z dna Odry w przekroju poprzecznym była przedmiotem nielicznych badań. Najbardziej szczegółowe pomiary na Odrze wykonali w latach 1994–1996 badacze niemieccy z Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG) z Koblencji, na odcinku Hohensaaten–Bielinek, km 666–680 Odry [BFG 1996]. Program tych badań dotyczył zarówno rumowiska dennego i unoszonego, jak i rumowiska zawieszzonego. Jeśli chodzi o rumowisko wleczone, to wykonano szeroko zakrojone pomiary intensywności transportu, szerokości pasa wleczenia i składu ziarnowego materiału dennego. Materiał pobierano w różnych miejscach przekroju poprzecznego (z reguły od pięciu do dziewięciu) w osi koryta, przy obu brzegach oraz w pionach między osią koryta a brzegami.

Intensywność transportu rumowiska wleczonego mierzono za pomocą łapaczki BFG, przy czym czas pomiaru wynosił od 2 do 5 minut, a ilość punktów pomiarowych w przekroju poprzecznym wynosiła od 6 do 10. Na podstawie tych pomiarów określono także szerokość pasa wleczenia. Pomiary intensywności transportu przeprowadzono przy dwóch natężeniach przepływu Q :

- przy wodzie niskiej $220 \leq Q \leq 235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nieco niższej od średniej niskiej wody $SNQ = 270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) w sierpniu 1995 r.,
- przy wyższej niż średnia woda $602 \leq Q \leq 650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (wyższej od $SSQ = 554 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) w lipcu 1996 r.,
- szerokość pasa transportu T przy wodzie niskiej $Q = 220\text{--}235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ była równa od 112 do 165 m, tj. znacznie mniejsza od szerokości rzeki, a przy wodzie wyższej niż średnia $Q = 602 - 650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $T = 146\text{--}199$ m.

Przykładowe dane dotyczące zmienności składu ziarnowego w przekroju poprzecznym Odry na odcinku Hohensaaten–Bielinek podano w tabeli 5.

Tabela 5. Przestrzenna zmienność składu ziarnowego materiału dennego Odry w km 666,0 w latach 1994-1995 [BFG, 1996]

Table 5. Spatial variation of granulometric composition of Odra bed material in the period 1994-1995 in km 666,0, after BFG [1996]

Frakcja Fraction	Przekrój km 666,0 Cross section km 666,0		
	procentowy udział frakcji percent of fraction		
	lewy brzeg/left bank	środek/middle	prawy brzeg/right bank
< 0,2 mm	0	0	0,1
0,20 – 0,63 mm	63,6	36,7	60,5
0,63 – 2,0 mm	29,9	49,6	28,5
> 2,0 mm	6,5	13,7	10,9
d_{50} (mm)	0,5	0,8	0,6

Z powyższej tabeli oraz z innych wyników badań BFG wynika wyraźna zmienność uziarnienia materiału dennego w przekroju poprzecznym koryta. W środkowej części występuje z reguły materiał grubszy niż przy brzegach.

CHARAKTERYSTYKA UZIARNIENIA MATERIAŁU Z DNA ODRY Z PODZIAŁEM NA FRAKCJE

Dla określenia początku ruchu rumowiska dennego celowy jest podział na frakcje, które kolejno są wprawiane w ruch, w miarę wzrostu prędkości strumienia. Poniżej podano uśrednione składy ziarnowe wg różnych badaczy, dla wybranych przekrojów w Dolnej Odrze (tab. 6) i w węźle Widuchowa (tab. 7).

Tabela 6. Skład ziarnowy materiału dennego w Dolnej Odrze
Table 6. Granulometric composition of bed material in Lower Odra

Fracja ziarnowa Granulometric fraction	Skład ziarnowy Granulometric composition			
	przekrój section			
	km 577	km 584,1	km 667,4	km 677,0
0,1 – 0,25 mm	0,2%	8,0%	3,0%	2,0%
0,25 – 0,5 mm	41,3%	25,6%	42,0%	47,0%
0,5 – 1,0 mm	40,4%	32,0%	39,0%	39,0%
1,0 – 2,0 mm	11,2%	20,5%	10,0%	9,0%
2,0 – 4,0 mm	6,9%	13,9%	6,0%	3,0%
Σ	100%	100%	100%	100%

Tabela 7. Skład ziarnowy materiału dennego w Węźle Widuchowskim
Table 7. Granulometric composition of bed material in Knot Widuchowa

Fracja Fraction	Skład ziarnowy Granulometric composition			
	Niskie small $Q < 396 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	wysokie high $Q \geq 1265,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
	Odra km 706,5	Odra km 703,65	Odra Wschodnia km 704,6	Odra Zachodnia km 0,100
0,1 – 0,2 mm	7,3%	0,3%	0,6%	0,5%
0,2 – 0,25 mm	74,2%	1,3%	0,8%	1,7%
0,25 – 0,315 mm	12,7%	2,4%	6,0%	9,2%
0,315 – 0,4 mm	4,0%	4,5%	7,2%	19,5%
0,4 – 0,5 mm	1,8%	39,6%	51,1%	60,0%
0,6 – 0,8 mm	-	37,2%	24,8%	7,2%
0,8 – 1,25 mm	-	11,8%	5,0%	1,9%
> 1,25 mm	-	2,9%	4,5%	-
Σ	100%	100%	100%	100%

OKREŚLENIE POCZĄTKU RUCHU RUMOWISKA WLECZONEGO W DOLNEJ ODRZE

Strumień rzeczny wywołuje następujące naprężenia ścinające na dno ciekłu:

$$\tau_h = \rho_w \cdot g \cdot R_h \cdot I \quad (1)$$

gdzie R_h jest promieniem hydraulicznym, a I gradientem linii energii.

W szerokich korytach rzecznych, o szerokości zwierciadła wody większej od 10–15 h_m , gdzie h_m jest średnią głębokością, promień hydrauliczny R_h można zastąpić przez h_m :

$$\tau_h = \rho_w \cdot g \cdot h_m \cdot I \quad (2)$$

Dno koryt rzecznych można podzielić na nieruchome i ruchome. Rozróżnienie między ruchem i spoczynkiem jest najczęściej definiowane przez funkcję Shieldsa, dotyczącą *quasi*-jednorodnego materiału scharakteryzowanego przez średnią wielkość ziarna d_m lub przez nominalną średnicę d_{50} . Funkcja ta wiąże bezwymiarowe krytyczne naprężenia ścinające Φ_{cr} i liczbę Reynoldsa Re_* :

$$\Phi_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g \cdot d_m \cdot (\rho_s - \rho_w)} \quad (3)$$

$$Re_* = \frac{v_* \cdot d_m}{\nu}$$

Dla rumowiska wielofrakcyjnego wprowadzono modyfikację formuły Shieldsa, zastępując d_m przez średnicę kolejnej frakcji ziarnowej d_i [Parzonka 2004]:

$$\Phi_{cri} = \frac{\tau_{cr}}{g \cdot d_i \cdot (\rho_s - \rho_w)} \quad (4)$$

Z reguły określa się naprężenia krytyczne i średnie głębokości krytyczne h_{mcr} dla 4–5 frakcji ziarnowych d_i , por. Parzonka [2004]) oraz Parzonka, Bartnik i Kasperek [2002]. Większość autorów przyjmuje uproszczoną wartość $\Phi_{cr} = 0,047$. Autorzy ocenili warunki początku ruchu dla zróżnicowanej wartości Φ_{cr} , zgodnie z krzywą Shieldsa. Obliczenie przeprowadzono dla uśrednionych spadków zwierciadła wody.

Dla odcinka Dolnej Odry o charakterze rzeczonym podano wyniki obliczeń w tabeli 8. Wynika z niej, że średnie głębokości krytyczne h_{mcr} są dla wszystkich frakcji ziarnowych znacznie mniejsze od głębokości wody występujących przy przepływach niskich i to tak w Słubicach i Gozdowicach, jak i w przekroju Bielinek–Hohensaaten. Oznacza to, że wszystkie frakcje materiału z którego zbudowane jest dno Odry, tj. drobny piasek i żwir są przez cały rok w ruchu. Zmienia się tylko szerokość pasa wleczenia, gdyż lokalne głębokości przy brzegach są z reguły mniejsze od głębokości średniej. Nawet przy przepływach bliskich przepływowi średnio niskich SNQ są one mniejsze od głębokości krytycznych h_{cr} .

Tabela 8. Parametry początku ruchu rumowiska wlezonego na odcinku rzeczonym Dolnej Odry
Table 8. Parameters of beginning of bed load movement in fluvial sector of Lower Odra

Fracje Fractions (mm)	d_{f50} (mm)	Φ_{cri}	τ_{cri} (Pa)	Odcinek Sector			
				Słubice–Gozdowice		Gozdowice–Bielinek	
				h_{mcr} (m)		h_{mcr} (m)	
				$I = 0,2\text{‰}$	$I = 0,225\text{‰}$	$I = 0,117\text{‰}$	$I = 0,150\text{‰}$
0,1–0,25	0,175	0,060	0,16	0,08	0,08	0,14	0,11
0,25–0,50	0,375	0,037	0,22	0,10	0,10	0,19	0,15
0,50–1,00	0,750	0,031	0,36	0,18	0,17	0,32	0,25
1,00–2,00	1,50	0,035	0,82	0,40	0,37	0,72	0,56
2,00–4,00	3,00	0,044	2,07	1,00	0,94	1,81	1,41

Dla przykładu:

- w Słubicach (1976) przy $Q = 141 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $h_m = 1,62 \text{ m}$,
- w Gozdowicach (1976) przy $Q = 253 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $h_m = 1,98 \text{ m}$,
- w Bielinku (1996) przy $Q = 253 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $h_m = 2,08 \text{ m}$.

Warto podkreślić, że dominującymi frakcjami Dolnej Odry o charakterze rzeczonym są piaski o wymiarach 0,25–1,0 mm, z udziałem 70–85% całej krzywej ziarnowej. Głębokości krytyczne dla tych piasków są równe 0,10–0,18 m na odcinku Słubice–Gozdowice i 0,19–0,32 m dla odcinka Gozdowice–Bielinek, są więc znacznie mniejsze od najmniejszych notowanych głębokości dla NNQ.

Tabela 9. Parametry początku ruchu rumowiska wlezonego w ujściowym odcinku Dolnej Odry

Table 9. Parameters of beginning of bed load movement in the Lower Odra

Fracje Fractions (mm)	d_{f50} (mm)	Φ_{cri}	τ_{cri} (Pa)	Odcinek Sector			
				Bielinek–Widuchowa		Widuchowa–Gryfino	
				h_{mcr} (m)		h_{mcr} (m)	
				$I = 0,039\text{‰}$	$I = 0,132\text{‰}$	$I = 0,0048\text{‰}$	$I = 0,0485\text{‰}$
0,1–0,25	0,175	0,060	0,16	0,43	0,13	3,50	0,35
0,25–0,50	0,375	0,037	0,22	0,56	0,17	4,58	0,46
0,50–1,00	0,750	0,031	0,36	0,95	0,28	7,67	0,77
1,00–2,00	1,50	0,035	0,82	2,15	0,64	17,50	1,75

Analogicznie do odcinka Słubice–Bielinek, w Dolnej Odrze od Bielinka do Widuchowej, mającej charakter rzeczno-morski panują warunki transportu rumowiska w ciągu całego roku. Dotyczy to także Odry Wschodniej Widucho-

wa–Gryfino. Np. w km 706,5, tj. na początku Odry Wschodniej, dno zbudowane jest z drobnego piasku, w którym 81,5% cząstek należy do frakcji 0,1–0,25 mm.

Głębokości średnie w strefie niskich przepływów mają wartości rzędu 4,5–5,0 m i są większe od głębokości krytycznych. Np. w 1971 r. w Odrze w przekroju Widuchowa przy $Q = 363 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $h_m = 5,33 \text{ m}$. Tylko przy wiatrach odmorskich i przy przepływach niżówkowych zwalnia się ruch rumowiska wleczonego i to tylko dla grubszych frakcji, których udział jest nieznaczny (10–20% całej próby). Coufal [1995] wykazał, że ruch rumowiska wleczonego w ujściowych odcinkach Odry zależy w istotny sposób od kierunku wiatru.

OKREŚLENIE OPORÓW RUCHU W DOLNEJ ODRZE Z UWZGLĘDNIENIEM TRANSPORTU RUMOWISKA

Koryto Dolnej Odry zbudowane jest w znacznej części z aluwiiów – piasków drobnych, średnich oraz lokalnie z drobnych żwirów. Jest ono uregulowane głównie za pomocą budowli poprzecznych (ostróg) oraz lokalnie za pomocą budowli podłużnych (tam, opasek). Szerokość regulacyjna jest w związku z tym znacznie mniejsza od szerokości koryta. Drobnociarnisty charakter materiału dennego powoduje, że transport rumowiska wleczonego odbywa się praktycznie w ciągu całego roku. Spadki zwierciadła wody są małe, w związku z tym ruch rumowiska odbywa się w reżimie ruchu spokojnego, a liczba Froude'a $\frac{v}{\sqrt{g \cdot h_m}}$ jest mniejsza od 1.

Wyróżnić można dwie klasy oporów:

a) opory związane z szorstkością ziarna, charakteryzujące głównie początek ruchu (erozji), kiedy dno jest w przybliżeniu płaskie,

b) opory związane z formami dennymi, rozwijającymi się głównie w funkcji prędkości strumienia rzecznej. Wyróżnić można:

– makroformy, tj. zmarszczki i wydmy, które są rozmywane przy większych prędkościach strumienia,

– megaformy (odsypiska, przemiały), które przesuwają się rocznie o 400–800 m [BFG 2006].

Megaformy są często przyczyną trudności w prowadzeniu żeglugi.

Oporu ruchu w korycie rzecznej można wyznaczyć z klasycznej formuły Manninga:

$$v = k_s \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (5)$$

Dla szerokich rzek, mających szerokość 10–15 średnich głębokości h_m , można zastąpić promień hydrauliczny R_h przez średnią głębokość h_m :

$$v = k_s \cdot h_m^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (6)$$

gdzie k_s jest globalnym współczynnikiem prędkości, równym odwrotności współczynnika szorstkości n .

Intensywność transportu cząstek stałych można określić dwoma metodami:

– metodą Ackersa-White’a, stosowaną przez Politechnikę Szczecińską (z modyfikacją zaproponowaną przez Coufala),

– metodą Meyer-Petera i Müllera zwaną potocznie MPM. W klasycznym wzorze MPM występuje ziarno średnie d_m oraz parametr k_s/k_r , gdzie k_s jest globalnym współczynnikiem oporu rumowiska przy płaskim dnie (*global resistance*). Sprawdzoną przez wielu badaczy charakterystyką oporu ziarna jest współczynnik k_r z formuły Stricklera $k_r = \frac{21.1}{d_m^{1/6}}$.

Zalecamy określenie intensywności transportu rumowiska na podstawie wzoru MPM z modyfikacją Bartnika i Michalik [Parzonka 2004]. Polega ona na oddzielnym określeniu intensywności transportu dla każdej frakcji d_i (zamiast dla średniego ziarna d_m). Należy natomiast rozważyć określenie k_r (*skin resistance*) dla dna płaskiego na podstawie metody Politechniki Szczecińskiej, gdzie uwzględnia się nie tylko wpływ wielkości ziarna (d_{60} lub d_{90} wg Stricklera), lecz także wpływ głębokości średniej. Meyer, Skorupska [2003] określają przy tym tę zmodyfikowaną zależność Stricklera oddzielnie dla „długiego” i „krótkiego” odcinka rzek.

ZMIENNOŚĆ PARAMETRÓW K_S I K_S/K_R

Zmienność tych parametrów określono w niniejszej pracy na podstawie:

– interpretacji wyników bezpośrednich pomiarów hydrometrycznych, opublikowanych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej,

– na podstawie bezpośrednich pomiarów zrealizowane przez pracowników Politechniki Szczecińskiej: Coufala [1995], Roszak [1998],

– na podstawie interpretacji wyników pomiarów przeprowadzonych przez Bundesanstalt für Gewässerkunde [1996].

ODRA W REJONIE ŚLUBIC

Kosierb [Parzonka 2004], otrzymał dla stacji wodowskazowej Ślubice km 584,1 wartości $k_s = 27-48,4 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, dla $d_{50} = 0,6 \text{ mm}$ i $k_{r50} = 72 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Parametr k_s/k_{r50} zmieniał się w przedziale od 0,41 do 0,76.

Coufal [1995] badał opory ruchu w Odrze na dwóch odcinkach badawczych:

– **na odcinku A** (km 542,4–553,45) rumowisko denne miało wymiar $d_{50} = 0,7-1,0 \text{ mm}$, dla którego k_{r50} wynosi odpowiednio 70 i 67 $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Współczynniki $n = \frac{1}{k_s}$ określono dla trzech przepływów $Q = 270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q = 360 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q = 450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości n były zbliżone dla każdego przepływu. Po

przeliczeniu na wartości k_s uzyskano $k_s = 34,8\text{--}37,9$. Wartości k_s/k_r zmieniały się w przedziale 0,52–0,57 dla $d_{50} = 1$ mm i 0,49–0,54 dla $d_{50} = 0,7$ mm.

– **na odcinku B** (km 553,45–576,8) badane przepływy były znacznie mniejsze, $Q = 53,6$ m³ * s⁻¹, 129,6 m³ * s⁻¹ i 306,8 m³ * s⁻¹, a rumowisko denne miało $d_{50} = 0,7\text{--}0,9$ mm. Wartości k_{r50} były odpowiednio równe 70 i 68 m^{1/3} * s⁻¹. Wartości k_s wahały się od 34,2 do 36,7, a odpowiadające im wartości parametru k_s/k_r od 0,49 do 0,52 dla $d_{50} = 0,9$ mm i 0,50 do 0,54 dla $d_{50} = 0,7$ mm.

ODRA W REJONIE BIELINKA

Pomiary parametrów hydraulicznych Odry w dwóch przekrojach km 674,56 i km 676,97 wykonali w 2002 r. Kudła i Bińkowski [2005]. Autorzy przeprowadzili interpretację tych wyników. Uziarnienie w przekrojach badawczych przyjęto wg dokumentacji Bundesanshalt für Gewässerkunde w Koblenz [BFG 1996], $d_{50} = 0,5$ mm w km 674,30 i $d_{50} = 0,6$ mm w km 677,02. W przekroju km 674,56 wartości k_s wahały się od 20,5 do 21,6. Wartość współczynnika k_r dla $d_{50} = 0,5$ mm, $k_r = 74$. Natomiast wartości k_s/k_r wahają się od 0,28 do 0,30. W przekroju km 676,97 współczynniki prędkości k_s są znacznie wyższe, od 30,2 do 31,5. Współczynnik $k_r = 72$, a wartości k_s/k_r wynoszą od 0,42 do 0,44.

ODRA WSCHODNIA

Coufal [1995] ocenił opory ruchu na odcinku badawczym C (km 704,30–710,10) zlokalizowanym tuż poniżej węzła Widuchowa. Pomiary miały na celu określenie współczynników szorstkości n do wzoru Manninga:

- bez wpływu wiatru,
- przy wiatrach z kierunków północnych,
- przy wiatrach z kierunków południowych.

Bez wpływu wiatru współczynniki $k_s = 1/n$ zmieniały się w wąskich granicach, od 31,9 do 36,1 dla niskich przepływów, do 31,1–36,8 dla $Q = 396$ m³ * s⁻¹. Rumowisko denne było prawie jednorodne, był to drobny piasek mający $d_{50} = 0,225$ mm, dla którego $k_r = 84$. Parametr k_s/k_r wahał się od 0,38 do 0,43 dla przepływów $Q = 169,6$ m³ * s⁻¹ do 0,37–0,44 dla $Q = 396$ m³ * s⁻¹.

Coufal stwierdził [1995], że przy przepływach niskich **wiatry z kierunków północnych** zwiększają nieco wartość współczynnika szorstkości, a **wiatry z kierunków południowych** zmniejszają. Coufal [1995] stwierdził również, że dla większych natężeń przepływu naprężenia wiatrowe nie powodują zmiany współczynników szorstkości n do wzoru Manninga (a tym samym współczynników prędkości k_s).

Reasumując, można stwierdzić, że realne współczynniki k_s w Dolnej Odrze charakteryzujące globalne opory ruchu różnią się często wyraźnie od

wartości k_s przyjmowanych w obliczeniach hydraulicznych i zalecanych przez specjalistów z regulacji rzek czy budownictwa wodnego, tj. $k_s = 33\text{--}40$ (odpowiadających wartościom $n = 0,030\text{--}0,025$).

Podobny wniosek dotyczy również parametru k_s/k_r , który ilustruje warunki transportu rumowiska wlezonego w rzekach. Wartości k_s/k_r dla Odry w rejonie Słubic wahają się od 0,4 do 0,7. Są one znacznie niższe w Dolnej Odrze o charakterze rzeczno-morskim, rzędu 0,28–0,44.

Wynika z tego ważny wniosek, że przy modelowaniu procesów transportu rumowiska wlezonego w rzekach nizinnych błędne jest przyjmowanie wartości parametru k_s/k_r równej 1,0, np. we wzorze Meyer-Petera i Müllera.

BIBLIOGRAFIA

- Buchholz W. *Analiza zagrożeń powodziowych wybranych rejonów w Szczecinie*. Politechnika Szczecińska „Regionalne Problemy Gospodarki Wodnej i Hydrotechniki”, Szczecin, 2006.
- Buchholz W. *Określenie minimalnych głębokości na Odrze Granicznej dla potrzeb akcji lodotłamania*. Politechnika Szczecińska „Regionalne Problemy Gospodarki Wodnej i Hydrotechniki”, Szczecin 2005.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde. *Stromregelungskonzept Oder*. Abschnitt Hohensaaten-Bielinek, km 666–680 Koblenz, 1996.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde. *Optimierung von Strombauwerken im Oderabschnitt km 603 bis 617*. Karlsruhe 2006.
- Coufal R. *Zmiany położenia dna w ujściowym odcinku rzeki wywołane ruchem rumowiska*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, nr 515, Szczecin 1995.
- Kotiasz W. *Wpływ zabudowy regulacyjnej koryta na zmiany położenia dna rzeki*. Rozprawa doktorska. Politechnika Szczecińska, Szczecin 2001.
- Krupiński A. *Analiza wyników pomiarów terenowych rumowiska na rzece Odrze dla przekroju Kostrzyn*. XIV Seminarium „Regionalne Problemy Ochrony Środowiska” Politechnika Szczecińska, 2006.
- Kudła T., Binkowski K. *Analiza warunków hydraulicznych Odry w rejonie Bielinka*. Politechnika Szczecińska, „Regionalne Problemy Gospodarki Wodnej i Hydrotechniki”, Szczecin, 2005.
- Kurnatowski J. *Współczynniki szorstkości koryt Dolnej Odry*. Politechnika Szczecińska „Regionalne Problemy Gospodarki Wodnej i Hydrotechniki”, Szczecin 2004.
- Meyer Z., Coufal R. *Hydraulic conditions of steady motion in the estuarial river sector under wind influence*. 8th German-Polish Seminar, Starbienino 2000.
- Meyer Z., Skorupska W. *Modyfikacja zależności Stricklera dla analizy natężenia przepływu w warunkach oddziaływania spiętrzenia wiatrowego*. XI Seminarium Naukowe „Regionalne Problemy Ochrony Środowiska w ujściu Odry. Szczecin–Ystad–Świnoujście 2003.
- Parzonka W. *Flow resistance and transport rate in alluvial rivers*. 12 International Conference “Transport and Sedimentation of Solid Particles”, Prague 2004.
- Parzonka W., Bartnik W., Kasperek R. *Modelowanie transportu rumowiska wlezonego w korytach rzek z dnem aluwialnym na przykładzie Górnej i Środkowej Odry*. Zeszyty Naukowe SGGW Warszawa 2002.
- Pasławski Z. *Intensywność wleczenia i transport rumowiska w korycie rzeki Odry pod Słubicami*. Przegląd Geofizyczny, t. XVI, 1–2, 1971.
- Roszak A. *Hydrauliczne warunki rozdziału strumienia rumowiska w rozwidleniu rzeczonym w warunkach przepływu wielkich wód*. Politechnika Szczecińska, Rozprawa doktorska, Szczecin 1998.

dr hab. inż. Ryszard Coufal, prof. PS
Politechnika Szczecińska
Katedra Geotechniki
70-311 Szczecin
Al. Piastów 50
e-mail: coufal@ps.pl

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer
Politechnika Szczecińska
Katedra Geotechniki
70-311 Szczecin
Al. Piastów 50
e-mail: meyer@ps.pl

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

Recenzent: *Prof. dr hab. Wojciech Bartnik*

Artykuł powstał podczas pobytu prof. Włodzimierza Parzonki na Politechnice Szczecińskiej, jako laureata stypendium NESTOR przyznanego przez Fundację Nauki Polskiej.