

MODELOWANIE DEGRADACJI KORYTA ODRY ŚRODKOWEJ PODCZAS PRZEPŁYWÓW POWODZIOWYCH

PARZONKA W.¹, KASPEREK R.²

¹Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Pl. Grunwaldzki 24, w.parzonka@neostrada.pl

²Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Pl. Grunwaldzki 24, robert.kasparek@up.wroc.pl

Streszczenie : W końcu XIX wieku skanalizowano Górną Odrę, na odcinku od Koźła do Wrocławia. Poniżej ostatniego stopnia wystąpiła intensywna erozja liniowa i lokalna. To zjawisko wystąpiło najpierw poniżej jazów wrocławskich (km 252) wybudowanych w 1897 r., potem poniżej stopnia Rędzin (km 261,2, 1922 r.), a następnie poniżej stopnia Brzeg Dolny (km 281,7, 1958 r.). Aktualnie budowany jest kolejny stopień Malczyce (km 300, 2014 r.).

Zasięg erozji liniowej poniżej stopnia Brzeg Dolny wyniósł 50 km w 1992 r. i 65 km w 2007 r. Objętość wyerodowanych osadów dennych wyniosła średnio na tym odcinku 0,1 mil. m³ rocznie. Spowodowało to znaczne pogłębienie dna, wymywanie drobnych ziaren i utworzenie warstwy obrukowania dna. Katastrofalna powódź w 1997 r. zniszczyła częściowo to obrukowanie.

Dla przerwania długofalowej degradacji koryta Odry Środkowej na odcinku Malczyce-Ścinawa, opracowano na początku XXI wieku Program naprawy, uwzględniając wymogi ekologów i przyrodników. Rozwiązanie oparte jest o częściowe wypełnienie ubytków za pomocą dwóch warstw – dolnej z drobnego żwiru i górnej z grubego żwiru stanowiącego sztuczne obrukowanie.

Modelowanie procesu degradacji koryta rzeki i długofalowego oddziaływania strumienia na naprawiony odcinek zostało oparte o symulację numeryczną. Zastosowaliśmy metodę Meyera-Petera i Müllera oraz program symulacji numerycznej TRANS do określenia początku ruchu cząstek stałych oraz intensywności transportu rumowiska wleczonego.

Słowa kluczowe: powódź, transport rumowiska wleczonego, erozja dna rzeki

Abstract : On the end of XIX century the upper Odra was channelized between Koźle and Wrocław. Below last barrage, intense local and linear erosion appeared. This erosion occurred first below the Wrocław weirs (km 252) constructed in year 1897, then below the barrage Rędzin (km 261,2, 1922), and finally below the barrage Brzeg Dolny (km 281,7, 1958). Currently under construction is the next barrage Malczyce (km 300, 2014 ?).

The extent of linear erosion below the barrage Brzeg Dolny amounted 50 km in 1992 and 65 km in 2007. The volume of the eroded bed sediments equalled on this reach 0,1 mill. m³ per year. It led to great deepening of the riverbed, washing-out of finer particles and formation of bed pavement. The catastrophic flood in 1997 has destroyed partially this pavement cover.

To stop the long – term degradation of the Middle Odra riverbed on the reach Malczyce – Ścinawa, the Program of riverbed improvement was elaborated on the beginning of XXI century, taking in account the ecological and environmental needs. The solution is based on the partial filling-up of the eroded holes by two layers – the lower layer (fine gravel), and the upper layer (coarse gravel) of artificial pavement.

The modeling of the degradation process of the riverbed and of the long-term action of the stream on the repaired reach is based on numerical simulation. We used the Meyer-Peter and Müller approach and the programme of numerical simulation TRANS to determine the beginning of solid particles and the transport intensity of bed load.

Key words: flood, bed load transport, riverbed erosion

Wprowadzenie

Odcinek Środkowej Odry, będący przedmiotem badań rozpoczyna się w km 281,6 (stopień Brzeg Dolny), a kończy w km 335,0 (Ścinawa). Zlokalizowane są tu następujące posterunki wodowskazowe Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział we Wrocławiu: Brzeg Dolny w km 284.7 z rzędną zera 98.86 m NN, Malczyce w km 304.8 z rzędną zera 94.15 m NN i Ścinawa w km 332.0 z rzędną zera 86.65 m NN.

Na omawianym odcinku Odra przepływa przez pradolinę Wrocławsko – Magdeburską, dobrze uformowaną, o szerokości 10 km, oraz pradolinę Barycko – Głogowską. Bieg Odry składa się zatem z odcinków dolinowych oraz ciasnych odcinków przełomowych, przebiegających poprzecznie do pradolin. Wpłynęło to na ogólne ukształtowanie zarówno koryta Odry, jak i całego Nadodrza. Na badanym odcinku w wierzchnich warstwach zalegają piaski, żwiry oraz gliny piaszczyste. Charakterystyczne dla doliny Odry jest występowanie wychodni trzeciorzędowych iłów poznańskich

W XIX wieku przeprowadzono regulację rzeki Odry za pomocą budowli poprzecznych tj. ostróg. Jako główny cel regulacji przyjęto wówczas uzyskanie głębokości równej 1,0 m w pasie żeglutowym, przy średnim najniższym stanie wody od ujścia Nysy Kłodzkiej do Świecia Odrzańskiego. Mimo wykonania regulacji rzeki, głębokości na niektórych odcinkach spadały w latach suchych do 0,7 m. Regulacja poprawiła zatem niewiele głębokości żeglugowe. Już pod koniec XIX w. inżynierowie niemieccy podjęli więc kolejne działania, mające na celu zapewnienie możliwości transportu wodnego niezależnie od reżimu hydrologicznego rzeki. Zrealizowano kanalizację Odry od Koźła (km 95,2) do Wrocławia (km 252,4). Wybudowano 25 stopni, w tym 22 na głównej drodze żeglugowej i 3 w obrębie Wrocławskiego Węzła Wodnego [4]. Rolę ostatniego stopnia pełniły wtedy wrocławskie jazy i śluzy żeglugowe na Odrze Miejskiej i na Starej Odrze. Liniowa i lokalna erozja dna swobodnie płynącej Odry poniżej Wrocławia wymusiła wykonanie w 1922 r. następnego stopnia wodnego Rędzin (km 260,7). Problemy z niedostatecznymi przepływami i głębokościami żeglugowymi oraz z postępującą erozją liniową nie znikły, przeniosły się one na następny odcinek Odry. Degradacja tego odcinka była więc tylko kwestią czasu.

W 1958 r. polscy inżynierowie wybudowali kolejny stopień Brzeg Dolny (km 281,7). Stopniowa degradacja koryta Odry powyżej i poniżej tego stopnia była jeszcze intensywniejsza niż na opisanych odcinkach poniżej Wrocławia i poniżej Rędzina. Proces erozji liniowej rozwijał się też intensywnie. Zasięg erozji wyniósł 50 km w 1993 r. i 65 km w 2007 r. (Rysunek 1). Objętość wyerodowanego rumowiska dennego wyniosła w latach 1958-1993 ok. 3,5 mln m³ (100 tys. m³/rok). Średni poziom dna Odry obniża się o 4-8 cm rocznie, powodując stopniowe obniżanie się zwierciadła wody w korycie rzeki Odry i w przyległej dolinie.

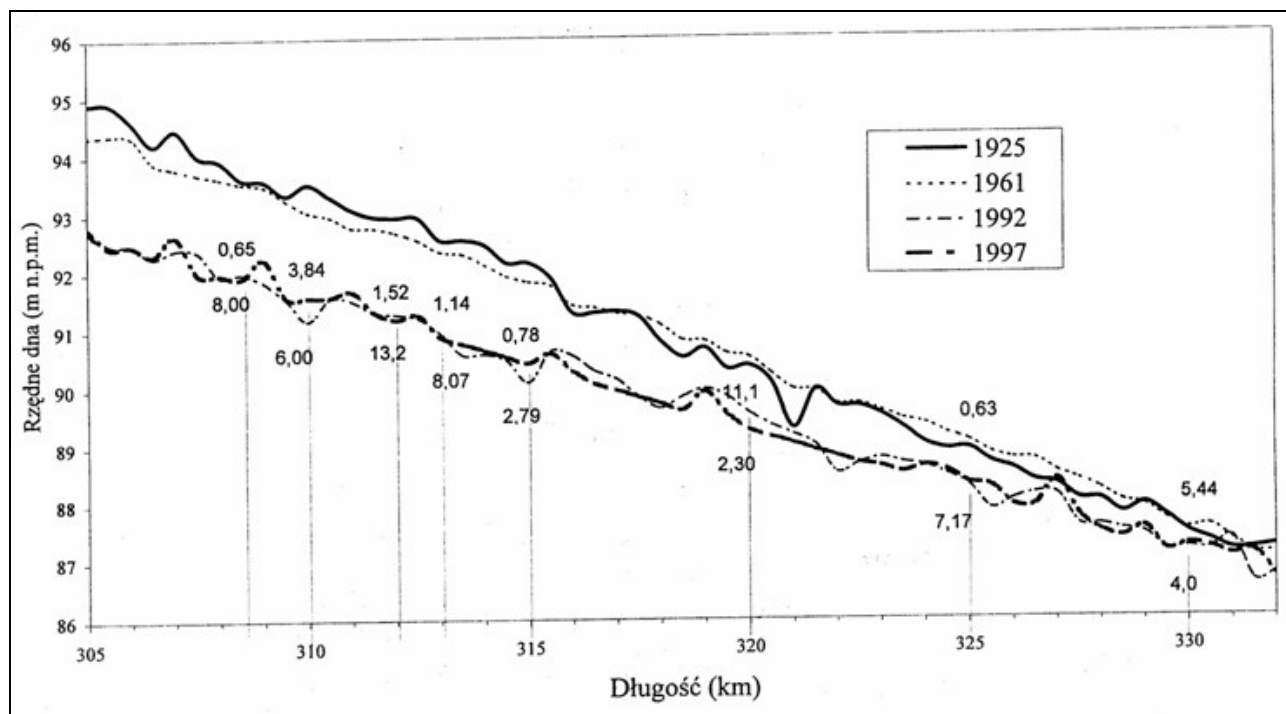
Stopniowe wymywanie drobnych frakcji ziarnowych spowodowało zwiększenie średniej wielkości ziarna rumowiska dennego, głównie na odcinku Brzeg Dolny-Malczyce-Ścinawa i wytworzenie obrukowania dna, które nieco spowolniło proces erozji liniowej, wskutek zwiększenia odporności wierzchniej warstwy dna koryta [1]. Wyerodowane rumowisko denne odkłada się z kolei na odcinku niezdegradowanym poniżej Chobieni, powodując konieczność okresowych robót pogłębiarskich. W niektórych miejscach (usuwanie przemiałów) pojawiły się również przedsiębiorstwa, które wydobywają rumowisko denne jako materiał budowlany (np. w rejonie Głogowa).

W tej sytuacji budowa kolejnego stopnia Malczyce w Rzeczycy (km 300,0) jest jedynym realnym rozwiązaniem, aby przedłużyć istniejącą kaskadę Odrzańskiej Drogi Wodnej. Jego budowa ma na celu m.in.:

- zabezpieczenie stopnia w Brzegu Dolnym przed dalszą erozją lokalną i utratą stateczności,
- podniesienie poziomów zwierciadła wody gruntowej między Brzegiem Dolnym a Malczycami, co zabezpieczy ekosystem dolinowy przed dalszą degradacją,
- przywrócenie parametrów szlaku żeglugowego.

Budowa stopnia Malczyce nie rozwiązuje jednak problemu erozji liniowej na odcinku Malczyce-Chobienia. Odcinek ten jest tak zdegradowany, że wymaga całkowicie odmiennego podejścia do modernizacji systemu regulacji.

Z wieloletnich badań Parzonki i Kasperka [2, 3, 5, 6] wynika, że dno Odry na odcinku między Malczycami w km 300 i Ścinawą w km 335 obniżyło się średnio w Malczycach o 2 m i o 0,8 m w Ścinawie. Na podstawie analizy geometrii koryta Odry oraz pomiarów transportu rumowiska wleczonego na ww. odcinku stwierdzono, że szerokość pasa wleczenia zmienia się od 40 m do 60 m. W oparciu o tą analizę oraz ocenę ekologów przyjęto, że należy dno rzeki podnieść przynajmniej o połowę jego obniżenia w okresie 1958-2008, poprzez uzupełnienie rumowiskiem o odpowiedniej granulacji, tj. o ca 1,0 m w rejonie Malczyc i ca 0,4 m w rejonie Ścinawy. Autorzy przeprowadzili obliczenia ilości rumowiska niezbędnego do zapewnienia tzw. rynny erozyjnej na szerokości średnio 50 m.



Rysunek 1. Zmiany średnicy d_{50} rumowiska dennego w latach 1996 i 1997 na tle profili podłużnych rzeki Odry na odcinku Malczyce – Ścinawa

W latach 2008-2011 opracowano program działań naprawczych koryta Środkowej Odry na odcinku Malczyce-Ścinawa [7, 8, 9]. Uwzględniały one zalecenia ekologów dotyczących ochrony siedlisk na obszarze NATURA 2000, a zwłaszcza obszarów specjalnej ochrony OSO (wg Dyrektywy Ptasiej) i specjalnych obszarów ochrony SOO Łęgi Odrzańskie (wg Dyrektywy Siedliskowej). Działania te mają na celu powstrzymanie procesu erozji dna rzeki i obniżania się poziomów zwierciadła wody w rzece i zwierciadła wody gruntowej w przyległej dolinie. Dobór uziarnienia rumowiska do corocznego wypełnienia ubytków erozyjnych został określony na podstawie pomiarów terenowych oraz modelowania matematycznego (2010-2011).

1. Globalne opory ruchu i parametry transportu rumowiska wleczonego w Odrze Środkowej

Globalne opory ruchu w korycie rzeczonym można wyznaczyć z klasycznej formuły Manninga na prędkość średnią v_m :

$$v_m = K_s R_h^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

gdzie K_s jest globalnym współczynnikiem oporu dla całego koryta, równym odwrotności współczynnika szorstkości n , a I spadkiem zwierciadła wody. Zastępując promień hydrauliczny R_h przez średnią głębokość h_m uzyskuje się:

$$v_m = K_s h_m^{2/3} I^{1/2} \quad (2)$$

Współczynnik K_s należy wyznaczyć na podstawie pomiarów hydrologicznych. Dla badanej Odry Środkowej autorzy wyznaczyli te wartości na podstawie pomiarów w przekrojach wodowskazowych Brzeg Dolny, Malczyce i Ścinawa. Ich znajomość umożliwiła m.in. obliczenie parametrów intensywności transportu rumowiska wlezonego w oparciu o wzór Meyera-Petera i Müllera (MPM). Stwierdzono, że rzeczywiste współczynniki K_s dla badanego odcinka Odry Środkowej są odmienne od wartości K_s przyjmowanych w obliczeniach hydraulicznych na podstawie literatury przedmiotowej, rzędu $K_s=33-40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$.

Podobny wniosek dotyczy również parametru K_s/K_r , gdzie K_r jest współczynnikiem szorstkości ziarnowej, wyznaczanym ze wzoru $K_r=21,1/d^{1/6}$. Parametr K_s/K_r decyduje o redukcji siły poruszającej strumienia wody τ_h oraz o intensywności transportu rumowiska wlezonego w rzekach. Wynika z tego, że przy modelowaniu transportu rumowiska wlezonego w rzekach nizinnych i podgórskich błędne jest przyjmowanie we wzorze Meyera – Petera i Müllera (MPM) wartości parametru K_s/K_r równej 1,0.

Autorzy przeanalizowali wraz ze współpracownikami z CEMAGREF Lyon A. Paquier i Ph. Ramez zmienność oporów ruchu w Odrze, w szerokim zakresie wartości parametru K_s/K_r w funkcji bezwymiarowych naprężeń τ_h/τ_c , gdzie τ_c jest graniczną wartością naprężenia ścinającego dla początku ruchu. Z obliczeń otrzymano krzywe typu U, dla kilku różnych wartości uziarnienia materiału dennego ($d=1-4 \text{ mm}$).

Strumień rzeczny wywołuje naprężenia ścinające τ_h na dno ciekłu:

$$\tau_h = \rho_w g R_h I \quad (3)$$

gdzie ρ_w jest gęstością wody, a g przyspieszeniem ziemskim.

W korytach rzecznych o szerokości zwierciadła wody $B > (10-15)h_m$, promień R_h można zastąpić głębokością średnią h_m :

$$\tau_h = \rho_w g h_m I \quad (4)$$

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 miarodajną wielkość ziarna d_m lub przez średnicę d_{50} . Funkcja ta wiąże bezwymiarowe naprężenia ścinające τ_* i liczbę Reynoldsa Re_* :

$$\tau_* = \frac{\tau_c}{g d_m (\rho_s - \rho_w)}; \quad Re_* = \frac{v_* d_m}{\nu} \quad (5)$$

gdzie ρ_s jest gęstością rumowiska, v_* prędkością ścinającą, a ν kinematycznym współczynnikiem lepkości.

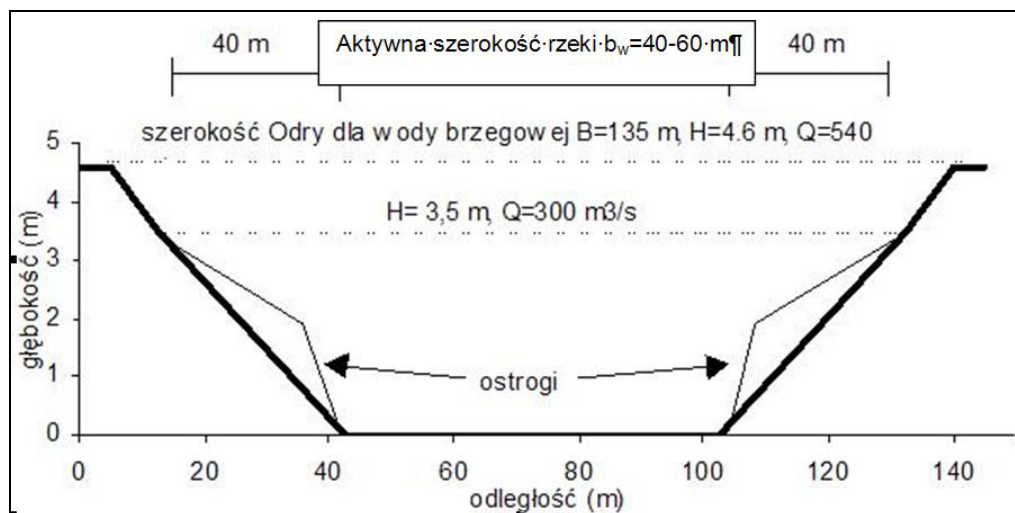
Dla rumowiska wielofrakcyjnego wprowadzono modyfikację formuły Shieldsa, polegającą na zastąpieniu średnicy d_m przez średnią średnicę kolejnej frakcji d_i :

$$\tau_* = \frac{\tau_c}{g d_i (\rho_s - \rho_w)} \quad (6)$$

Z reguły naprężenia τ_* i średnie głębokości krytyczne h_c określa się dla 4-5 frakcji ziarnowych d_i . Większość autorów przyjmuje uproszczoną wartość $\tau_* = 0,047$. Autorzy ocenili warunki początku ruchu dla zróżnicowanej wartości τ_c , zgodnie z krzywą Shieldsa. Obliczenie przeprowadzono dla uśrednionych spadków zwierciadła wody.

Do czynników kształtujących opory przepływu należy także szerokość pasa wleczenia b_w . Szerokość ta w Odrze Środkowej, na odcinku poniżej Brzegu Dolnego jest limitowana przede wszystkim kształtem przekroju poprzecznego koryta, które zostało uregulowane ostrogami podprądowymi, koncentrującymi strumień wody. Odległość między główkami ostróg w przekroju poprzecznym Odry na odcinku Brzeg Dolny – Ścinawa zmienia się od 60 m do 80 m. Odległość ostróg jest rzędu 60 – 90 m, a nachylenie skarpy korpusu głowic wynosi około 1:100.

Badania terenowe transportu rumowiska wlezonego w Odrze przeprowadzono na odcinku km 300 – km 332. Pomiary wykonano przy niskich i wysokich przepływach wody, w przedziale od 100 m³/s do 700 m³/s. W poszczególnych pionach pomiarowych mierzono prędkości przepływu i intensywność transportu rumowiska wlezonego, oraz pobierano materiał denny. Rezultaty pomiarów terenowych posłużyły do sporządzenia wykresów wleczenia w przekrojach Odry. Z wykresów tych wynika, że transport rumowiska wlezonego odbywa się w pasie koryta rzeki o szerokości $b_w=40-60$ m (Rysunek 2).



Rysunek 2. Schematyczny przekrój poprzeczny uregulowanego koryta Odry Środkowej na odcinku Malczyce – Ścinawa

W trakcie badań rumowiska mierzono również prędkości przydenne na głębokości 0,30 m od dna. Prędkości te podczas przepływu rzędu $Q=300$ m³/s (w przekroju Ścinawa), w pionach o najwyższym wleczeniu oraz maksymalnych głębokościach i średnich prędkościach wody zmieniały się od 0,42 m/s do 0,64 m/s. W pionach o najniższym transporcie rumowiska wlezonego lub jego braku, prędkości przydenne wynosiły 0,30-0,43 m/s. Przy niskich przepływach rzędu 120-130 m³/s najwyższe wartości intensywności transportu rumowiska wlezonego rzędu 50-70 g/s,m odnotowano w pionach o niższych głębokościach wody. Pomiary podczas przepływów powodziowych rzędu 500-700 m³/s wykazały, że wysokie intensywności wleczenia miały miejsce zarówno przy maksymalnych głębokościach rzędu 6,0 m i więcej (prędkość przydenne zmieniała się od 0,7 m/s do 1,0 m/s), jak i przy niższych głębokościach ok. 5,0 m (prędkość przydenne była rzędu 0,9-1,2 m/s). Oprócz głębokości wody oraz prędkości przydennych, również uziarnienie materiału dennego ma znaczący wpływ na zmienność wleczenia w przekroju Odry.

Określenie głębokości krytycznych h_c początku ruchu rumowiska wielofrakcyjnego przeprowadzono w oparciu o wzór Shieldsa (5), w którym założono stałą wartość bezwymiarowych naprężeń ścinających $\tau_*=0,047$. Spadek linii energii I przyjęto na podstawie pomiarów hydrometrycznych IMGW. W wieloleciu 1950-2008 spadek ten wahał się od 0,23‰ do 0,27‰. Do obliczeń przyjęto uśrednioną wartość spadku zwierciadła wody na badanym odcinku Odry $I=0,25$ ‰. Głębokości krytyczne h_{ci} dla danej frakcji d_i wyznaczono ze wzoru:

$$h_{ci} = \tau_* \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w I} d_i = \frac{0,047 \cdot 1,6 \cdot d_i}{I} = \frac{0,075 d_i}{I} \quad (7)$$

Dla rumowiska aluwialnego (piaski, żwiry) przyjęto względną gęstość rumowiska $\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = 1,6$.

Skład ziarnowy materiału dennego dla odcinka Malczyce-Ścinawa przed powodzią w 1996 r. i po katastrofalnej powodzi w 1997 r., która spowodowała zniszczenie obrukowania, zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Skład ziarnowy materiału dennego Odry na odcinku Malczyce - Ścinawa w latach 1996 i 1997

Rok	d ₁₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₉₀ (mm)
1996	0,48	4,30	20,50
1997	0,44	1,99	23,78

W przekroju Ścinawa określono w 1996 r. krzywe przesiewu dla materiału dennego i dla rumowiska wleczonego. Z porównania tych krzywych wynika, że rumowisko wlezione w Odrze Środkowej ma z reguły nieco mniejszą średnicę ziaren niż materiał denny.

Obliczenia głębokości krytycznej h_c strumienia wody dla początku ruchu wykonano w przekroju wodowskazowym Malczyce i Ścinawa, dla których znane były natężenia przepływu Q oraz korespondujące głębokości średnie h_m i głębokości maksymalne h_{max} (Tabela 2 i 3).

Dla Malczyce w okresie 1961-1997 przepływ średni z wielolecia SSQ wynosił 170 m³/s.

Tabela 2. Głębokości krytyczne w przekroju Malczyce

Q (m ³ /s)	50,50	85,50	100,00	159,00	197,00	253,00	285,00	487,00
h _m (m)	1,33	1,54	1,59	2,12	2,63	2,73	3,08	4,05
d _i (mm)	4,50	5,10	5,30	6,60	8,80	9,10	10,30	13,50

Dla Ścinawy w okresie 1961-1997 przepływ średni z wielolecia SSQ wynosił 198 m³/s, przepływ brzegowy Q_{brzeg} =550 m³/s, przepływ średni niski SNQ=78 m³/s, a przepływ średni wysoki SWQ=714 m³/s.

Tabela 3. Głębokości krytyczne w przekroju Ścinawa

Q (m ³ /s)	54,40	78,50	96,00	108,00	137,00	159,00	182,00	253,00	324,00	413,00	550,00
h _m (m)	1,24	1,41	1,52	1,54	1,84	1,92	2,21	2,28	2,94	3,02	4,64
d _i (mm)	4,10	4,80	5,00	5,10	6,10	6,30	7,30	7,50	9,60	10,00	15,50

Z tabeli 2 i 3 wynika, że w obu przekrojach wodowskazowych coraz większe frakcje o uziarnieniu d_i będą wprawiane w ruch, w funkcji wzrostu przepływu Q .

W przekroju Malczyce już przy przepływach niżówkowych rzędu 50-85 m³/s transportowany jest żwir o wielkości rzędu 4,5-5 mm. Przy przepływach zbliżonych do średniego przepływu rzędu 160-170 m³/s uruchomione zostają ziarna o wielkości 6,6-7,2 mm, a przy przepływie zbliżonym do przepływu brzegowego Q =487 m³/s zaczynają poruszać się ziarna o średnicy ok. d_i = 13,5 mm.

W przekroju Ścinawa sytuacja jest podobna jak w przekroju Malczyce. Ziarna o wielkości 4,1 mm uruchamiane są przy przepływach niskich rzędu 55 m³/s, ziarna o wielkości 7-7,5 mm przy przepływach zbliżonych do średniego przepływu 190-200 m³/s, a cząstki stałe o wielkości 15,5 mm przy przepływie brzegowym Q =550 m³/s. Porównując te głębokości krytyczne początku ruchu i odpowiadające im wielkości ziaren d_i widać, że drobne frakcje rumowiska dennego są w ciągłym ruchu już przy najmniejszych natężeniach przepływu. Tylko najgrubsza frakcja d_{90} o ziarnach wielkości 20-24 mm pozostaje na dnie, tworząc tzw. obrukowanie dna. Do zniszczenia obrukowania potrzebne są średnie głębokości strumienia rzędu 6,0-7,2 m. Tego rodzaju głębokości i większe od nich wystąpiły podczas powodzi katastrofalnej w 1997 r., powodując zerwanie obrukowania dna i masowy transport rumowiska.

2. Intensywność transportu rumowiska wlezonego

Natężenie przepływu rumowiska wlezonego q_s w Odrze oblicza się z reguły ze wzoru Meyera – Petera i Müllera (MPM):

$$\rho_w \frac{Q_d}{Q} \left[\frac{K_s}{K_r} \right]^{1.5} h_i I = \tau_* (\rho_s - \rho_w) d_m + 0.25 \left(\frac{\rho_w}{g} \right)^{0.33} q_s^{0.67} \quad (8)$$

Parametr Q_d/Q eliminuje wpływ zaburzeń wywołanych różną szorstkością brzegów i dna. Analiza wyrażenia Q_d/Q dla Odry wykazała, że zmienia się ono w wąskich granicach tj. 0,9 – 1,0. Natomiast parametr K_s/K_r redukuje spadek zwierciadła wody i uwzględnia wpływ rzeźby dna rzeki (szorstkości materiału dennego i form dennych) na opory przepływu. Dla badanego odcinka Odry parametr ten osiągał wartości w przedziale 0,4 – 0,8, w zależności od uziarnienia materiału dennego.

Dla odcinka Odry między Brzegiem Dolnym a Ścinawą przeprowadzono obliczenia parametrów K_s/K_r oraz Q_d/Q . W tym celu wykorzystano wyniki pomiarów hydrometrycznych na Odrze w przekroju wodowskazowym Ścinawa (km 332). Natężenie przepływu wody zmieniało się od 56 m³/s do 892 m³/s, a prędkość średnia od 0,61 m/s do 1,24 m/s. Analiza geometrii koryta rzeki oraz uziarnienia materiału dennego w przekrojach między ostrogami wykazała, że:

- szerokość aktywnego pasa wleczenia b_w na odcinku Odrze od Brzegu Dolnego do Ścinawy jest równa szerokości koryta w dnie i wynosi 40-60 m,
- przeciętna wielkość ziarna d_{50} materiału dennego wynosi na odcinku Malczyce – Ścinawa 3-5 mm a na odcinku Ścinawa – Głogów 1 – 2 mm.

Obliczenia parametrów K_s/K_r oraz Q_d/Q w Odrze Środkowej (przekrój Ścinawa) przeprowadzono dla zmiennych warunków przepływu tj. spadku zwierciadła wody $I = 0,2 - 0,3$ ‰, szerokości pasa wleczenia $b_w = 40-60$ m oraz przeciętnej średnicy ziarna rumowiska dennego d_{50} zmieniającej się od 1,0 mm do 4,0 mm.

Analiza zmienności parametru K_s/K_r oraz Q_d/Q w przy dnie zbudowanym głównie z piasków o średnicy $d_{50} = 1,0$ mm wykazała, że:

- dla szerokości pasa wleczenia b_w rzędu 40 m współczynnik K_s/K_r przyjmował najniższe wartości ok. 0,35 – 0,56 (dla $I=0,3$ ‰) oraz najwyższe ok. 0,43 – 0,69, znacznie mniejsze od 1,0 (dla $I=0,2$ ‰). Dla wyrównanego spadku zwierciadła wody $I=0,24$ ‰ wyrażenie K_s/K_r zmieniało się między 0,39 a 0,63. Parametr Q_d/Q osiągał wartości rzędu 0,91 – 0,99,
- parametr K_s/K_r dla szerokości pasa b_w rzędu 50 m i spadku $I=0,30$ ‰ przyjmował wartości podobne jak dla $b_w=40$ m tj. około 0,36 – 0,56 oraz 0,44 – 0,70 dla $I=0,2$ ‰. Wartość wyrażenia Q_d/Q zmieniała się między 0,92 a 0,99.

Dla gruboziarnistego, żwirowego dna rzeki charakteryzującego się przeciętną wielkością $d_{50} = 4,0$ mm stwierdzono, że wartości współczynnika K_s/K_r zmieniały się od 0,44 do 0,71 przy spadkach I rzędu 0,3 ‰ oraz od 0,55 do 0,87 przy spadkach $I=0,2$ ‰. Dla spadku wyrównanego $I = 0,24$ ‰ parametr ten mieścił się w granicach 0,50 – 0,80. Wyrażenie Q_d/Q przyjmowało wartości takie same jak w przypadku rumowiska drobnoziarnistego $d_{50} = 1,0$ mm, niezależnie od jego uziarnienia.

Wyniki pomiaru intensywności transportu rumowiska wleczonego w Odrze (Tabela 4) porównano z obliczeniami wykonanymi formułą MPM:

- w postaci stosowanej przez wielu autorów, w której występuje średnica ziarna d_m , wyrażenia Q_d/Q i K_s/K_r są równe 1,0, a bezwymiarowe naprężenie ścinające τ_* przyjmuje wartość stałą 0.047 (MPM-A),
- w modyfikacji Bartnika, który zastąpił średnicę d_m przez uziarnienie dla frakcji d_i i wprowadził zmienne naprężenia graniczne τ_* wg Wanga; parametry Q_d/Q i K_s/K_r są równe 1,0 (MPM-B),
- w modyfikacji Kasperka-Parzonki z rzeczywistymi dla Odry parametrami Q_d/Q i K_s/K_r mniejszymi od 1,0 (MPM-C).

Intensywność wleczenia obliczona za pomocą wzoru MPM-A i MPM-B jest znacznie wyższa od wyników pomiarów transportu rumowiska wlezonego wykonywanych w korycie Odry. Przyczyną tak wysokich różnic jest nieuwzględnienie oporów ruchu pochodzących od szorstkości form dennych, które występują w Odrze. Najbardziej zbliżone wyniki obliczeń transportu rumowiska wlezonego do pomierzonych uzyskano ze wzoru MPM-C, zawierającego rzeczywiste wartości parametru $K_s/K_r < 1.0$. Ze względu na dużą zmienność uziarnienia materiału dennego w przekroju pomiarowym Ścinawa, wielkości wleczenia w pionach hydrometrycznych przy zbliżonych głębokościach i średnich prędkościach wody różniły się niekiedy znacznie (Tabela 4).

Tabela 4. Pomierzona g_{pom} i obliczona g_{obl} intensywność transportu rumowiska wlezonego w Odrze, przekrój Ścinawa, km 332

Nr pionu	Przepływ wody (m^3/s)	Głębokość wody (m)	Prędkość wody (m/s)	g_{pom} (g/sm)	g_{obl} (g/sm)		
					MPM-A	MPM-B	MPM-C
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
I	304	3.80	0.75	77	650	360	86
II		4.00	1.10	236	720	430	103
III		4.20	1.20	323	790	485	116
IV		4.10	1.30	122	750	450	108
V		2.90	0.70	7	380	150	36
I	705	6.60	1.78	20	1840	1450	74
II		6.20	1.42	130	1640	1230	300
III		4.90	1.50	119	1060	720	327
IV		4.00	0.83	24	720	430	217
I	503	6.60	1.52	13	1840	1450	261
II		6.20	1.32	99	1640	1230	221
III		4.90	1.23	96	1060	720	129
I	100	2.10	0.60	230	190	28	17
II		2.05	0.59	56	180	23	14
III		2.20	0.63	18	210	39	23

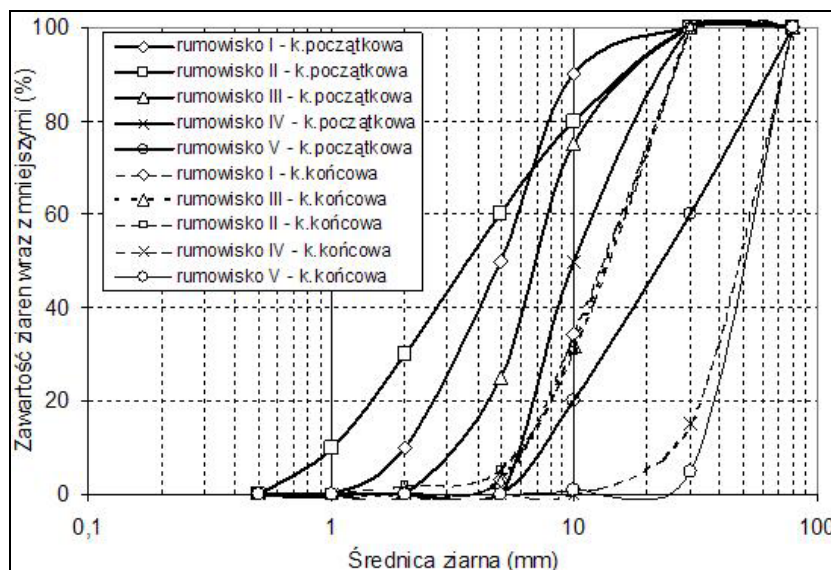
3. Prognozowanie obrukowania dna

Numeryczne modelowanie transportu rumowiska wlezonego na naprawianym odcinku Odry poniżej stopnia Malczyce (km 300) wiąże się z występującym tu problemem erozji liniowej. Ma tu miejsce stopniowa deformacja koryta rzeki, wynikająca z braku zasilania i deficytu transportowanego rumowiska dennego [1].

Ruch rumowiska decyduje o tempie i przebiegu zachodzących w korycie Odry zmian. Dlatego też ważne jest określenie miar transportu rumowiska. Ustalenie składu granulometrycznego, udziału poszczególnych form transportu rumowiska w całkowitym bilansie transportu, ustalenie intensywności i zmienności ruchu rumowiska oraz rocznych wskaźników transportu może posłużyć do opracowania założeń dla planowanej regulacji rzeki. Znajomość transportu rumowiska wlezonego jest szczególnie ważna dla rozważanej koncepcji sztucznego dokarmiania rzeki w rumowisko poniżej stopnia w Malczycach (podobnego do rozwiązania zastosowanego poniżej stopnia Iffezheim na Renie) [10, 11, 12]. Zastosowanie takiej metody pozwoliłoby na zatrzymanie postępu erozji bez konieczności budowy dalszych stopni wodnych.

Obliczenia intensywności transportu rumowiska wlezonego przeprowadzono na kilkukilometrowym odcinku Odry tj. od km 302 do km 309. Przekroje obliczeniowe wytypowano z uwzględnieniem kształtu koryta oraz ich położenia na trasie rzeki. Zmiany w dnie Odry określono za pomocą symulacji komputerowych granulacji materiału dennego i tworzenia się obrukowania dna. W tym celu zastosowano program TRANS. Do symulacji użyto 5 mieszanek rumowiska (I, II, III, IV i V) zawierających frakcje: 0.5-1.0 mm, 1.0-2.0 mm, 2.0-5.0 mm, 5.0-10.0 mm, 10.0-30.0 mm i 30.0-80.0 mm (Rysunek 3). Przy ustalaniu składu ziarnowego przyjętych rodzajów rumowiska kierowano się tym, aby określić uziarnienie materiału, który zastabilizuje dno rzeki poniżej stopnia Malczyce.

Obliczenia transportu rumowiska oraz prognozę zmian jego uziarnienia po przejściu fali o określonym natężeniu przepływu przeprowadzono przy kroku wzrostu napełnienia wody w przekroju pomiarowym, wynoszącym 20 cm. W czasie każdej symulacji, oprócz wcześniej wspomnianych parametrów określono również bezwymiarowe naprężenia ścinające τ_{*1} i τ_{*2} , odchylenie standardowe krzywej przesiewu σ , przeciętną średnicę ziarna d_{50} oraz wskaźnik wysortowania U i udział frakcji p (%) wchodzących w skład rumowiska. Podstawowe wyniki prognozy granulacji dozowanego rumowiska (kruszywa) I, II, III, IV i V oraz tworzenia się obrukowania w Odrze przedstawiono za pomocą zmiany charakterystycznych średnic d_{10} , d_{50} i d_{90} : po przejściu fali o natężeniu rzędu 900 m³/s (Tabela 5).



Rys.3. Symulowane krzywe uziarnienia dla materiału dennego Odry (krzywe początkowe-linie ciągłe) oraz dla pokrywy tworzącej obrukowanie po przejściu fali wezbraniowej (krzywe końcowe – linie przerywane)

Symulacje numeryczne dozowania rumowiska wielofrakcyjnego (Rysunek 3) w Odrze wykazały, że dla uziarnienia rzędu $d_{50}=4,0-7,5$ mm oraz natężenia fali $Q=900$ m³/s, na dnie koryta utworzy się warstwa obrukowania o wielkości ziarna ok. 26 mm. Natomiast materiał grubszy o przeciętnej średnicy $d_{50}=10$ mm i 25 mm podlega intensywnej segregacji, a wierzchnia warstwa denna charakteryzuje się uziarnieniem rzędu 73 mm.

Tabela 5

Wyniki prognozy granulacji rumowiska dozowanego i tworzenia się obrukowania dna w Odrze Środkowej

Rumowisko	Krzywa początkowa			Krzywa końcowa		
	d_{10p} (mm)	d_{50p} (mm)	d_{90p} (mm)	d_{10k} (mm)	d_{50k} (mm)	d_{90k} (mm)
I	2,0	5,0	10,0	6,5	15,0	26,0
II	1,0	4,0	17,0	6,5	15,0	26,0
III	3,5	7,5	17,0	6,5	15,0	26,0
IV	6,0	10,0	23,0	26,0	48,0	73,0
V	7,7	25,0	60,0	33,0	51,0	73,0

Wnioski

Badania autorów dotyczące oceny procesu degradacji koryta Odry Środkowej wykazały, że:

- proces tworzenia się brukowania dna uwidocznił się najbardziej na odcinku rzeki między Brzegiem Dolnym a Malczycami. W okresie 1958-1997 przeciętna średnica materiału dennego zwiększyła się z 1,09 mm do 14,9 mm. Naprężenia ścinające τ_c dla materiału dennego przed uruchomieniem stopnia Brzeg Dolny (1958 r.) były równe 0,34 Pa. Natomiast po 38 latach

funkcjonowania stopnia Brzeg Dolny, naprężenia τ_c pokrywy tworzącej obrukowanie dna rzeki wzrosły 40-krotnie, osiągając wartość 13,3 Pa. Po lipcowej powodzi w 1997 r. charakteryzującej się przepływami rzędu 3500 m³/s, nastąpiło zniszczenie opancerzenia dna i wymieszanie materiału dennego tworzącego pokrywę i podłoże,

- wartości parametru K_s/K_r we wzorze MPM dla koryta Środkowej Odry zmieniają się od 0,4 do 0,8 i są znacznie mniejsze od wartości 1,0, która jest przyjmowana przez większość autorów. Zarówno zmiana szerokości pasa wleczenia (która dla Odry waha się między 40 m a 60 m), jak i spadku zwierciadła wody wpływa nieznacznie na wielkość parametru K_s/K_r . Elementem mającym decydujący wpływ na zmiany tego parametru jest wielkość ziarna tworzącego dno. W miarę wzrostu średnicy cząstki wartości parametru K_s/K_r zbliża się do 1.0, wskutek czego opory ruchu pochodzące od szorstkości form dennych maleją i coraz większa część siły poruszającej τ_h bierze udział w transporcie rumowiska wleczonego,
- zaproponowana przez autorów modyfikacja polegająca na wprowadzeniu do wzoru MPM pomierzonych wartości parametru K_s/K_r , znacznie mniejszych od wartości 1.0, pozwala na uwzględnienie wpływu oporów ruchu w Odrze Środkowej pochodzących od szorstkości form dennych. Program TRANS z tą modyfikacją może być z powodzeniem wykorzystywany do określania natężenia transportu rumowiska wleczonego oraz oceny degradacji koryt rzecznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bartnik W., Parzonka W., Estimation of the influence of armouring layer on the hydrodynamic balance of rivers. Proceedings of the 9th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Cracow, Poland, 1997, 523-532.
- [2] Kasperek R., Rozprawa doktorska, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, 1999.
- [3] Kasperek R., Ocena tworzenia się obrukowania dna rzeki na przykładzie Środkowej Odry. Część I. Badania terenowe, Zeszyty Naukowe AR Wrocław, Inżynieria Środowiska XII, Nr 413, 215-237.
- [4] Kulczyk J., Winter J., Śródlądowy transport wodny, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [5] Parzonka W., Głowski R., Kasperek R., Paquier A., Ramez Ph., Analysis of flow resistance variation in rivers with sediment movement, Proceedings of the 10th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Wrocław, Poland, 2000, 511-521.
- [6] Parzonka W., Kasperek R., Głowski R., Ocena degradacji koryta właściwego Odry Środkowej i program działań naprawczych, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, PAN Oddział Kraków, 8/1, 2010, 59-68.
- [7] Parzonka W., Kosierb R., Assessment of riverbed erosion process of Middle Odra River on Malczyce-Ścinawa section, Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXXII, No. 1, 2010, 81-90.
- [8] Parzonka W., Głowski R., Kasperek R., Preliminary results of the test concerning the granulometric improvement of the Odra riverbed on the reach Malczyce-Ścinawa, Proceedings of the 15th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Wrocław, Poland, 2011, 213-222.
- [9] Parzonka W., Kasperek R., Channel processes in the Middle Odra in the period 1958-2010, Proceedings of the 15th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Wrocław, Poland, 2011, 379-387.
- [10] Schmidt A., Faulhaber P., Five years of artificial bed load feeding in the River Elbe, Conference on River Basin Management, Cardiff, 2001.
- [11] Söhngen B., Witte H. H., Kellermann J., Investigations concerning Danube River engineering works to improve navigation restricted by requirements of water resources, flood control and ecology, International Conference on European River Development, Budapest, Hungary, 1998, 377-384.
- [12] Zottl H., The Danube River east of Vienna. Stabilization of the riverbed, International Conference on European River Development, Budapest, Hungary, 1998, 385-392.