MIDDLE POMERANIAN SCIENTIFIC SOCIETY OF THE ENVIRONMENT PROTECTION
ŚRODKOWO-POMORSKIE TOWARZYSTWO NAUKOWE OCHRONY ŚRODOWISKA

Annual Set The Environment Protection
Rocznik Ochrona Środowiska

Volume/Tom 18. Year/Rok 2016 ISSN 1506-218X 550-564

Początek ruchu i transport rumowiska na odcinku Odry swobodnie płynącej w aspekcie wymaganych głębokości tranzytowych

Robert Kasperek, Robert Głowski
Uniwersytet Przyrodniczy, Wrocław

1. Wprowadzenie

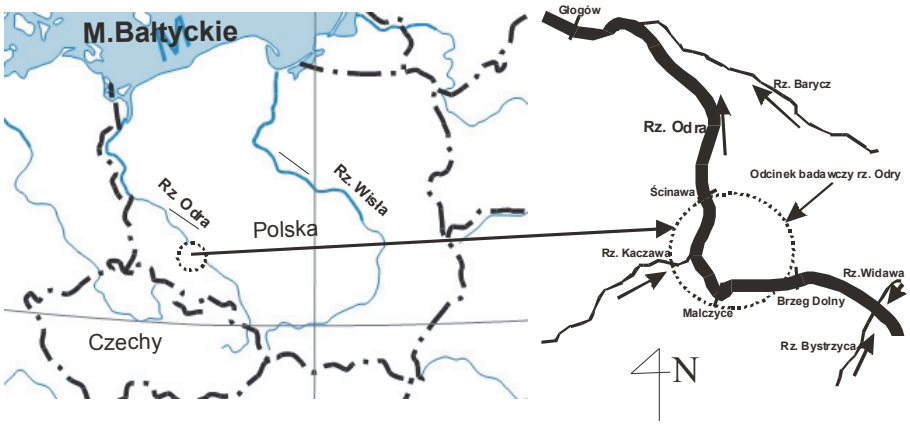
Odra swobodnie płynąca znajduje się między stopniem wodnym Brzeg Dolny (km 282) a ujściem do jeziora Dąbie w Szczecinie (km 742). Rzekę rozpoczęto regulować w XVIII w., aby umożliwić transport między Śląskiem a Morzem Bałtyckim. Założono, że w przyszłości będzie ona łączyć Morze Bałtyckie z Czarnym oraz inne szlaki wodne w Europie (Dunaj, Łaba). Aby zrealizować te cele należało skanalizować rzekę poprzez jej zabudowę stopniami, kontynuować regulację zapewniającą żeglugę przy niskich stanach oraz wybudować zbiorniki zasilające Odrę podczas niżówek (Kasperek i Wiatkowski 2014). Przegrodzenie rzeki stopniem powoduje zmianę reżimu hydrologicznego oraz naruszenie jej równowagi (Laks i inni 2013). W obrębie stopnia tuż powyżej jazu rumowisko jest zatrzymywane, następuje jego akumulacja oraz zamulanie. Na pewnym odcinku tuż poniżej jazu ilość rumowiska odprowadzanego przez rzekę jest większa od ilości doprowadzanej, występuje wówczas zjawisko erozji. Poniżej odcinka erodowanego zachodzi sytuacja odwrotna tzn. ilość rumowiska odprowadzanego przez rzekę jest mniejsza od doprowadzanego (Kasperek 2015).

Zadaniem regulacji rzeki Odry swobodnie płynącej od 1819 r. za pomocą ostróg było zapewnienie minimalnej głębokości tranzytowej, regularne ukształtowanie szlaku żeglownego oraz umożliwienie swobodnego przemieszczania się rumowiska, bez rozmyć i przemiałów. Pod

koniec XIX w. rozpoczęto kanalizację Odry powyżej Wrocławia. Najpierw wybudowano 12 stopni na odcinku Koźle - ujście Nysy Kłodzkiej. Następnie w latach 1907-1922 powstało 10 kolejnych stopni. Po II wojnie światowej ze względu na złe warunki dla żeglugi wybudowano stopień Brzeg Dolny (1958 r.). Aktualnie trwa budowa następnego stopnia w Malczycach (km 300). Warunki żeglugowe w Odrze zmieniają się w zależności od zjawisk hydrologicznych. Im większe są wahania przepływów, tym większe trudności dla żeglugi. Widać to szczególnie na odcinku między Brzegiem Dolnym a Ścinawą (rysunek 1). Głębokości żeglugowe zależą tu również od procesów fluwialnych: erozja, sedymentacja, transport (Söhngen et al. 1998).

Ważnym zagadnieniem podczas eksploatacji dróg wodnych jest analiza wpływu strumienia zaśrubowego na dno rzeki. Często jego wynikiem jest zniszczenie umocnienia dna w postaci sztucznego obrukowania (miąższość 20 cm i uziarnienie d_{50} = 24-30 mm) podczas niskich i średnich stanów wody. Przy tych właśnie głębokościach trudno jest zapewnić minimalny prześwit h_d = 0,8 m między dnem statku a rzeką. Dlatego też należy zachować zalecane minimalne głębokości drogi wodnej, określone dla Odry Środkowej oraz Renu i Dunaju (Rozporządzenie 2002). Wg Kulczyka i Wintera (2003) zapas h_d należy przyjmować min. 0,25 m i nie mniej niż (0,15-0,20)T. Dla pchaczy stosowanych na Odrze T wynosi 1,4-2,5 m, a h_d = 0,2T = 0,28-0,5 m. Natomiast dla Dunaju i Renu przyjęto h_d = 0,8 m w przypadku obrukowania dna oraz 0,5 m podczas dokarmiania rzeki rumowiskiem wleczonym, które są większe niż dla Odry. Prześwity h_d dla piaszczystego dna Odry nie są właściwe dla sztucznego obrukowania na odcinku Malczyce-Ścinawa. Dlatego też, zaleca się wykonywanie robót za pomocą barek, które nie naruszą świeżo obrukowanej warstwy oraz należy unikać prac przy przepływach niższych od średniego SSQ, przy których h_d jest zbyt małe. Aby uniknąć niszczącego działania pędników na dno Odry nie należy również używać śruby przy unieruchomionym statku, manewry wykonywać płynnie oraz żeglować w odpowiedniej odległości od umocnień koryta.

W pracy przedstawiono analizę ruchu rumowiska w aspekcie warunków żeglugowych na odcinku Odry swobodnie płynącej. W tym celu wykorzystano badania innych autorów, własne pomiary hydrometryczne, pobrano materiał denny i pomierzono jego transport.



Rys. 1. Lokalizacja odcinka badawczego Odry swobodnie płynącej
Fig. 1. Location of study sector of the freely flowing Odra River

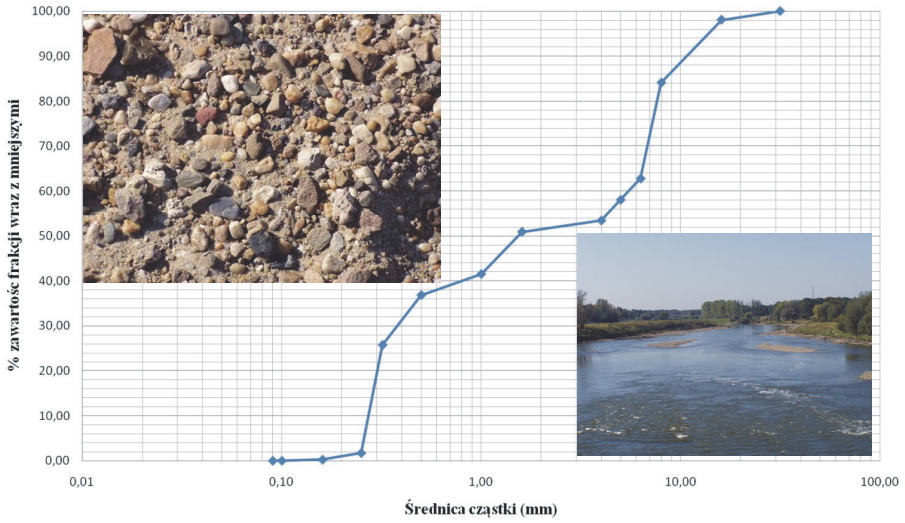
2. Ruch rumowiska

Rumowisko w rzekach to materiał poruszany przez wodę w sposób ciągły lub okresowy, na całej długości lub odcinkach. Może ono być transportowane w postaci zawiesiny (Wiatkowski i inni 2013), unosin i wleczyn. Rumowisko unoszone to cząstki przemieszczane przez wodę o średnicy do 1-2 mm. Do rumowiska wleczonego zalicza się większe ziarna, które poruszają się w przydennej warstwie cieku poprzez toczenie, przesuwanie lub skakanie (otoczaki 40-80 mm, żwiry 2-40 mm i piaski 0,25-2 mm). Najczęściej jednak rumowisko wleczone przemieszcza się w postaci form dennych, które następnie tworzą jeszcze większe formy korytowe np. przemiały (Radecki-Pawlik 2011). Wyraźna granica rozdzielająca rumowisko unoszone od wleczonego nie istnieje. Wraz ze wzrostem prędkości rośnie wielkość cząstek transportowanych jako unosiny oraz ich wysokość nad dnem (Kasperek i inni 2013).

2.1. Materiał denny

Pobieranie gruntu z dna Odry wykonywano w celu ustalenia jego rodzaju, ilości (Haddadchi et al. 2013) oraz miejsc i odcinków podlegających degradacji i agradacji. Badania te zapoczątkował Kornacki, który w okresie 1957-70 analizował uziarnienie na odcinku km 282-304. W latach 90. ubiegłego wieku oraz w okresie 2009-2012 autorzy niniejszej pracy kontynuowali pomiary granulacji na odcinku km 282-332.

W tym celu wykonano analizy mechaniczne próbek za pomocą sit o oczkach 0,1-40 mm. Określono % zawartości poszczególnych frakcji oraz charakterystyczne średnice d_{10}, d_{40}, d_{50}, d_{90}. Z badań Kornackiego wynika, że średnice d_{50} i d_{90} zwiększyły się odpowiednio z 0,70 mm i 6,88 mm (1957 r.) do 2,38 mm i 13,93 mm (1970 r.). W latach 90. ubiegłego wieku autorzy pobrali próby rumowiska zarówno na odcinku Brzeg Dolny-Malczyce oraz Malczyce-Ścinawa. Między Brzegiem Dolnym a Malczycami średnice rumowiska osiągały wartości d_{10} = 0,25-8,6 mm; d_{40} = 0,62-40 mm; d_{50} = 1,1-46 mm i d_{90} = 16-71 mm. W porównaniu do badań Kornackiego z okresu 1957-70 materiał denny w latach 90. pogrubił się. Na odcinku Malczyce-Ścinawa średnice były równe d_{10} = 0,22-17 mm; d_{40} = 0,55-49 mm; d_{50} = 0,73-54 mm i d_{90} = 3-74 mm. W ww. okresach na obu odcinkach rzeki zalegały piaski średnie i grube oraz żwiry i otoczaki. W okresie 2009-2012 autorzy ponownie pobrali grunt z Odry w rejonie Malczyc (km 305, rysunek 2). Średnice d_{50} oraz d_{90} były rzędu 1,6 mm i 12 mm (piaski i żwiry).



Rys. 2. Materiał denny, krzywa uziarnienia i odsypiska, rzeka Odra
Fig. 2. Bed material, granulometric curve and outwashes, Odra River

2.2. Transport rumowiska

Terenowe badania rumowiska wleczonego są niezbędne m.in. do ustalenia przemiałów na rzekach żeglownych i obszarów degradacji (Parzonka i inni 2010). Przemiały będące płytkimi miejscami są obecnie dużym utrudnieniem dla żeglugi na Odrze. Dotyczy to przede wszystkim odcinka rzeki swobodnie płynącej poniżej Brzegu Dolnego. Ukończenie stopnia w Malczycach nie poprawi całkowicie warunków żeglugi, a sytuacja ta przeniesie się poniżej i będzie dotyczyć dalszego nieskanalizowanego odcinka. Z badań autorów wynika, że przemiały w Odrze są m.in. wynikiem dopływu i odkładania rumowiska wymytego z dna na skutek intensywnej erozji poniżej jazu w Brzegu Dolnym. W oparciu o wzór Makkawiejewa (1) określono prędkość przemiałów poniżej stopnia Brzeg Dolny i Malczyce, która zmienia się w zależności od warunków hydraulicznych, ukształtowania koryta i składu ziarnowego. Z obliczeń wynika, że przy niskich przepływach przemiały przesuwają się z prędkością 0,3 m/rok, a przy najwyższych nawet 24 m/rok (tabela 1).

$$v = \frac{50QI}{d_{50}} \ (\mathrm{m/rok}) \tag{1}$$

gdzie:
Q - natężenie przepływu wody (m^3/s),
I - średni spadek podłużny rzeki,
d_{50} - przeciętna średnica materiału dennego (mm).

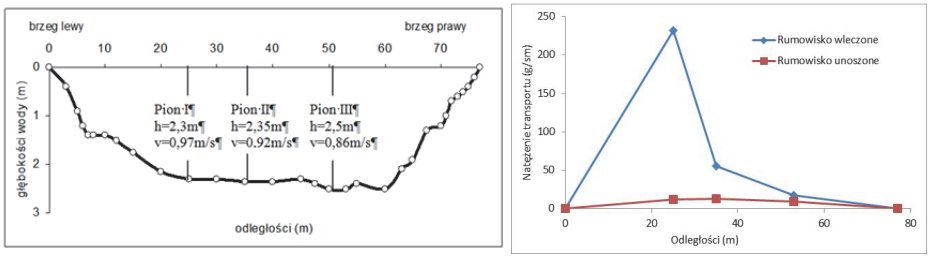
Należy dodać, że przemiały podczas niskich przepływów są regulatorem odpływu wody, tworzą spiętrzenia i większe głębokości na plosach.

Badanie transportu rumowiska w Odrze przeprowadzono ze statku pomiarowego. Całkowite natężenie przepływu wody było równe 125 m^3/s, a głębokości w środkowej części koryta zmieniały się w zakresie 2,3-2,5 m. Sondowanie przekroju wykonano w 30 pionach, w 12. z nich określono prędkości, a w 3. pobrano materiał denny oraz pomierzono rumowisko wleczone i unoszone (rysunek 3). Rumowisko pobierano łapaczkami, które były opuszczane na dno rzeki przez kilka minut. W każdym z pionów I, II i III badanie powtarzano 2 lub 3-krotnie, aby wykluczyć błędy pomiarowe.

Tabela 1. Prędkości przemiałów w Odrze swobodnie płynącej
Table 1. Outwash velocities in the freely flowing Odra River

Przekrój	Prędkości (m/rok)							
	Q_{130}	Q_{180}	1981-2005			1998-2009		
			NNQ	SSQ	WWQ	NNQ	SSQ	WWQ
Brzeg Dolny (km 285)	0,5	0,7				0,3	1,2	9,5
Malczyce (km 305)	0,4	0,7	0,3	1,1	24,2	0,3	1,1	9,6
Ścinawa (km 332)	0,4	0,9	0,3	1,3	23,4	0,3	1,3	9,3

Q_{130} - przepływ, któremu odpowiada głębokość wody 130 cm, zapewniająca żeglugę statków o małym zanurzeniu na Odrze swobodnie płynącej. Wartość tego przepływu wynosi w przekroju Brzeg Dolny, Malczyce i Ścinawa odpowiednio 67, 56 i 53 m^3/s (Dubicki i inni 2013).
Q_{180} - przepływ, któremu odpowiada głębokość wody 180 cm, wymagana dla drogi wodnej III klasy w Odrze swobodnie płynącej. Wartość tego przepływu wynosi w przekroju Brzeg Dolny, Malczyce i Ścinawa odpowiednio 95, 94 i 110 m^3/s (Dubicki i inni 2013).



Rys. 3. Głębokości, prędkości i transport rumowiska, rzeka Odra
Fig. 3. Depths, velocities and sediment transport, Odra River

Najwyższe wleczenie odnotowano w pionie I (231,7 g/s,mb), w którym prędkość była najwyższa 0,97 m/s. Natomiast najniższy transport miał miejsce w pionie III (17,5 g/s,mb), gdzie średnia prędkość wyniosła 0.86 m/s (rysunek 3). Całkowity transport rumowiska wleczonego i unoszonego w przekroju Odry wyniósł 5,8 kg/s. Z badań autorów wynika, że udział wleczyn i unosin jest na poziomie 90% i 10%.

W pionach hydrometrycznych pobrano również materiał denny (MD), który podobnie jak rumowisko wleczone (RW) został poddany analizie sitowej. Wyniki badań granulometrycznych pozwoliły autorom na określenie ich składu ziarnowego oraz analizę porównawczą. Ocenio-

no, które frakcje oraz przy jakich głębokościach i prędkościach są transportowane. Najwięcej było w ruchu RW o wielkości 0,5-1,0 mm. Ich udział wynosił 63% w pionie I, 35% w pionie II i 58% w pionie III. Najmniejszy udział miały frakcje 5-10 mm i 10-20 mm (rzędu kilku %). Przeciętna wielkość wleczyn d_{50} w poszczególnych pionach była zbliżona i zmieniała się od 0,71 mm do 0,99 mm. Odchylenie standardowe krzywej ziarnowej $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ RW zmieniało się między 1,7 a 3,0. W pionie I RW było drobniejsze od MD, którego d_{50} była równa 0,86 mm, natomiast w pionach II i III RW zawierało więcej grubszych frakcji niż MD. Wysortowanie MD było na poziomie $U = d_{60}/d_{10}$ = 2,1-2,5 a RW 1,9-3,8 (tabela 2).

Tabela 2. Granulometria rumowiska wleczonego i materiału dennego, Odra
Table 2. Granulometry of the bed load and bed material, Odra River

Nr pionu		Frakcje (mm)							d_{50} mm	U	σ
		0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-1	1-2	2-5	5-10	10-20			
		Zawartość cząstek wraz z mniejszymi (%)									
I	RW	0	12	63	14	4	3	4	0,80	1,9	1,8
	MD	0	12	54	15	8	7	4	0,86	2,1	2,4
II	RW	0	16	35	17	19	9	4	0,99	3,8	3,0
	MD	0	23	48	14	8	4	3	0,78	2,5	2,1
III	RW	0	25	58	10	4	2	1	0,71	2,3	1,7
	MD	0	23	66	7	2	1	1	0,70	2,2	1,5

2.3. Początek ruchu i przemieszczanie rumowiska

Zmiany dna rzeki oraz tworzenie i przemieszczanie się form korytowych w postaci odsypisk zależą przede wszystkim od rodzaju materiału dennego, początku ruchu i charakterystyki transportu rumowiska (Radecki-Pawlik 2011). W tym celu autorzy przeprowadzili analizę początku ruchu w oparciu o kryterium Shieldsa oraz własne pomiary transportu.

Maksymalna wielkość unosin była rzędu 1-1,5 mm (Banasiak 1999). Dotyczy to wszystkich trzech pionów, w których średnie prędkości zmieniały się w zakresie 0,86-0,97 m/s, a głębokości wynosiły 2,3-2,5 m. Do określenia początku unoszenia w Odrze posłużono się najczęściej stosowanym bezwymiarowym naprężeniem ścinającym a_c.

$$a_c = \frac{hI}{\rho_w\left(\frac{\rho_r}{\rho_w}-1\right)d} \tag{2}$$

gdzie:
h - głębokość wody (m),
I - spadek zwierciadła wody (-),
ρ_w - gęstość wody (kg/m^3),
ρ_r - gęstość rumowiska (kg/m^3),
d - średnica ziarna (m).

W pionach pomiarowych określono naprężenie a_c, które wyniosło dla ziaren 1 mm i 1,5 mm odpowiednio 0,335-0,364 (rysunek 4, punkt 1) oraz 0,223-0,242 (punkt 2). Analiza wykazała, że początek unoszenia w Odrze najlepiej opisuje kryterium Van Rijna.

Z pomiarów transportu rumowiska wleczonego wynika, że w pobranych próbach zawartość następujących frakcji była najniższa:

- pion I: 2-5 mm 4%; 5-10 mm 3% i 10-20 mm 4%,
- pion II: 5-10 mm 9% i 10-20 mm 4%,
- pion III: 2-5 mm 4%, 5-10 mm 2% i 10-20 mm 1%.

Do dalszej analizy przyjęto, że właśnie te frakcje, których zawartość w próbach jest znikoma, rzędu kilku %, są uruchamiane i podrywane z dna (początek ruchu). Podobnie, jak dla określenia unoszenia, tak i w przypadku początku ruchu rumowiska wleczonego obliczono bezwymiarowe naprężenie a_c ze wzoru (2). Dla frakcji 2-5 mm i 5-10 mm reprezentowanych odpowiednio przez średnią średnicę 3,5 mm (a_c = 0,096-0,104, rysunek 4, punkt 3) i 7,5 mm (a_c = 0,045-0,048, punkt 4) początek ruchu przebiega zgodnie z kryterium Shieldsa. Natomiast dla frakcji 10-20 mm naprężenia a_c obliczone w oparciu o pomiary transportu rumowiska wleczonego wynoszą 0,022-0,024 (punkt 5) i są niższe od naprężeń wg Shieldsa.

Badania terenowe na Łabie, Renie i Dunaju (Faulhaber & Alexy 2005, Söhngen et al. 1998) wykazują, że odległość transportu poszczególnych frakcji rumowiska wleczonego po dnie w rzekach o podłożu skonsolidowanym w wyniku sedymentacji jest dużo mniejsza od odległości pokonywanej przez materiał, którym rzeka jest „dokarmiana". Autorzy wraz ze współpracownikami przeprowadzili podobne badania na Odrze w rejonie Malczyc. 220-metrowy eksperymentalny odcinek rzeki podzielono na trzy pododcinki, które wypełniono trzema rodzajami kruszywa o granulacji 2-8 mm, 8-16 mm i 16-32 mm. Na podstawie tych unikal-

nych terenowych eksperymentów stwierdzono, że poszczególne frakcje przemieściły się na odległość od kilku (grube ziarna) do kilkudziesięciu metrów (drobne ziarna).

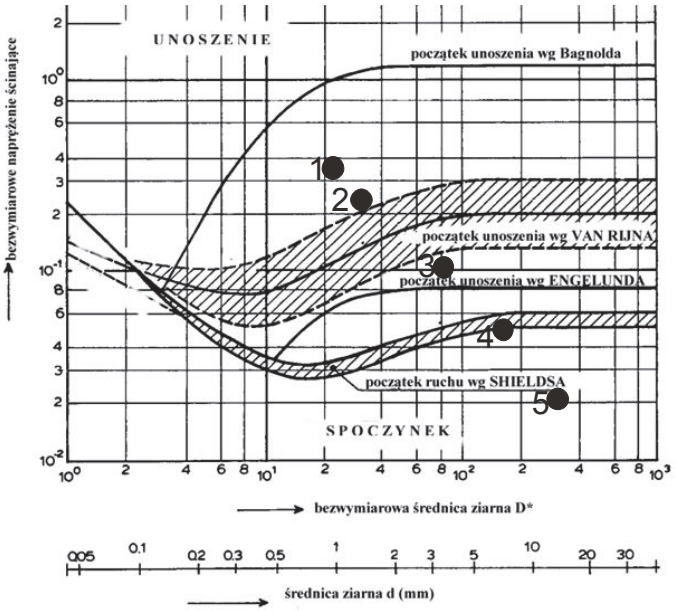
Potwierdzają one również wyniki badań przeprowadzone przez Michalik i współpracowników z Akademii Rolniczej w Krakowie. Stosując metody znacznikowe stwierdzili, że odległość transportu rumowiska zależy od wielkości ziaren. Dla piasków i żwirów 0,5-5 mm odległość ta jest rzędu 58-160 m, a dla otoczaków 10-30 mm ok. 50-100 m.

3. Przemiały i głębokości tranzytowe

Wynikiem zabudowy rzeki stopniami jest m.in. zakłócenie równowagi hydrodynamicznej i zdolności transportowej. Rumowisko jest zatrzymywane na górnym stanowisku jazu, natomiast poniżej ma miejsce erozja liniowa. Proces ten występuje na każdej rzece, ale w przypadku rzek zabudowanych stopniami jego dynamika jest intensywniejsza. Dobitnym tego przykładem jest odcinek Odry swobodnie płynącej poniżej stopnia Brzeg Dolny (rok budowy 1958, km 282). Badania autorów wykazały, że dynamika erozji dennej w latach 1931-61 (3 lata eksploatacji stopnia Brzeg Dolny) wynosiła 0,66 cm/rok, a w latach późniejszych 1961-85 (27 lat eksploatacji) była równa aż 7,47 cm/rok.

Erozja i wymycie ogromnych ilości materiału dennego spowodowały pogłębienie koryta w nurtowej części oraz znaczne zmniejszenie szerokości przekroju. Wyerodowany materiał został odłożony poniżej, tworząc liczne przemiały utrudniające nawigację na Odrze swobodnie płynącej. W efekcie parametry koryta Odrzańskiej Drogi Wodnej między Brzegiem Dolnym a Ścinawą zmieniły się na tyle, że obniżył się poziom wody, zmniejszyły się drastycznie głębokości wody i korespondujące z nimi głębokości tranzytowe. Zgodnie z Rozporządzeniem (2002), Odra swobodnie płynąca od śluzy w miejscowości Brzeg Dolny (km 283,5) do ujścia rzeki Nysy Łużyckiej (km 542,4, długość szlaku 258,9 km) ma obecnie II klasę drogi wodnej o znaczeniu regionalnym. Wymagane parametry eksploatacyjne na tym odcinku wynoszą: szerokość szlaku 30 m; głębokość tranzytowa 1,8 m i promień łuku 300 m. Aby głębokości tranzytowe były rzędu 1,8 m poniżej Brzegu Dolnego, przepływy powinny być w granicach 95 m^3/s w przekrojach Brzeg Dolny (km 284,7) i Malczyce (304,8) oraz 110 m^3/s w Ścinawie (km 332). Natomiast dla

uprawiania żeglugi turystycznej, wymagane głębokości rzędu 1,3 m mogą być zapewnione podczas przepływów 67 m^3/s (Brzeg Dolny), 56 m^3/s (Malczyce) i 53 m^3/s (Ścinawa).



Rys. 4. Początek ruchu rumowiska w Odrze swobodnie płynącej
Fig. 4. Incipient movement of sediment in the freely flowing Odra River

W okresie 1997-2009 ilość dni, w których była możliwa żegluga (głębokości wyższe od 1,30 m) na Odrze między Brzegiem Dolnym a Ścinawą zmieniała się w zakresie 121-304 (Dubicki i inni 2013), w zależności od warunków hydrologicznych w danym roku. Głębokości 1,80 m i więcej, wymagane dla II klasy drogi wodnej, zgodnie z Rozporządzeniem (2002), występowały w roku tylko przez 31-173 dni. W tym okresie najmniejsze głębokości występowały w 3 miejscach: km 282,65; 299,1-300,5 i 329,8. Z analiz autorów wynika, że w okresie 2010-2015 znacznie zwiększyła się liczba newralgicznych miejsc z przemiałami, aż do 11: km 282,3-282,6; 311,2; 312,1; 315,4; 315,8; 317; 319,0; 332,0. Głębokości wody podczas niskich przepływów w w/w lokalizacjach nie spełniały wymogów Rozporządzenia (2002) dla uprawiania żeglugi i zmieniały się np. w okresie VI-X.2015 r. następująco: 0 cm na wyjściu

z awanportu dolnego śluzy Brzeg Dolny i w km 296-301; 40-85 cm w km 311,2; 60-105 cm w km 312,1 i 75-105 cm w km 315,4.

4. Wnioski

Przegrodzenie rzeki Odry stopniem Brzeg Dolny spowodowało zmianę reżimu hydrologicznego oraz naruszenie równowagi hydrodynamicznej. Z badań autorów wynika, że przemiały są tu wynikiem m.in. dostawania się i odkładania rumowiska wymytego z rzeki na skutek intensywnej erozji poniżej stopnia. Przy niskich przepływach poruszają się one z prędkością rzędu 0,3 m/rok, a przy najwyższych 24 m/rok. Całkowity transport rumowiska wleczonego (90%) i unoszonego (10%) w Odrze swobodnie płynącej wynosi 5,8 kg/s. Najwięcej było cząstek o wielkości 0,5-1 mm (35-63%). Frakcji 5-10-20 mm było kilka %. W pionach pomiarowych naprężenia bezwymiarowe a_c dla ziaren 1 mm i 1,5 mm były równe 0,335-0,364 oraz 0,223-0,242. Początek unoszenia w Odrze najlepiej opisuje kryterium Van Rijna. Dla frakcji 2-5 i 5-10 mm naprężenia a_c wynoszą odpowiednio 0,096-0,104 i 0,045-0,048, a początek ruchu przebiega zgodnie z kryterium Shieldsa. Natomiast dla frakcji 10-20 mm naprężenia a_c są niższe od Shieldsa.

W okresie 2010-2015 wzrosła ilość przemiałów na badanym odcinku Odry z 3 do 11, a głębokości wody w tych miejscach zmieniały się od 0 cm do 105 cm, nie spełniając wymogów żeglugowych.

Literatura

Banasiak, R. (1999). *Badanie transportu rumowiska unoszonego w korytach otwartych.* Praca doktorska, Akademia Rolnicza, Wrocław.

Dubicki, A., Kosierb, R., Działa, I., Wilk-Stawarz, B., Głowicki, B., Chudzik, B., Bogucki, J., Bogusz, A., Tokarczyk, T. (2013). Uwarunkowania hydrologiczno-meteorologiczne i hydrotechniczne Odrzańskiej Drogi Wodnej. W: J. Kulczyk, A. Dubicki, D. Olearczyk (red.), *Odrzańska Droga Wodna* (s. 45-71). Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne.

Faulhaber, P., Alexy, M. (2005). Artificial bed load supply at the River Elbe-investigation and realization. *Arch. Hydrobiol. Suppl., 155*, 539-547.

Feng, X.X., Li, J.B., Zhang, L. (2013). Sediment transport and its effect on navigation in long tailrace of hydropower station. *Adv. Mat. Res., 779-780*, 1147-1151.

Haddadchi, A., Omid, M.H., Dehghani, A.A. (2013). Bedload equation analysis using bed load-material grain size. *J. Hydrol. Hydromech., 61*(3), DOI: 10.2478/johh-2013-0031, 241-249.

Kasperek, R. (2015). Changes in the meandering Upper Odra River after the flood in 1997 and 2010. Part II. Sediment and water. *Pol. J. Environ. Stud., 24*(6), DOI: 10.15244/pjoes/59036, 35-40.

Kasperek, R., Mokwa, M., Wiatkowski, M. (2013). Modelling of pollution transport with sediment on the example of the Widawa River. *Arch. Environ. Prot., 39*(2), 29-43.

Kasperek, R., Wiatkowski, M. (2014). Hydropower generation on the Nysa Klodzka River. *Ecol. Chem. Eng. S, 21*(2), DOI: 10.2478/eces-2014-0025, 327-336.

Kulczyk, J., Winter, J. (2003). *Śródlądowy transport wodny*. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.

Laks, I., Kałuża, T., Sojka, M., Walczak, Z., Wróżyński, R. (2013). Problems with modelling water distribution in open channels with hydraulic engineering structures. *Rocz. Ochr. Sr. (Annual Set The Environment Protection), 15*, 245-257.

Parzonka, W., Kasperek, R., Głowski, R. (2010). Ocena degradacji koryta właściwego Odry Środkowej i program działań naprawczych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 8*(1), 59-68.

Radecki-Pawlik, A. (2011). *Hydromorfologia rzek i potoków górskich. Działy wybrane*. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 7 maja 2002 r. w sprawie klasyfikacji śródlądowych dróg wodnych. Dz.U. nr 77, poz. 695.

Söhngen, B., Witte, H.M., Kellermann, B. (1998). *Investigations concerning Danube River engineering works to improve navigation*. Conference ICERD, IAHR, Budapest.

Wiatkowski, M., Rosik-Dulewska, Cz., Kuczewski, K., Kasperek, R. (2013). Ocena jakości wody zbiornika Włodzienin w pierwszym roku funkcjonowania. *Rocz. Ochr. Sr. (Annual Set The Environment Protection), 15*, 2666-2682.

Incipient Motion and Sediment Transport on the Naturally Flowing Odra River Sector in the Aspect of Required Transit-Depths

Abstract

The freely flowing Odra River is found between the Brzeg Dolny barrage (km 282) and outlet to the lake Dąbie in Szczecin (km 742). The canalization of the Odra River relying on the building of channel with barrages (weir and lock) targets the assertion of suitable navigable depths, route cross-sections, but also the homoeostasis of flows and water levels. Partitioning of the river with the barrage causes change of the hydrological regime and breach of the hydrodynamic channel equilibrium. Shipping conditions in the Odra River change depending on hydrological phenomena. To them greater are oscillations of flows, these greater difficulties in assertion of the normal shipping. It is visible this particularly on the naturally flowing Odra River sector between Brzeg Dolny and Malczyce, where the depth depends on the flow size and fluvial processes (erosion, sedimentation, sediment transport).

In the work one presented sediment movement analysis in the shipping aspect. One used investigations of other authors, own hydrometric measurements, bed material and sediment transport have been sampled. Tests of the sediment are necessary among other things to estimate outwashes and degraded areas. From research of authors it results that outwashes in the Odra River are among other things a result of getting and the postponement of the sediment washed from the bottom as the result of the intensive erosion below the Brzeg Dolny weir. At low flows meals are shifted with the speed 0.3 m/year and at highest 24 m/year. Total transport of the suspended and bed load in Odra River has been measured on level 5.8 kg/s. Participation of the bed load and suspended load in total transport is suitably 90% and 10%. Particles about the size 0.5-1 mm was most (63% in vertical I, 35% in II and 58% in III), and least 5-10 mm and 10-20 mm (several %).

To describe the beginning movement and suspension of bed material in the Odra River has used the dimensionless shear stress a_c. In 3 measuring verticals value of this stresses a_c has determined which for grains 1 mm and 1.5 mm was equal suitably 0.335-0.364 and 0.223-0.242. Suspension in the Odra River best describes the Van Rijn criterion. In this analysis one accepted that fractions whose content in samples is several %, are started and raised from the bottom (beginning movement). For the fraction 2-5 mm and 5-10 mm the stresses a_c carries out suitably 0.096-0.104 and 0.045-0.048, and the incipient motion takes place in compliance with the Shields criterion. However for the fraction

10-20 mm of the stresses a_c calculated based on the sediment transport measurements are equal 0.022-0.024 and lower from Shields values.

In a period of 1997-2009 the quantity of days in which was the possible shipping (higher depths from 1.30 m) on the Odra River between Brzeg Dolny and Ścinawa changed within the range 121-304. Depths 1.80 m and more, required for II class of the water route, appeared in the year only through 31-173 days. In this period least depths took place in the km 282.65; 299.1-300.5 and 329.8. From analyses of authors it results that within a period of 2010-2015 increased the quantity of outwashes about 3 (period 1997-2009) to 11. Depths of water in these locations (km 282.3-282.6; 311.2; 312.1; 315.4; 315.8; 317; 319.0; 332.0, during low flows do not fulfill requirements of the Decree 2002 for the shipping.

Streszczenie

Odra swobodnie płynąca znajduje się między stopniem wodnym Brzeg Dolny (km 282) a ujściem do jeziora Dąbie w Szczecinie (km 742). Kanalizacja rzeki polegająca na zabudowie koryta stopniami piętrzącymi (jaz i śluza) ma na celu zapewnienie odpowiednich głębokości żeglugowych, przekrojów szlaku, ale także ustabilizowanie przepływów i stanów wody. Przegrodzenie rzeki stopniem powoduje zmianę reżimu hydrologicznego oraz naruszenie równowagi hydrodynamicznej koryta. Warunki żeglugowe w Odrze zmieniają się w zależności od zjawisk hydrologicznych. Im większe są wahania przepływów, tym większe trudności w zapewnieniu normalnej żeglugi. Widać to szczególnie na odcinku Odry swobodnie płynącej między Brzegiem Dolnym a Malczycami, gdzie głębokość zależy od wielkości przepływu oraz od procesów fluwialnych (erozja, sedymentacja, transport rumowiska).

W pracy przedstawiono analizę ruchu rumowiska w aspekcie żeglugi. Wykorzystano badania innych autorów i własne pomiary hydrometryczne, pobrano materiał denny oraz pomierzono transport rumowiska. Badania rumowiska są niezbędne m.in. do ustalenia przemiałów i obszarów degradacji. Z badań autorów wynika, że przemiały w Odrze są m.in. wynikiem dostawania się i odkładania rumowiska wymytego z dna rzeki na skutek intensywnej erozji poniżej jazu Brzeg Dolny. Przy przepływach niskich przemiały są przesuwane z prędkością rzędu 0,3 m/rok, a przy najwyższych nawet 24 m/rok. Całkowity transport rumowiska (wleczonego i unoszonego) w przekroju rzeki Odry pomierzono na poziomie 5,8 kg/s. Udział rumowiska wleczonego i unoszonego w całkowitym transporcie jest na poziomie odpowiednio 90% i 10%. Najwięcej było cząstek o wielkości 0,5-1 mm (63% w pionie I, 35% w pionie II i 58% w pionie III), a najmniej 5-10 mm i 10-20 mm (kilka %).

Do określenia początku ruchu i unoszenia materiału dennego w Odrze posłużono się bezwymiarowym naprężeniem ścinającym a_c. Dla trzech pionów pomiarowych określono wartość tego naprężenia, która dla ziaren 1 mm i 1,5 mm była równa odpowiednio 0,335-0,364 oraz 0,223-0,242. Początek unoszenia w Odrze najlepiej opisuje kryterium Van Rijna. W analizie przyjęto, że frakcje, których zawartość w próbach jest rzędu kilku %, są uruchamiane i podrywane z dna (początek ruchu). Dla frakcji 2-5 i 5-10 mm naprężenia a_c wynoszą odpowiednio 0,096-0,104 i 0,045-0,048, a początek ruchu przebiega zgodnie z kryterium Shieldsa. Natomiast dla frakcji 10-20 mm a_c obliczone w oparciu o pomiary wleczenia wynoszą 0,022-0,024 i są niższe od Shieldsa.

W okresie 1997-2009 ilość dni, w których była możliwa żegluga (głębokości wyższe od 1,30 m) na Odrze między Brzegiem Dolnym a Ścinawą zmieniała się w zakresie 121-304. Głębokości 1,80 m i więcej, wymagane dla III klasy drogi wodnej, występowały w roku tylko przez 31-173 dni. W tym okresie najmniejsze głębokości miały miejsce w km 282,65; 299,1-300,5 i 329,8. Z analiz autorów wynika, że w okresie 2010-2015 wzrosła ilość miejsc-przemiałów z 3 (okres 1997-2009) do 11. Głębokości wody w tych lokalizacjach (km 282,3-282,6; 311,2; 312,1; 315,4; 315,8; 317; 319,0; 332,0) podczas niskich przepływów nie spełniają wymogów Rozporządzenia 2002 dla uprawiania żeglugi.

Słowa kluczowe:
rzeka, ruch rumowiska, głębokości tranzytowe

Key words:
river, sediment movement, transit-depths