

Leszek Książek

MORFOLOGIA KORYTA RZEKI SKAWY W ZASIĘGU COFKI ZBIORNIKA ŚWINNA PORĘBA

Streszczenie

W pracy przedstawiono prognozę zmian morfologicznych na rzece Skawie w zasięgu cofki zbiornika Świnna Poręba (obecnie w trakcie realizacji). Podnoszenie się dna koryta ciek w wyniku odkładania rumowiska może mieć wpływ na poziom zwierciadła wody w czasie przejścia fali powodziowej i zwiększenia zagrożenia powodziowego terenów przyległych.

W latach 2003-2006 przeprowadzono pomiary geodezyjne odcinka rzeki Skawy, analizę składu granulometrycznego rumowiska, profile prędkości oraz pomiar poziomu zwierciadła wody w czasie przejścia fali powodziowej. Prognozę zmian morfologicznych przeprowadzono z wykorzystaniem dwuwymiarowego modelu CCHE2D opracowanym w Uniwersytecie Mississippi. Umożliwia on symulację zmian konfiguracji dna koryta ciek w wyniku transportu rumowiska.

Symulacje przeprowadzono dla historycznych fal powodziowych oraz przepływów o prawdopodobieństwie wystąpienia od $p = 50\%$ do $p = 0,1\%$ dla wybranych rzędnych piętrzenia zwierciadła wody w zbiorniku w zakresie od 304,56 m n.p.m. – brak efektu piętrzenia na badanym odcinku do 309,60 m n.p.m. – piętrzenie normalne. Przypadki obliczeniowe obejmowały również przepływy wody z rumowiskiem wleczonym i unoszonym. Zasięg cofki, a tym samym miejsce, gdzie może odkładać się rumowisko, w zależności od poziomu piętrzenia wody w zbiorniku będzie przesunęło się w pasie o długości 1,5 km w górę i dół ciek, a modelowanie numeryczne zmian morfologicznych wskazuje, że gospodarka wodna na zbiorniku powinna uwzględniać warunki zmian konfiguracji dna w rejonie cofki zbiornika.

Słowa kluczowe: fala powodziowa, konfiguracja dna, modelowanie numeryczne, warunki początku ruchu, zasięg cofki

WSTĘP

Budowa zapory wodnej powoduje przecięcie doliny rzecznej. Rumowisko unoszone zatrzymywać się będzie w całej czaszy zbiornika, zaś rumowisko wleczone w zasięgu cofki zbiornika. Materiał denny transportowany i odkładany w korycie rzeki w zasięgu cofki zbiornika będzie powodował podnoszenie się dna [Łajczak 1995], a tym samym podniesienie się zwierciadła wody. Może to wpłynąć na zwiększenie zagrożenia powodziowego na terenach przyległych. Problem zmian konfiguracji dotyczy w równym stopniu innych dopływów do zbiornika. Określenie przekrojów, gdzie depozycja materiału dennego może mieć miejsce ma znaczenie dla ekosystemu rzecznoego ze względu na możliwe odkładanie się związków chemicznych transportowanych w dół cieku.

W praktyce inżynierskiej nieodzowna jest znajomość warunków początku ruchu rumowiska wleczonego. Warunki początku ruchu można określić poprzez określenie parametrów granicznych, których przekroczenie powoduje wprowadzanie w ruch pojedynczych ziaren, a następnie masowy transport całej warstwy rumowiska. Parametrami pomocnymi do wyznaczenia warunków początku ruchu mogą być prędkość graniczna v_{gr} , napełnienie h_{gr} , spadek graniczny I_{gr} , graniczne naprężenia styczne (naprężenia graniczne) τ_{gr} lub τ_{cr} , czy siła wleczenia pojedynczych ziaren F_D [Michalik, Książek 2000]. Poprawne wyniki obliczeń intensywności transportu uzyskuje się, stosując naprężenia graniczne τ_{gr} jako kryterium początku ruchu rumowiska:

$$\tau_{gr} = f_m \cdot d_m \cdot \gamma_w \quad (1)$$

gdzie: d_m – średnica miarodajna rumowiska, f_m – bezwymiarowe naprężenia styczne, które zostały wyznaczone dla rzek podkarpackich w pomiarach radiozmacznikowych prowadzonych w Katedrze Inżynierii Wodnej. W przypadku, gdy naprężenia styczne $\tau_0 > \tau_{gr}$ warunki początku ruchu są przekroczone i należy spodziewać się transportu rumowiska wleczonego. W rejonie cofki zbiorników ze względu na spadek prędkości wody maleją naprężenia styczne, a tym samym siły poruszające i utrzymujące w ruchu rumowisko. Miejsce odkładania się rumowiska wleczonego transportowanego w fali wezbrania może przesuwać się w górę i dół rzeki w zależności od poziomu piętrzenia wody na zbiorniku.

Model matematyczny obiektu fizycznego, np. odcinka rzeki, jest to abstrakcja matematyczna wiążąca z sobą zmienne charakteryzujące

stan obiektu (warunki początkowe), oddziaływanie zewnętrzne na obiekt (warunki brzegowe) i jego reakcję na to oddziaływanie. Modele matematyczne stanowią zawsze uproszczenie w stosunku do obiektów rzeczywistych. W praktyce model jest kompromisem pomiędzy kosztem uzyskania rozwiązania i pozyskania wystarczającej ilości parametrów charakteryzujących obiekt, a dokładnością wyniku. W przypadku przepływów wody w rzekach zadowalające rezultaty uzyskuje się stosując modele dwuwymiarowe.

OBSZAR BADAŃ

Badaniami został objęty obszar odcinka rzeki Skawy w zasięgu cofki zbiornika Świnna Poręba, położony w gminie Zembrzyce (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka obszaru badawczego
Table 1. Physical characteristics of site

Opis Parameter	Rzeka Skawa The Skawa River	Odcinek badawczy Research reach
Opad [mm]	850	850
Powierzchnia zlewni [km ²]	1177,70	618,4+79,55
Długość rzeki / Kilometraż [km]	97,77	37,1
Spadek zlewni	0,005	0,0041

Zlewnia Skawy graniczy od zachodu ze zlewnią Soły, od wschodu ze zlewnią rzeki Raby, a od południa ze zlewnią Orawy, należącej do dorzecza Dunaju. Ponadto, wododział rzeki Skawy częściowo stanowi granice państwa ze Słowacją. Skawa wypływa kilkoma potokami poniżej Przełęczy Spytkowickiej, na wysokości około 680 m n.p.m. w Beskidzie Żywieckim. Skawa ma ujście w Dolinie Górnej Wisły, na wysokości 225 m n.p.m. powyżej wsi Smolice. Średni spadek doliny w górnym biegu 7,2‰, natomiast w dolnym 2,2‰, średni spadek rzeki to 5‰.

Lasy stanowią 48,9% całkowitej powierzchni zlewni i wartość ta znacznie przewyższa średni wskaźnik lesistości dla terenów Polski, który wynosi ok. 28% i Europy równej 32%.

Rzeka Skawa jest prawym dopływem Wisły, jej długość wynosi 97,77 km [Czarnecka 2005]. Do Skawy uchodzą dopływy o powierzchni zlewni większej od 50 km²: Bystrzanka – kilometr ujścia do Skawy 61+030, długość cieką 16,01 km, pow. zlewni 79,45 km², Skawica

(górny bieg Jałowiec) – odpowiednio 50+970, 24,57 km, 148,88 km², Stryszawka – 41+800, 17,45 km, 140,60 km², Paleczka 36+920, 14,58 km, 79,55 km², Kleczanka – 18+640, 20,14 km, 67,14 km², Wieprzówka – 7+880, 29,36 km, 151,94 km².

W tabeli 2 zestawiono podstawowe informacje dotyczące zbiornika Świnna Poręba. Będzie to zaporą ziemną z rdzeniem iłowym o wymiarach 50×620 m usytuowaną w km 26+840 biegu rzeki Skawy. Do przyszłej czaszy zbiornika wpływają potoki Paleczka, Tarnawka, Dąbrówka, Śleszówka, Stryszówka, Dopływ z Łękawicy, Jaszczurówka oraz Bystrz. Powierzchnie zlewni ww. potoków wynoszą od 3,25 km² do 22,21 km² (oprócz Paleczki). Przepływy o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia zestawiono w tabeli 3.

Tabela 2. Charakterystyka zbiornika wodnego Świnna Poręba
Table 2. The Świnna Poręba water reservoir characteristics

Opis / Parameter	Wartość / Value
Powierzchnia zlewni do przekroju zapory [km ²]	794,74
Powierzchnia zalewu – max / normalna / min. [km ²]	10,35 / 8,2 / 0,24
Pojemność zbiornika – całkowita / martwa [mln m ³]	161 / 15
Rzędna piętrzenia – max / min. [m n.p.m.]	312,00 / 288,50
Piętrzenie normalne [m n.p.m.]	309,60
Przepływ p = 1% / śr. roczny / min. obserwowany [m ³ s ⁻¹]	1150 / 11,5 / 0,77
Przepływ biologiczny / upust zapory [m ³ s ⁻¹]	ok. 6 / 2168

Tabela 3. Przepływy prawdopodobne, rzeka Skawa, Zembrzyce, km 37+00
Table 3. The probability flows for Skawa River, Zembrzyce, km 37+00

P [%]	0,01	0.1	1	5	10	20	50
Q [m ³ /s]	1005	758	548	370	288	205	113

Podstawowymi zadaniami zbiornika to ochrona powodziowa doliny rzeki, możliwość redukcji kulminacji fali powodziowej w przekroju Kraków o około 0,5 m [Hennig 1995] oraz stworzenie warunków dla ożywienia gospodarczego regionu.

POMIARY TERENOWE I ICH ANALIZA

W latach 2003–2006 przeprowadzono pomiary terenowe, które obejmowały pomiary geodezyjne odcinka rzeki Skawy wraz z jej dopływem potokiem Paleczką, analizę składu granulometrycznego

rumowiska metodą tradycyjną i zamrażania próby, profile prędkości oraz pomiar poziomu zwierciadła wody w czasie przejścia fali powodziowej.

Pomiary geodezyjne wykonywano po przejściu wezbrania. W tabeli 4 zestawiono wybrane wezbrania na rzece Skawie oraz daty pomiarów. Wartości przepływów zostały transponowane do przekroju Zembrzyce 37+00 z wodowskazu Wadowice.

Tabela 4. Wybrane wezbrania na rzece Skawie
Table 4. Selected floods events on the Skawa River

Wezbranie	Pomiary		Przepływ Q [m ³ s ⁻¹]
	Geodezyjne wrz. 2003	Zw. wody	
		28.07.2004	23,70
29-30.07.2004		29.07.2004	52,58 (87,40)
19.03.2005			172,26
	paź. 2005	10.10.2005	2,39
30.03.2006		29-30.03.2006	223,81
	maj 2006*	05.05.2006	3,81

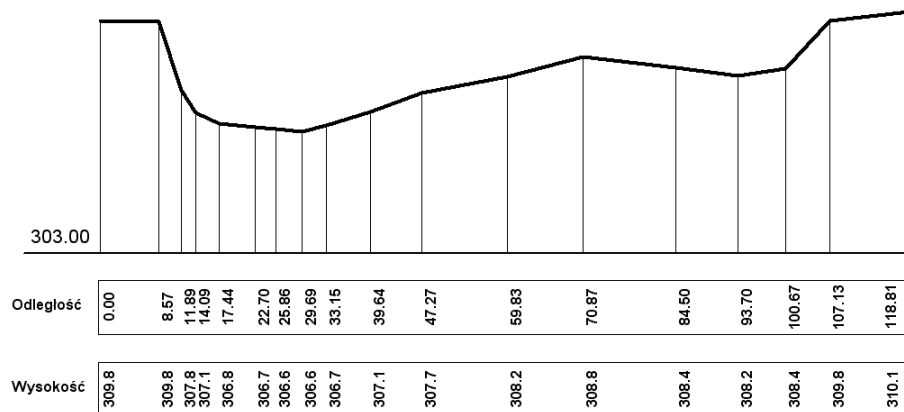
*wybrane przekroje

Wykonano 31 przekrojów poprzecznych na długości 1,9 km w roku 2003, 45 przekrojów na Skawie i 3 na Paleczce w roku 2005 oraz wybrane przekroje w 2006. Odległości pomiędzy przekrojami poprzecznymi wynosiły od 12 do 75 m.

Repery, które dowiązano do układu państwowego pozwoliły na porównanie zmian konfiguracji terenu w kolejnych latach. W czasie przejścia fal powodziowychznaczono maksymalny poziom zwierciadła wody, uzyskując zasięg powodzi historycznych.

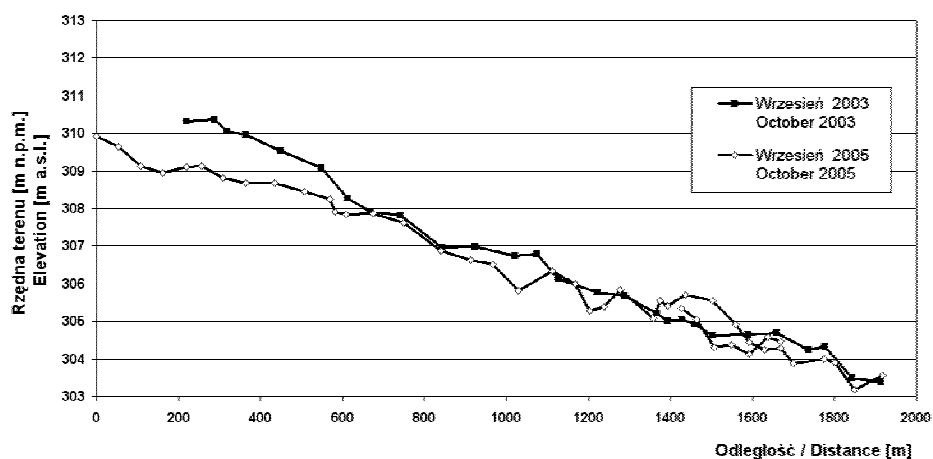
Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przekrój poprzeczny rzeki Skawy, km 37+240, poniżej mostu drogowego. Lewy brzeg jest stromy, brak jest pokrywy roślinnej, widoczne są obsypujące się kamienie i fragmenty darni. Prawy brzeg jest łagodnie nachylony, porośnięty trawą i roślinnością sztywną. W środku koryta widoczna jest łacha.

Spadek wyrównany dna w roku 2003 na badanym odcinku rzeki Skawy wynosił 4,1 ‰ [Bartnik i in. 2005]. Lokalnie występowały spadki w granicach od 2,9 do 9,9 ‰ oraz spadki ujemne. Zaobserwowano tworzenie się sekwencji spadków maksymalnych, minimalnych oraz spadku ujemnego, które tworzyły układ bystrze-płoso. W roku



Rysunek 1. Przykład przekroju poprzecznego, rzeka Skawa 37+240, maj 2006
Figure 1. An example of cross-section, the Skawa River 37+240, may 2006

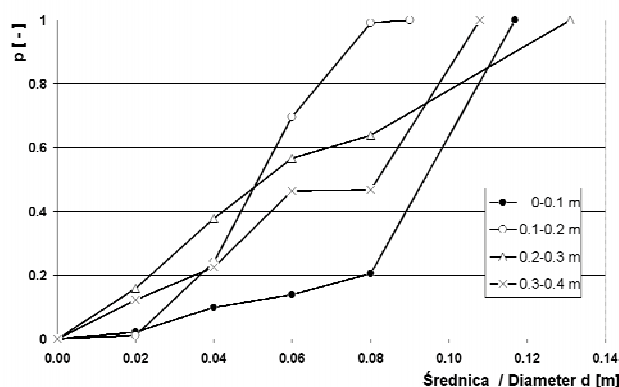
2005 wyrównany spadek na badanym odcinku wynosił 3,3 ‰. Zmianę spadku na badanym odcinku należy tłumaczyć zmianą konfiguracji dna w górnej części badanego odcinka (rys. 2) – powyżej mostu drogowego, gdzie wykonano przesunięcie łach na zakolach oraz niwelacją przegłębień, które towarzyszyły pracom przy umacnianiu brzegów. Zmiany konfiguracji dna wywołane przejściem fali wezbrania zaobserwowano w środkowej części odcinka, powyżej ujścia Paleczki, gdzie dno uległo obniżeniu w wyniku przesunięcia koryta głównego w lewą stronę doliny rzecznej. Sekwencje bystrze-płoso nie są wyraźnie wykształcone.



Rysunek 2. Profil podłużny odcinka rzeki Skawy
Figure 2. Longitudinal profile of a section of the Skawa River

Próby rumowiska były pobierane dwoma metodami: metodą tradycyjną – materiał był pobierany z powierzchni 1 m² i przesiewany na zestawie sit oraz metodą zamrażania próby, która pozwala na uzyskanie próby o nienaruszonej strukturze w układzie warstwowym.

Średnice miarodajne rumowiska d_m na badanym odcinku przyjmowały wartości od $d_m = 0,053$ m do $d_m = 0,078$ m. Odpowiadające im odchylenie standardowe krzywej przesiewu δ miały wartości $\delta = 2,75$ i $\delta = 3,03$ (minimalnie $\delta = 1,93$, $d_m = 0,064$ m). Na rysunku 3 zamieszczono krzywe przesiewu dla 10-centymetrowych warstw rumowiska. Przebieg krzywych przesiewu dla warstwy powierzchniowej 0–0,1 m oraz warstwy znajdujących się bezpośrednio pod nią wskazują na zróżnicowany skład materiału dennego. Warstwa powierzchniowa odznacza się grubszy rumowiskiem niż warstwy zalegające niżej. Wskazywać to może na obrukowanie dna w miejscu poboru próby.

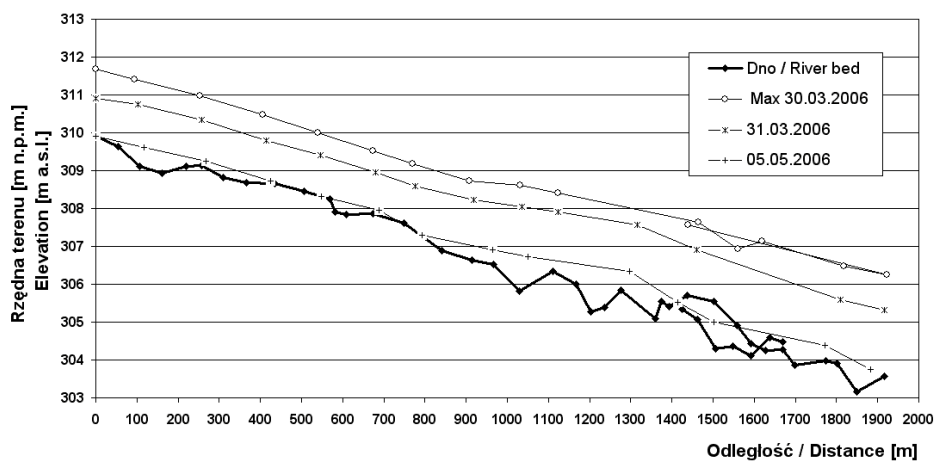


Rysunek 3. Warstwowe krzywe przesiewu, rzeka Skawa, próba 2
Figure 3. Layered grain size distribution, the Skawa River, probe 2

Analiza kształtu pojedynczych 1055 ziaren wskazuje na przewagę ziaren płaskich – ziarna kuliste stanowią tylko 3% całej próby [Bartnik i in 2004]. Wartość średnia współczynnika kształtu wynosi 0,38, co potwierdza, że na badanym odcinku Skawy przeważają ziarna płaskie. Ma to wpływ na warunki początku ruchu, które zależą zarówno od wielkości ziarna, jak i jego kształtu.

Maksymalny poziom zwierciadła wody w czasie przejścia wezbrania w dniu 30 marca 2006 przedstawiono na rysunku 4. Wyrównany spadek zwierciadła wody w czasie kulminacji wynosił 2,81‰, w czasie opadania fali 2,88 ‰, natomiast po przejściu wezbrania

3,12‰ (tab. 5) i wykazywał tendencję do zbliżania się do spadku doliny 3,3‰ po wykonaniu robót regulacyjnych. W roku 2004 wyrównany spadek zwierciadła wody, wraz ze wzrostem przepływu zbliżał się do spadku 4,1‰. W całym okresie badawczym wraz ze wzrostem przepływu spadek zwierciadła wody maleje. Od roku 2005 zauważalna jest natomiast tendencja zmniejszania się spadku zwierciadła wody w porównaniu ze spadkiem doliny. Spowodowane to może być zmianą przebiegu koryta głównego oraz akumulacją rumowiska wleczonego w rejonie ujścia Paleczki.

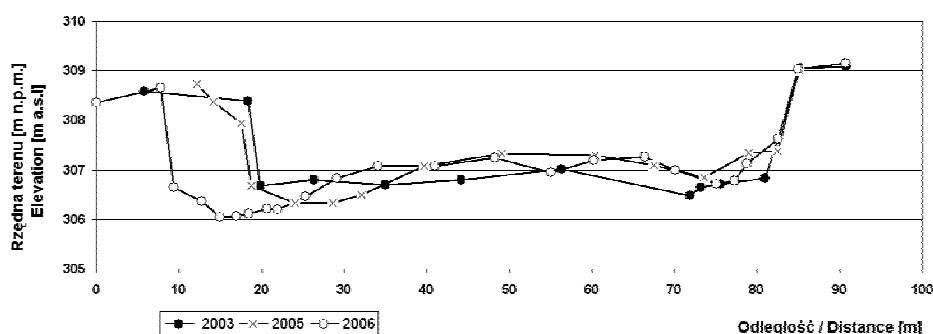


Rysunek 4. Poziom zwierciadła wody na badanym odcinku rzeki Skawy
Figure 4. Measured water surface level on a section of the Skawa River

Tabela 5. Wyrównany spadek zwierciadła wody, rzeka Skawa
Table 5. Levelled slope of the water surface level, Skawa River

Data wezbrania	Data	Q [m ³ s ⁻¹]	I [‰]
28.07.2004		23,7	4,91
29.07.2004		52,58	4,26
	10.10.2005	2,39	3,33
30.03.2006		223,81	2,81
31.03.2006		117,8	2,88
	05.05.2006	3,81	3,12

Rysunek 5 przedstawia zmiany kształtu przekroju poprzecznego rzeki Skawy 120 m powyżej ujścia potoku Paleczka w latach 2003–2006. Wezbrania, które wystąpiły w okresie badawczym wyerodowały lewy brzeg oraz przesunęły nurt główny. Zmianie uległ poziom dna, który w lewej części przekroju 37+050 obniżył się o ok. 0,8 m, natomiast w prawej części nastąpiło nadbudowanie łąchy – poziom dna podniósł się ok. 0,2–0,4 m.



Rysunek 5. Zmiana przekroju poprzecznego rzeki Skawy, km 37+050
Figure 5. Changes of the cross-section of the Skawa River, km 37+050

WYNIKI MODELOWANIA NUMERYCZNEGO

Prognozę zmian morfologicznych przeprowadzono z wykorzystaniem modelu CCHE2D opracowanym na Uniwersytecie Mississippi. Model CCHE2D umożliwiając wykonanie obliczeń w warunkach przepływu ustalonego lub nieustalonego oraz obliczeń transportu rumowiska wlezonego i unoszonego. Model ten umożliwia również określenie zmian konfiguracji dna w wyniku odkładania się materiału unoszonego i/lub wlezonego.

Model CCHE2D jest modelem dwuwymiarowym typu 2DH. W modelach tego typu następuje uśrednienie wielkości hydraulicznych na głębokości.

Naprężenia styczne na dnie obliczane są przy zastosowaniu turbulentnego współczynnika lepkości ν_t . Współczynnik ten może być określany w równaniu zachowania pędu za pomocą trzech metod: uśrednionej głębokości, drogi mieszania lub k-c model. Przy określaniu prędkości dynamicznej możliwe są dwie procedury. Pierwsza

to zastosowanie uśrednionej głębokości na podstawie krzywej logarytmicznej, druga zaś wykorzystuje współczynnik Manninga n . Wykorzystanie współczynnika n pozwala uwzględniać w obliczeniach wpływ form dennych, występowanie roślinności, geometrię kanału oraz wielkość materiału dennego, łącząc to w jeden współczynnik. Istotne jest również to, że współczynnik Manninga n w czasie obliczeń zmian konfiguracji dna uwzględniał nie tylko skład granulometryczny rumowiska, ale i ich zmianę w czasie [Bartnik i in. 2001].

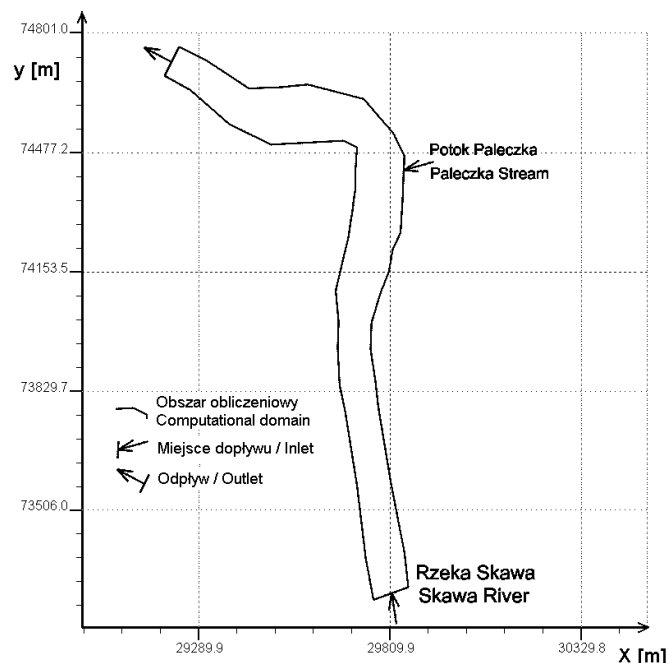
Model CCHE2D wykorzystuje równanie zachowania pędu. Składowa pionowa prędkości z może być pomijana, ponieważ większość przepływów w kanałach otwartych jest przepływami ze stosunkowo niewielką głębokością, dlatego też dokładność modelu dwuwymiarowego może być zaakceptowana w hydraulice koryt otwartych [Jia, Wang 2001]. Poziom zwierciadła wody jest obliczany z równania ciągłości, które jest szeroko stosowane w modelach dwuwymiarowych. Do rozwiązywania równań używa metody elementów skończonych.

W czasie symulacji model CCHE2D uwzględnia transport materiału dennego spowodowany ruchem spiralnym wody oraz zmianę warunków krytycznych początku ruchu wywołanych zmianą nachylenia dna koryta.

W modelu CCHE2D obliczenia transportu rumowiska oparte są na formule Van Rija, w której naprężenia krytyczne są liczone na podstawie wzoru Yalina. Na rzekach górskich obliczanie transportu rumowiska można oprzeć na module SETRA [Wu 2001], w którym występują równania: Laursen'a w zakresie średnic rumowiska od 0,01–0,15 m, Yang'a w zakresie od 0,15–0,2 mm oraz MPM w zakresie od 2–50 mm.

Obliczenia parametrów przepływu wykonywane są przez model w węzłach siatki, której wymiary powinny uwzględniać rodzaj modelowanego zjawiska. Możliwa jest zmiana gęstości oraz kształtu elementów siatki poprzez odpowiednie rozmieszczenie węzłów brzegowych, wybór procedury zagęszczania i wygładzania siatki.

Na rysunku 6 przedstawiono obszar obliczeniowy odcinka rzeki Skawy. Siatka obliczeniowa składa się z 20×500 węzłów. Odległości pomiędzy pojedynczymi węzłami siatki obliczeniowej wynoszą od 4,8 m do 6,5 m, prostopadle do kierunku przepływu i ok. 4 m, wzdłuż osi rzeki. Symulacje przejścia fal wezbrania przeprowadzono dla ustalonych warunków przepływu.

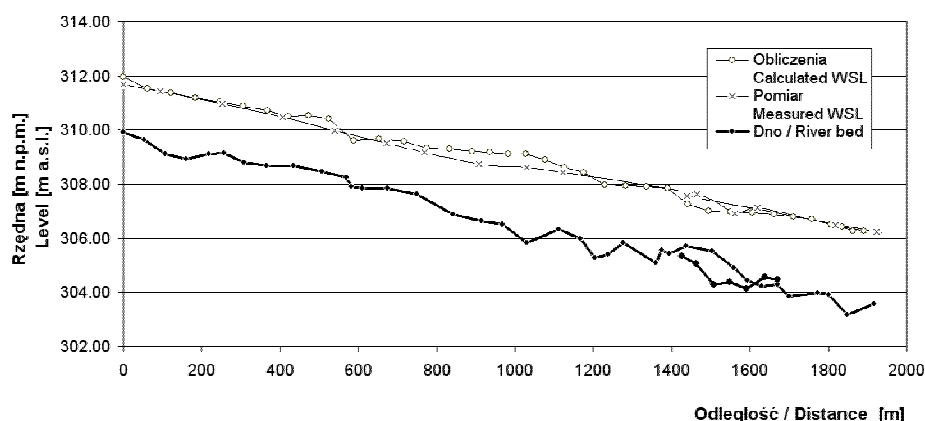


Rysunek 6. Obszar obliczeniowy, odcinek rzeki Skawy
Figure 6. The computational domain, the research reach of the Skawa River

Kroki obliczeniowe uwzględniały przepływy $Q = 35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_{50\%}$, $Q_{20\%}$ oraz $Q_{10\%}$ bez uwzględniania efektu piętrzenia wody na zbiorniku oraz z efektem piętrzenia do rzędnej 304,56, 306,50, 307,80 i 309,60 m n.p.m. Odtworzono przebieg fal historycznych: Skawa $Q_S = 232 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, Paleczka $Q_P = 50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, oraz odpowiednio $Q_S = 162 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_P = 36 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_S = 118 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_P = 23,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_S = 2,39 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_P = 0,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Na rysunku 7 porównano pomierzony i obliczony poziom zwierciadła wody dla przepływu $Q = 232 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, który zaobserwowano 30 marca 2006 r. Na znacznym odcinku rzeki uzyskano zgodność obliczonego poziomu zwierciadła wody ze zwierciadłem pomierzonym w czasie fali wezbrania. Zauważalna różnica poziomów wody, która wynosi maksymalnie około 0,4 m, występuje powyżej ujścia potoku Paleczka oraz w rejonie stabilnej łachy, tworzącej wyspę, poniżej ujścia Paleczki. Powstałe różnice można tłumaczyć zmianami morfologicznymi dna. W rejonie ujścia Paleczki stwierdzono przesunięcie linii brzegowej i nurtu głównego oraz obniżenie się dna w wyniku transportu materiału dennego. Skutkowało to tym, że pomierzony

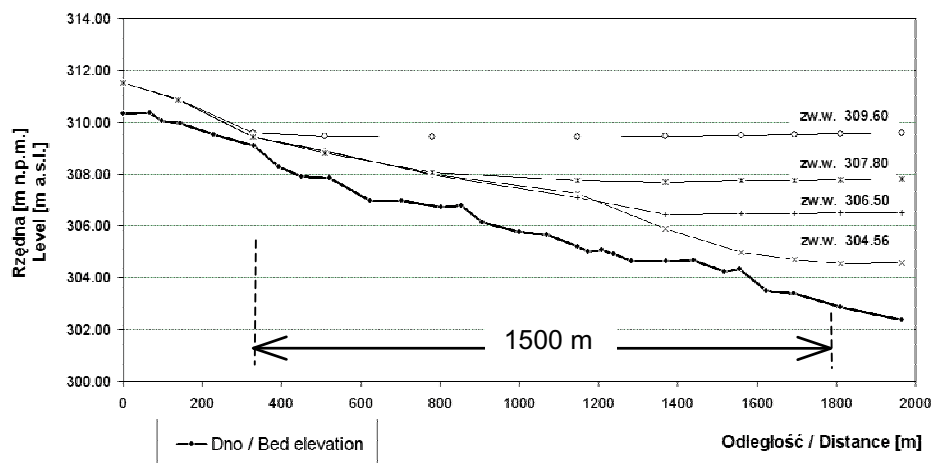
poziom zwierciadła wody jest niższy niż symulowany. Inny przebieg procesów morfologicznych miał miejsce poniżej ujścia Paleczki, gdzie stwierdzono odkładanie się materiału wlezonego. W tym przypadku pomierzony poziom zwierciadła wody jest wyższy niż obliczony.



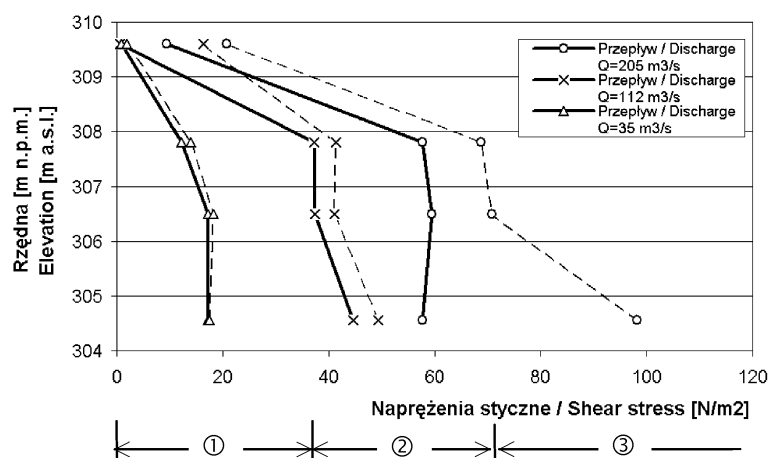
Rysunek 7. Pomierzony i obliczony poziom zwierciadła wody, $Q = 232 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$,
Figure 7. Measured and simulated water surface levels (WSL), $Q = 232 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Rysunek 8 przedstawia obliczone poziomy zwierciadła wody przy różnym poziomie piętrzenia wody na zbiorniku Świnna Poręba. W zależności od poziomu piętrzenia wody na zbiorniku zasięg cofki będzie przesuwiał się w górę i dół rzeki. Przy zmianie rzędnej piętrzenia wody na zbiorniku Świnna Poręba w zakresie od 304,56 do 309,60 m n.p.m., przy przepływie $Q = 35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ zmiana zasięgu cofki zauważalna jest na odcinku około 1,5 km.

Rysunek 9 przedstawia zmianę naprężeń stycznych w przekroju 37+050 w zależności od poziomu piętrzenia wody na zbiorniku dla różnych przepływów wody. Linie ciągłe obrazują zmianę τ_0 dla wybranego punktu przekroju, linie przerywane wartości maksymalne w przekroju. Naprężenia krytyczne na badanym odcinku wynoszą $\tau_{gr} = 37 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ($d_m = 0,078 \text{ m}$), na odcinkach, gdzie występuje obrukowanie dna naprężenia krytyczne mają wartość $\tau_{gr} = 70 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ($d_m = 0,14 \text{ m}$). Wartości te wyznaczają granice pomiędzy obszarami: 1 – brak transportu, 2 – ruch pojedynczych ziaren, 3 – masowy transport rumowiska. Przy braku piętrzenia wody – rzędna 304,56 m n.p.m., w wybranym przekroju, warunki krytyczne ruchu dla przepływu $Q = 205 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$



Rysunek 8. Zasięg cofki zbiornika Świnna Poręba dla przepływu $Q = 35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i różnych poziomów piętrzenia wody
Figure 8. Back-water reach of the Świnna Poręba for a discharge $Q = 35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and different reservoir water levels

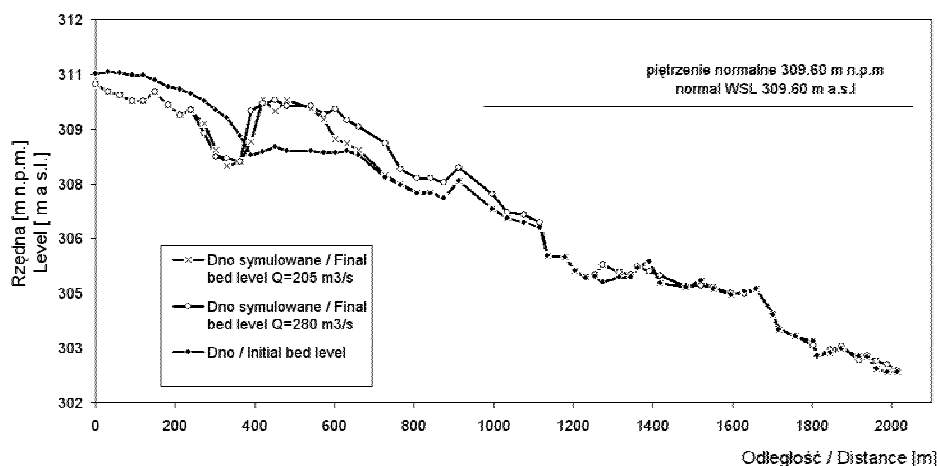


Rysunek 9. Zależność naprężeń stycznych od poziomu piętrzenia wody
Figure 9. Relationship between shear stress and reservoir water surface level

są przekroczone i może wystąpić masowy transport rumowiska. Możliwość transportowania rumowiska zanika całkowicie w przypadku piętrzenia normalnego 309,60 m n.p.m. Przy przepływie $Q = 112 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

przy braku piętrzenia możliwy jest ruch pojedynczych ziaren, który zanika w przekroju 37+050 już przy piętrzeniu 306,50 m n.p.m. Przepływ $Q = 35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nie wywołuje transportu rumowiska wleczanego.

Na rysunku 10 przedstawiono poziomy dna: pomierzony i symulowane dla przepływu $Q = 205 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ oraz $Q = 280 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, w warunkach piętrzenia normalnego wody na zbiorniku. W wyniku transportu rumowiska dno Skawy na odcinku powyżej mostu uległo obniżeniu. Wyerodowany materiał będzie transportowany w dół cieku. W miejscu, gdzie widoczny jest zasięg cofki, ruch rumowiska ulega zahamowaniu. Stwarza to warunki do odkładania się rumowiska, które akumuluje, powodując podnoszenie się dna. Akumulacja rumowiska w przypadku przepływu $Q = 280 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ jest widoczna na odcinku dwukrotnie dłuższym, niż w przypadku przepływu $Q = 205 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i wynosi około 700 m. W końcowej części odcinka badawczego nie stwierdzono zasadniczych zmian poziomu dna.

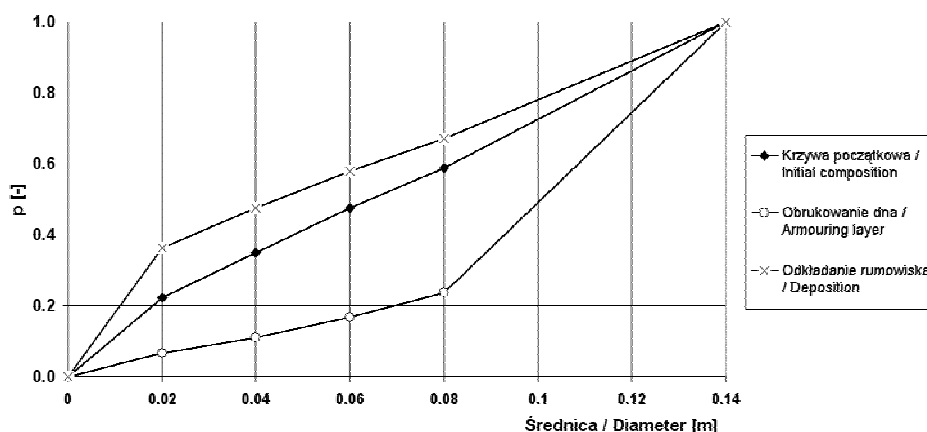


Rysunek 10. Pomierzony i obliczony poziom dna, piętrzenie normalne
Figure 10. Measured and simulated bed elevations, normal water surface level (WSL)

Symulacje wskazują na intensywny transport materiału wleczanego przy przepływie $Q = 280 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Potwierdzeniem są zmiany średnicy d_{50} na długości badanego odcinka oraz np.: zawartość procentowa frakcji $d_i > 0,08 \text{ m}$. Powyżej mostu, średnica charakterystyczna rumowiska d_{50} zmienia się z wartości $d_{50} = 0,062 \text{ m}$ do około $d_{50} = 0,10 \text{ m}$,

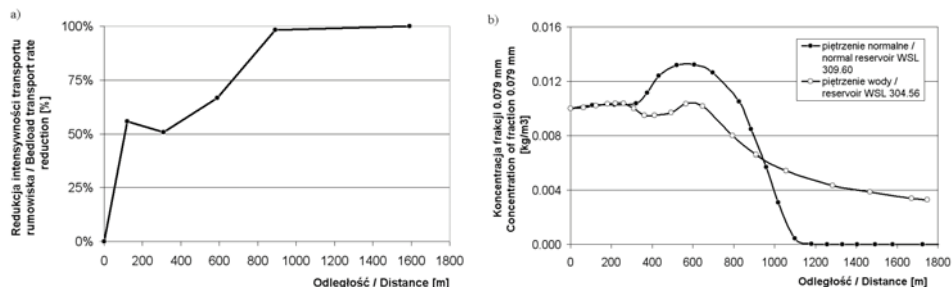
a zawartość procentowa frakcji najgrubszych ulega zwiększeniu z $p_i = 40\%$ do $p_i = 75\%$. W miejscu odkładania rumowiska (rejon cofki zbiornika) maleje zarówno zawartość procentowa najgrubszej frakcji jak i średnica d_{50} , które wynoszą odpowiednio około $p_i = 20\%$, $d_{50} = 0,04$ m [Bartnik i in. 2005].

W przekrojach z występującą erozją lub przewagą akumulacji następują zmiany składu granulometrycznego rumowiska, co obrazują krzywe przesiewu na rysunku 11. W rejonie mostu w wyniku działania strumienia wody drobne frakcje będą wymywane, co doprowadzi do wytworzenia się obrukowania dna. W rejonie cofki zbiornika transportowane rumowisko będzie odkładane, co spowoduje wzrost drobnych frakcji w próbie rumowiska (krzywa oznaczona krzyżykami).



Rysunek 11. Pomierzone i obliczone krzywe przesiewu
Figure 11. Measured and calculated grain size distributions

Na rysunku 12a przedstawiono redukcję intensywności transportu rumowiska wleczonego na badanym odcinku rzeki Skawy, spowodowaną piętrzeniem wody na zbiorniku do poziomu normalnego. W rejonie cofki zbiornika następuje całkowite zatrzymanie rumowiska wleczonego. Zdolność zatrzymywania rumowiska unoszonego do zbiornika obrazuje rysunek 12b. Stwierdzono spadek koncentracji w przypadku frakcji 0,079 mm po dotarciu w rejon cofki zbiornika do wartości bliskich zero. Frakcje drobniejsze będą ulegały sedimentacji w całej czaszy zbiornika.



Rysunek 12. Zdolność zatrzymywania rumowiska przez zbiornik wodny przy przepływie $Q = 205 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a) redukcja intensywności transportu rumowiska wleczonego b) spadek koncentracji rumowiska unoszonego – frakcja 0,079 mm

Figure 12. The water reservoir ability to retain the bed material for discharge $Q = 205 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a) reduction of the bedload transport intensity b) concentration of suspended material decrease – fraction 0.079 mm

Proces obrukowania dna został symulowany z wykorzystaniem procedury ARMOUR. Wytworzenie się obrukowania dna nastąpi przy napełnieniu około $h = 2,5 \text{ m}$, co odpowiada naprężeniom wynoszącym $\tau_0 = 81 \text{ [Nm}^{-2}\text{]}$. Przy napełnieniu większym od $h = 2,75 \text{ m}$ nastąpi zerwanie warstwy tworzącej obrukowanie i masowy transport rumowiska. Wartości średnic d_{50} warstwy tworzącej obrukowanie uzyskane z wykorzystaniem modelu CCHE2D i procedury ARMOUR wynoszą odpowiednio $0,101 \text{ m}$ i $0,104 \text{ m}$. Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność przeprowadzonych obliczeń.

WNIOSKI

Obliczenia przeprowadzono dla odcinka rzeki Skawy, na którym spadki lokalne wynoszą od 1‰ do 7‰ . Spadek wyrównany zmniejszył się w wyniku dokonanych zmian w korycie z $4,1\text{‰}$ do $3,3\text{‰}$. Wartości średnicy miarodajnej d_m na badanym odcinku mają wartości od $0,05 \text{ m}$ do $0,093 \text{ m}$. Wartość średniego współczynnika kształtu ziaren na badanym odcinku wynosi $S_f = 0,38$ świadczy, że ziarna na badanym odcinku są płaskie.

Na podstawie symulacji stwierdzono, że:

1. Spadek zwierciadła wody w czasie przejścia fali powodziowej dąży do spadku całej doliny na badanym odcinku.

2. Na znacznym odcinku rzeki uzyskano zgodność obliczonego poziomu zwierciadła wody ze zwierciadłem pomierzonym w czasie fali wezbrania. Zauważalne różnice poziomów wody można tłumaczyć zmianami morfologicznymi dna, które obniżyło się o około 0,8 m.

3. Zasięg cofki, a tym samym miejsce, gdzie może odkładać się rumowisko, przy zmianie poziomu piętrzenia wody w zbiorniku będzie przesuwano się w pasie o długości około 1,5 km w górę i dół cieku przy zmianie piętrzenia wody na zbiorniku Świnna Poręba o 5 m.

4. Symulacje wskazują na intensywny transport materiału wleczanego przy przepływie $Q = 280 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Zdolność transportowania rzeki zanika całkowicie w przypadku piętrzenia normalnego 309,60 m n.p.m, i przepływie $Q = 112 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

5. Przy przepływie $Q_{20\%} = 205 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ stwierdzono obniżenie się poziomu dna w wyniku wymywania drobnych ziaren powyżej mostu: w tym przypadku średnica d_{50} zwiększyła się o ok. 0,035 m. Obecność zbiornika silnie wpływa na warunki początku ruchu rumowiska. Zmniejszenie prędkości przepływu wody powoduje odkładanie się transportowanego w fali wezbrania rumowiska wleczanego. Zjawisko to zaobserwowano powyżej ujścia potoku Paleczka, gdzie stwierdzono zarówno podnoszenie się dna, jak i zmianę składu granulometrycznego rumowiska: d_{50} zmniejszyło się o 0,02 m.

6. Intensywność transportu rumowiska wleczanego zanika w rejonie cofki zbiornika Świnna Poręba przy przepływie $Q = 205 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. W przypadku rumowiska unoszonego w rejonie cofki zbiornika odkładane będą tylko wybrane frakcje. W przypadku frakcji $d_i = 0,079 \text{ mm}$ symulacje wskazują, że koncentracja w rejonie cofki zbiornika spada do wartości bliskiej zero.

7. Wartości średnic d_{50} warstwy tworzącej obrukowanie uzyskane z wykorzystaniem modelu CCHE2D i procedury ARMOUR mają podobne wartości, które wynoszą około 0,10 m.

Prezentowana praca jest kontynuacją projektu finansowanego przez US State Department Agency for International Development (US_AID) under Agreement No. EE-G-00-02-00015-00 oraz The University of Mississippi, National Center for Computational Hydroscience and Engineering (NCHE).

BIBLIOGRAFIA

- Bartnik W., Banasik K., Książek L., Radecki-Pawlik A., Strużyński A. *Forecasting of Fluvial Processes on the Skawa River Within Back-Water Reach of the Świnna Poręba Water Reservoir*. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., Warszawa 2005, E-5 (387), p. 57–85.
- Bartnik W., Florek J., Książek L., Strużyński A. *Zmiana szorstkości dynamicznej w czasie fali powodziowej w rzekach i potokach górskich*. Zesz. Nauk AR w Krakowie 2001, nr 21, 129–138.
- Bartnik W., Książek L., Michalik A., Radecki-Pawlik A., Strużyński A. *Modeling of fluvial processes along a reach of the Skawa River using CCHE2D model*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu 2004, nr 481, s. 155–165.
- Hennig J. *Koncepcja techniczna poprawy zabezpieczenia Krakowa przed powodzią, Zagrożenie powodziowe miasta Krakowa*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Warszawa 1995, z. 10, s. 43–54.
- Czarnecka H., pra. zbior. *Atlas podziału hydrograficznego Polski*. Zakład Hydrografii i Morfologii Koryt Rzecznych IMGW, Warszawa 2005, t. I i II.
- Jia Y., Wang S.S.Y. *CHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model For Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed*, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1, 2001, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, USA.
- Łajczak A. *Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Warszawa 1995, z. 8.
- Michalik A., Książek L., 2000, *Drag force on individual particles on turbulent flow conditions*, 10th Inter. Conf. on „Transport and sedimentation of solid particles”, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 382, s. 205–215.
- Wu W. *CCHE2D Sediment Transport Model*. Technical Report No NCCHE-TR-2001-3, 2001, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, USA.

Dr inż. Leszek Książek
Katedra Inżynierii Wodnej
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
Akademia Rolnicza w Krakowie

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

THE MORPHOLOGY OF THE SKAWA RIVER BED WITHIN BACK-WATER REACH OF ŚWINNA PORĘBA WATER RESERVOIR

SUMMARY

The aim of the paper is to predict a morphological changes of the riverbed on a section of the Skawa River within back-water reach of Świnna Poręba water reservoir. The increasing bed level which is a result of deposition of bed material, have influence on water surface elevation during flood and can threaten surrounding areas.

Between spring 2003 and summer 2006 carried out measurements which consist of: survey measurements of a section of Skawa River, granulometric composition of the bed material, velocity profiles and measurements of the water surface elevation during flood events. Prediction of the morphological changes was possible using two-dimension CCHE2D model developed by the University of Mississippi.

The numerical modeling focused on the simulation of historical flood events, t-year discharges with probability between $p=50\%$ and 0.1% under different water levels in the reservoir ranged between 304.56 m a.s.l – without back-water effect and 309.60 m a.s.l. – normal water surface level. The simulation runs included bedload and suspended load transport which caused of bed elevation changes.

Back-water reach, where deposition take place, depends on reservoir water surface level can extend up to a distance about 1.5 km. Numerical results of forecasting of fluvial processes on the studied reach yields that exploitation of water reservoir should take into consideration morphological changes within back-water reach of the water reservoir.

Key words: flood events, river bed configuration, numerical modeling, incipient motion, back-water reach