

*Marta Łapuszek, Stanisław Węglarczyk*

## **OCENA I PROGNOZA EROZJI DENNEJ W WYBRANYCH PRZEKROJACH KARPACKICH DOPLÝWÓW WISŁY**

---

### ***RIVERBED EROSION ESTIMATION AND FORECAST IN THE SELECTED CROSS-SECTIONS OF THE CARPATHIAN TRIBUTARIES OF THE VISTULA RIVER***

#### **Streszczenie**

Dokonano analizy zmienności położenia dna koryt rzecznych w czasie w wybranych czterech profilach wodowskazowych na Rapie i Dunajcu. Wskazano przyczyny bardzo intensywnej erozji, wśród których należy wymienić: intensywny pobór rumowiska rzecznoego, niewłaściwie prowadzone prace regulacyjne polegające na skrótach i zawężeniach koryt oraz budowę obiektów hydrotechnicznych, zaburzających ciągłość transportu rumowiska na długości rzeki. Prognozowanie zostało zrealizowane za pomocą metody LOESS, lokalnej ważonej regresji. W celu zbadania jak daleko długość ciągu historycznego wpływa na jakość prognozy, porównano 5-letnie prognozy oparte na 5-letniej historii z prognozami 5-letnimi opartymi na historii 10-letniej. Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę wstępnej analizy danych przed zastosowaniem konkretnej wersji modelu polegającą na uwzględnieniu rodzaju zmienności wykazywanej przez ciąg historyczny.

**Słowa kluczowe:** erozja denna, prognoza, LOESS

#### ***Summary***

*The analysis of time variability of riverbed elevation recorded at four cross-sections of two rivers: Raba and Dunajec was made. The causes of very intense erosion were pointed out, namely: intensive sediment extraction, inadequately carried out river training works including shortcuts and narrowings of riverbeds, and constructions of hydro-technical facilities, disrupting the continuity of sediment transport along the river length. Forecasting was carried*

*out using a local weighted regression method, LOESS. In order to examine how far the length of the historical series influences the quality of forecasts, a comparison was made between the 5-year forecasts based on the 5-year history and the 5-year forecasts based on the 10-year history. The results suggest the need for preliminary data analysis before using a particular version of the model in order to take into account the type of variation exhibited by the historical series.*

**Key words:** riverbed erosion, forecast, LOESS

## WSTĘP

Rzeki górskie charakteryzuje naturalna tendencja do pogłębiania koryt i zmian położenia w planie. Zmiany te spowodowane są naturalnym procesem erozji, której intensywność zależy od warunków panujących w zlewni (geologia, morfologia, reżim hydrologiczny, klimat). Dlatego intensywność ta jest zróżnicowana. Każdy ciek nieustannie dąży do osiągnięcia równowagi pomiędzy ilością niesionego materiału oraz przepływem wody wytwarzającym energię zdolną do jego transportu. Równowagę taką ciek osiąga dostosowując swoją geometrię w układzie poziomym, poprzecznym oraz wzdłuż swego biegu. Rzeka w celu zapewnienia optymalnego przepływu wody i niesionego materiału, dostosowuje więc nieustannie swoją morfologię (długość, głębokość, spadek koryta, krętość) poprzez procesy erozji oraz sedymentacji. Dostosowanie to warunkuje również intensywną dynamikę ekologiczną i jest gwarantem bogactwa oraz zróżnicowania środowisk naturalnych. Należy jednak zwrócić uwagę na sytuację, kiedy zauważalne zmiany geometrii koryta przestają być wynikiem procesów zapewniających osiągnięcie równowagi, a zaczynają świadczyć o pojawieniu się zaburzeń.

Tym zaburzeniem najczęściej jest erozja denną.

Erozja dna cieków często jest przyspieszona przez czynniki antropogeniczne. W przypadku koryt o dnie ruchomym, ich erozja wgłębna jest najczęściej przyspieszona nadmierną eksploatacją złóż osadów rzecznych oraz działalnością hydrotechniczną. Budowa zapór odcinających dopływ rumowiska, zawężanie koryt rzecznych i skracanie ich biegu, zbyt ciasne obwałowania rzek spowodowały znaczące naruszenie stabilności koryta i w wielu przypadkach stały się powodem wystąpienia silnych procesów związanych z pogłębianiem koryt rzecznych. Na niektórych odcinkach rzek obniżenia te dochodziły do 3 metrów w ciągu 100-lecia (Dunajec: Zgłobice, Żabno, Raba: Proszówki, Gdów).

Obecnie, w dobie urbanizacji i zagospodarowania terenów w bliskim sąsiedztwie koryt rzek, zapobieganie procesom erozyjnym staje się koniecznością. Bardzo istotne jest więc rozpoznanie przebiegu procesów erozyjnych w korycie rzeki, gdyż stanowi podstawę tworzenia prognozy dalszego przebiegu procesu.

Cel niniejszej pracy jest dwojaki: (1) analiza przebiegu zmienności procesu erozji dennej wybranych koryt rzecznych i (2) zbadanie na ile zwiększanie liczby obserwacji poprawia prognozę (jak daleko sięga pamięć procesu). Wyniki przedstawiono dla czterech wybranych profili wodowskazowych zlokalizowanych na górskich dopływach górnej Wisły.

Analizę intensywności przebiegu procesów erozyjnych przeprowadzono założeniu, że przebieg stanów minimalnych rocznych w wieloleciu odpowiada przebiegowi położenia dna, a więc zmiana tych stanów wody jest równoznaczna ze zmianami położenia dna [Łapuszek i Ratomski, 2006] będąc w ten sposób miarą wielkości erozji wgłębnej.

### OCENA TEMPA EROZJI ZA POMOCĄ LINIOWEJ REGRESJI

Z powodów opisanych w dalszym ciągu pracy wieloletnie ciągi danych stanów minimalnych rocznych w badanych profilach podzielono na przedziały czasowe, w których określono funkcję opisującą położenie dna ciek w danym roku  $T$ . Funkcja  $H_i(T)$  określająca zależność średniego rocznego stanu niskiego od czasu (lata) w  $i$ -tym wybranym przedziale czasowym jest zapisana następująco:

$$H_i(T) = H_{i, \text{sr}}(T) + \varepsilon \quad (1)$$

gdzie  $\varepsilon$  jest składnikiem losowym (o rozkładzie normalnym  $N(0, \sigma)$ ), a funkcja regresji  $H_{i, \text{sr}}(T)$  jest wyrażona w postaci funkcji liniowej:

$$H_{i, \text{sr}}(T) = \alpha_i T + \beta_i \quad (2)$$

gdzie:  $T$  – rok obserwacji,  $\alpha_i$  – wskaźnik intensywności erozji w  $i$ -tym okresie, cm/rok,  $\beta_i$  – stała w  $i$ -tym okresie, cm.

Wartość parametru  $\alpha_i$  wskazuje średnie roczne obniżenie dna ciek w  $i$ -tym okresie, dla którego była estymowana prosta regresji (2) Parametry  $\alpha_i$  i  $\beta_i$  są szacowane metodą najmniejszych kwadratów. Wzory (1) i (2) są oczywiście ważne tylko w odpowiednim zakresie.

### PROGNOZA EROZJI ZA POMOCĄ LOKALNEJ REGRESJI LINIOWEJ (LOESS)

Przedstawiona wyżej regresja parametryczna w swojej liniowej postaci jest techniką łatwą do stosowania i w wielu sytuacjach bardzo użyteczną. Są jednakże przypadki, gdy nieliniowość w danych jest wyraźnie widoczna, a ponadto nie jest na tyle regularna, by sugerowała jakąś funkcyjną postać. Wyjściem może być regresja nieparametryczna (np. [Cleveland i Loader 1995]), nie wymagająca podania postaci funkcji regresji  $H_{i, \text{sr}}$ . Jest to ogólniejsza metoda analizy danych, pozwalająca na pełniejsze wykorzystanie informacji zawartej w próbie losowej.

Istnieje kilka rodzajów regresji nieparametrycznej. Jedną z powszechnie stosowanych jest metoda zwana LOWESS lub LOESS [Helsel i Hirsch, 1997], która została wykorzystana w niniejszej pracy do prognozy tempa erozji.

W przyjętej wersji stan minimalny roczny  $H$  w roku  $T$  w pobliżu roku  $T_i$  jest opisany wzorem regresji liniowej

$$H(T) = \alpha_0 + \alpha_1(T_i - T) + \varepsilon(T) \quad (3)$$

a współczynniki regresji  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  są obliczane (dla każdego żądanego  $T$  z osobna) metodą lokalnie ważonych najmniejszych kwadratów z wagami  $w(z)$ :

$$\sum_{i=1}^n w\left(\frac{T_i - T}{h}\right) e_i^2 = \sum_{i=1}^n w\left(\frac{T_i - T}{h}\right) (H_i - \alpha_0 - \alpha_1(T_i - T))^2 = \min \quad (4)$$

Parametr  $h$  decyduje tutaj o wielkości wygładzania chmury punktów  $(T_i, H_i)$ . Im większa wartość  $h$ , tym bardziej wygładzony (mniej zmienny) jest powstały wykres. Po znalezieniu współczynników regresji  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ , dostajemy oszacowanie  $H(T_i) = \alpha_0$ . Należy podkreślić, że współczynniki regresji są obliczane dla każdego punktu, w którym chcemy znaleźć wartość  $H$ . Trend znajdowany metodą estymacji nieparametrycznej nie jest wyrażany *explicite* w postaci równania – praktycznie jest wyrażany wyłącznie w postaci graficznej

Istnieje cały szereg metod wyboru funkcji wagowej  $w(z)$ . W praktyce często stosowaną funkcją wagową jest funkcja „podwójna trzecia potęga” [NIST, 2011], która dla celów prognozy została zmodyfikowana do asymetrycznej postaci

$$w(z) = \begin{cases} (1 - |z|^3)^3 & -1 < z \leq 0 \\ 0 & z \leq -1 \text{ lub } z > 0 \end{cases}, \quad z = \frac{T_i - T}{h} \quad (5)$$

Taka postać wagi uwzględnia do estymacji tylko te wartości stanów, które są nie „młodsze” od wartości stanu w roku  $T$  i nie „starsze” niż wartości stanu w roku  $T - h + 1$ . Im starsza wartość stanu, tym mniejsza jego waga. Można powiedzieć, że współczynnik  $h$  jest pewną miarą pamięci szeregu czasowego stanów. Wybór jego wartości jest do pewnego stopnia subiektywny. W niniejszej pracy przyjęto dwie wartości  $h$ :  $h_1 = 5$  i  $h_2 = 10$  lat. Porównanie uzyskanych wartości prognoz powinno zilustrować jak zwiększenie  $h$  wpłynie na jakość prognozy.

Na podstawie danego nieprzerwanego ciągu stanów od roku  $T_k - h + 1$  do roku  $T_k$  włącznie, obliczana była prognoza 5-letnia dla lat  $T > T_k$ , tj.  $T_k + 1, \dots, T_k + 5$ , wzorem

$$F(T) = \alpha_0 + \alpha_1(T_k - T) \quad (6)$$

Jakość prognozy była oceniana za pomocą czterech wskaźników: obciążenia,  $B$ , średniego błędu kwadratowego,  $RMSE$ , średniego błędu absolutnego,  $MAE$ , oraz maksymalnego błędu absolutnego,  $mxAE$ .

$$B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (F_i - H_i) \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (F_i - H_i)^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |F_i - H_i| \quad (9)$$

$$mxAE = \max_{i=1, \dots, m} |F_i - H_i| \quad (10)$$

Wszystkie miary są wyrażane w centymetrach.

## CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH PRZEKROJÓW WODOWSKAZOWYCH

Do analizy wybrano 4 przekroje wodowskazowe: Mszana Dolna i Dobczyce na Rabie oraz Czchów i Żabno na Dunajcu.

Profile wodowskazowe Mszana Dolna i Dobczyce zlokalizowane są odpowiednio w 102,1 km oraz 62,0 km biegu rzeki Raby. Rzeka Raba jest typową rzeką górską. Na rzece Rabie zlokalizowanych jest 7 profili wodowskazowych. W 62,5 km biegu rzeki wybudowano i oddano do użytku w 1986 roku zaporę Dobczyce. Posiadane obserwacje stanów obejmują dla Dobczyc okres 29 lat, a dla Mszany Dolnej okres 88 lat.

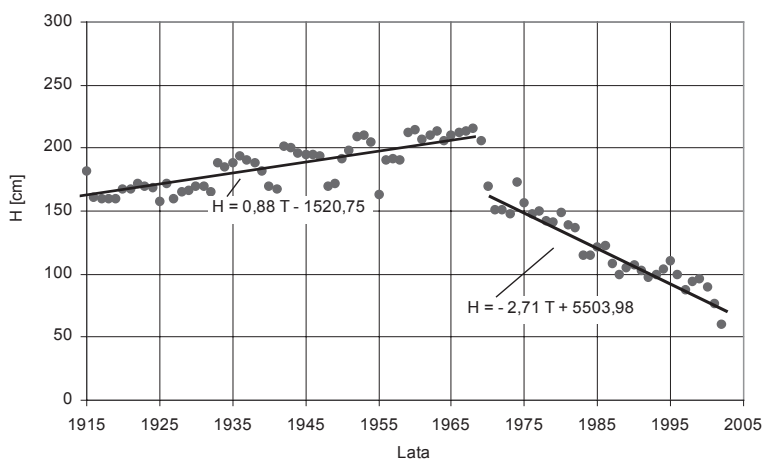
Profile wodowskazowe Czchów i Żabno zlokalizowane są odpowiednio w 66,8 km oraz 17,4 km biegu rzeki Dunajec. Na rzece Dunajec zlokalizowanych jest 8 profili wodowskazowych. W 173,0 km biegu rzeki wybudowano i oddano do użytku w 1997 roku zaporę w Czorszynie, a dwa kilometry niżej – zbiornik Sromowce Wyżne. W km 67,5 biegu rzeki znajduje się zespół zbiorników Rożnów-Czchów. Rzeka Dunajec uchodzi do Wisły w 160,6 km jej biegu. Posiadane obserwacje stanów obejmują dla Czchowa okres 71 lat, a dla Żabna okres 98 lat.

## OCENA TEMPA EROZJI - WYNIKI I DYSKUSJA

W obliczeniach uwzględniono wszystkie zmiany położenia zera wodowskazów oraz zmiany ich lokalizacji. Wyniki obliczeń zweryfikowano na podstawie analiz zmian położenia dna koryta cieku w pomierzonych przekrojach

poprzecznych koryta. Do weryfikacji wykorzystane zostały archiwalne i aktualne przekroje poprzeczne koryta [Łapuszek M., Ratomski J., 2006]. Na podstawie zaobserwowanych zmian w ich położeniu na przestrzeni lat, obliczono średnie roczne obniżenie dna. Uzyskane w ten sposób wielkości porównane zostały z wartościami współczynników  $\alpha_i$  określających intensywność zmian erozyjnych koryta. Weryfikacja tego typu mogła być jednak przeprowadzona tylko w wybranych przekrojach, z uwagi na ograniczoną wiarygodność uzyskanych przekrojów historycznych.

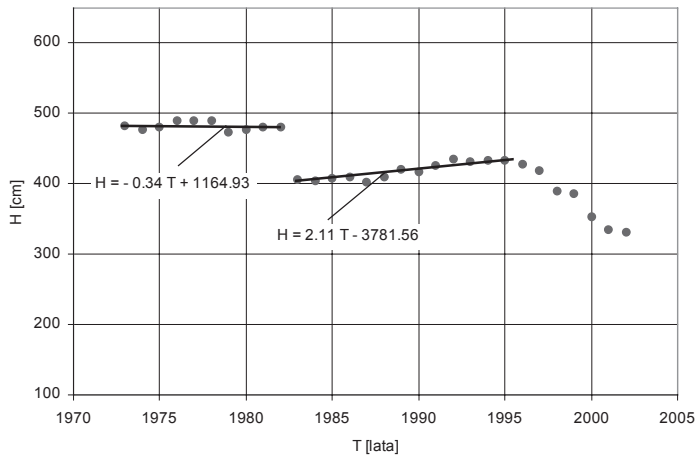
**Profil wodowskazowy Mszana Dolna na Rabie.** Przeanalizowany został ciąg obserwacyjny z lat 1915-2002. W okresie od 1915 do 1970 w przekroju obserwuje się wyraźne występowanie akumulacji rumowiska w korycie rzeczonym. Od 1971 do 2002 roku ma miejsce nieustanna, bardzo silna erozja dna, wynosząca średnio 2,7 cm/rok. Tak znaczne obniżenie dna spowodowało, że w chwili obecnej, ujęcie wody zlokalizowane poniżej analizowanego przekroju, znajduje się 1,5 metra powyżej dna koryta cieku. Od roku 1965 do chwili obecnej odnotowano siedem znacznych wezbrań, pobór rumowiska oraz prowadzenie prac regulacyjnych polegających na zabudowie systemem korekcji stopniowej, które spowodowały przemieszczanie się materiału dennego, prowadząc w rezultacie do obniżenia się koryta na tym odcinku. Dopiero od 2008 roku można zaobserwować nową tendencję koryta, na podstawie której nie można jednak jeszcze ocenić, czy koryto ulega stabilizacji.



**Rysunek 1.** Zmienność stanów minimalnych rocznych wraz z trendami liniowymi w przekroju wodowskazowym Mszana Dolna na rzece Rabie

**Figure 1.** Variability of annual minimum levels and estimated linear trend at the Mszana Dolna cross-section on the Raba river

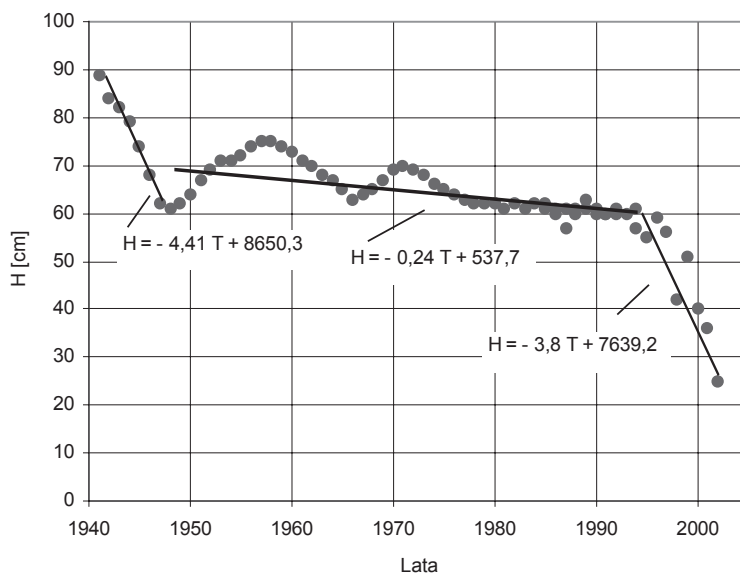
**Profil wodowskazowy Dobczyce na Rabie.** W Dobczycach przeanalizowany został ciąg danych z lat 1973-2002. Koryto w latach 1973-82 wykazywało stabilność. Na przełomie lat 1982/83 nastąpiło wyraźne obniżenie się koryta Raby o ponad 70 cm. W latach 1973-87 budowany był zbiornik z Dobczycach, w związku z tym zmieniała się lokalizacja wodowskazu. Pomiary z lat 1983-97 wykazują stabilność koryta na tym odcinku. Od 1997 do 2001 roku na odcinku poniżej zapory obserwuje się nieustanne obniżanie się koryta, wynoszące średnio 2.1 cm/rok. Podczas wezbrania w roku 1997 maksymalny zrzut z zapory w Dobczycach wynosił  $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Podobnie było podczas wezbrań, które wystąpiły w roku 2000. Przepływy te są główną przyczyną naruszenia stabilności koryta na odcinku poniżej zapory. Od roku 2002 koryta uległo stabilizacji poprzez odbudowanie warstwy opancerzenia dna na odcinku poniżej zapory.



**Rysunek 2.** Zmienność stanów minimalnych rocznych wraz z trendami liniowymi w przekroju wodowskazowym Dobczyce na rzece Rabie

**Figure 2.** Variability of annual minimum levels and estimated linear trend at the Dobczyce cross-section on the Raba river

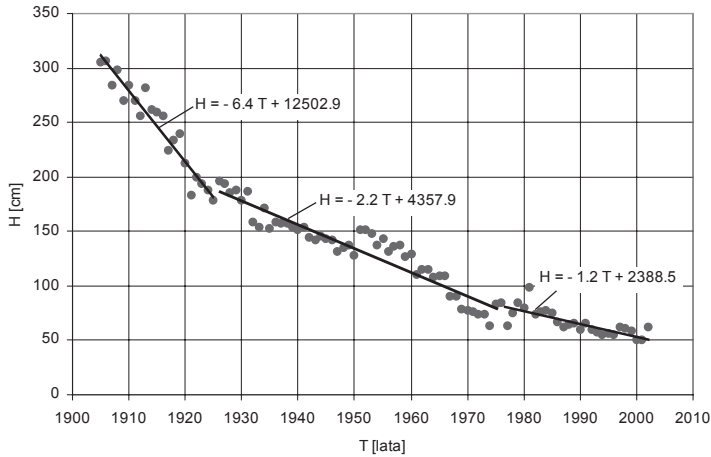
**Profil wodowskazowy Czchów na Dunajcu.** W profilu wodowskazowym Czchów przeanalizowano dane z lat 1940-1948. W latach 1940-1948 koryto ulegało znacznemu obniżeniu średnio o 4.4 cm/rok. Miało to związek z oddziaływaniem na przekrój oddanego do eksploatacji w 1941 roku zbiornika w Rożnowie. Po 1950 roku (oddanie do eksploatacji zbiornika w Czchowie) obserwuje się stabilizację koryta do roku 1994. Od roku 1994 w korycie występuje erozja dna, której intensywność określono jako 3.8 cm/rok. Erozyję dna obserwuje się do roku około 2007, po którym obserwuje nową tendencję koryta, wyraźnie dążącego do uzyskiwania powolnej stabilizacji. Jednak na podstawie kilkuletnich obserwacji trudno jest określić czy ta stabilizacja zostanie osiągnięta.



**Rysunek 3.** Zmienność stanów minimalnych rocznych wraz z trendami liniowymi w przekroju wodowskazowym Czchów na rzece Dunajec  
**Figure 3.** Variability of annual minimum levels and estimated linear trend at the Czchów cross-section on the Dunajec river

**Profil wodowskazowy Żabno na Dunajcu.** W przekroju wodowskazowym Żabno poddano analizie dane z lat 1905-2002. Koryto najintensywniej ulegało erozji w latach 1905-1925. Jest to efekt prowadzonych regulacji koryta polegającej na jego przekopie oraz skróceniu biegu rzeki. Koryto obniżało się średnio o 6.4 cm/rok. Od roku 1925 do 1975 średnie roczne obniżenie dna wynosiło 2.2 cm/rok. Przez cały wspomniany okres czasu miał miejsce intensywny pobór kruszywa z koryta cieku. Występowały też wezbrania o znacznych kulminacjach:  $Q_{1958}=2170 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{1960}=3210 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{1970}=3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{1972}=1360 \text{ m}^3/\text{s}$  oraz  $Q_{1973}=1720 \text{ m}^3/\text{s}$ . Przepływy powodziowe zwiększyły intensywność transportu rumowiska na odcinku i utrudniły proces osiągnięcia stabilności przez koryto. Od roku 1976 do chwili obecnej erozja w Żabnie przebiega ze niewielką intensywnością. Średnie roczne obniżenie dna wynosi 1.2 cm/rok. Jedyne prace regulacyjne prowadzone w okolicy wodowskazu polegały na lokalnych ubezpieczeniach brzegów, nie naruszały więc stabilności koryta. Trudność w osiągnięciu stabilności koryta mogły oprócz poboru rumowiska, spowodować też wezbrania pojawiające się średnio co kilka lat. Dopiero od 2008 roku koryto zmienia tendencję w kierunku akumulacji rumowiska. Jednak na podstawie dwóch lat obserwacji trudno jest obecnie ocenić, czy ten nowy trend koryta się utrzyma.





**Rysunek 4.** Zmienność stanów minimalnych rocznych wraz z trendami liniowymi w przekroju wodowskazowym Żabno na rzece Dunajec  
**Figure 5.** Variability of annual minimum levels and estimated linear trend at the Żabno cross-section on the Dunajec river

## PROGNOZA EROZJI – WYNIKI I DYSKUSJA

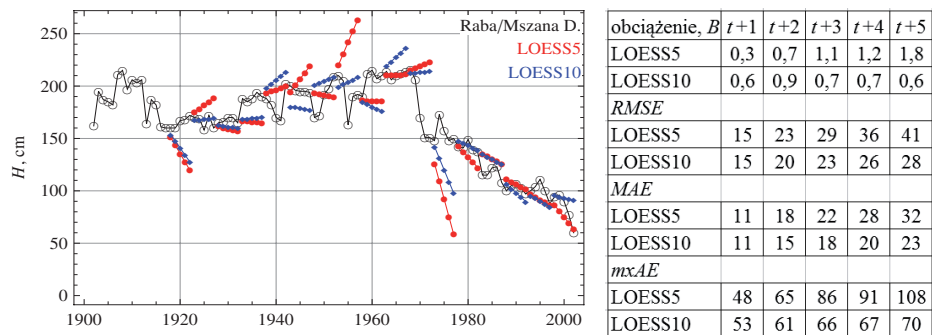
Bazując na posiadanych szeregach czasowych dla czterech przekrojów wodowskazowych, dla każdego roku poczynając od pewnego początkowego dokonano metodą LOESS prognozy stanów na 5 lat opierając się na 5- lub 10-elementowej historii (odpowiednio: LOESS5 i LOESS10) i obliczono wartości przyjętych miar jakości  $B$ ,  $RMSE$ ,  $MAE$  i  $mxAE$ . Rysunki 5–8 ilustrują graficznie uzyskane prognozy a w tabelach dostarczają porównawczą informację o miarach jakości LOESS5 i LOESS10.

Prognozy stanów w Mszanie Dolnej na Rabie (rys. 5) oparte na 10-letnich ciągach są wyraźnie lepsze od prognoz opartych na ciągach 5-letnich. Najprawdopodobniej jest to spowodowane fluktuacją stanów obserwowanych, relatywnie szybką o względnie dużej amplitudzie, słabiej usuwaną przez filtr 5-letni niż filtr 10-letni.

Prognozy stanów w Dobczycach na Rabie (rys. 6) obejmują tylko 5 lat i nie obejmują okresu 1973 – 1983, co jest spowodowane wymaganiami, aby ciąg danych liczył co najmniej 15 elementów w nieprzerwanym ciągu (10 lat dla LOESS10 i 5 lat dla prognozy). Małocizność zbioru prognoz powoduje, że otrzymane oceny są mniejsze wartości niż w pozostałych przypadkach.

Prognozy stanów w Czchowie na Dunajcu (rys. 7) wykazują niewielkie różnice, praktycznie do zaniedbania, pomiędzy podejściami 10-letnim a 5-letnim. Przyczyną jest zapewne łagodna fluktuacja stanów w prawie całym okresie obserwacji.

Prognozy stanów Dunajca w Żabnie (rys. 8) wykazują regularne różnice na korzyść podejścia 10-letniego. Wyjaśnienie może leżeć w fakcie, że ciąg obserwowanej ma wyraźną tendencję malejącą ze stosunkowo niewielkimi fluktuacjami.

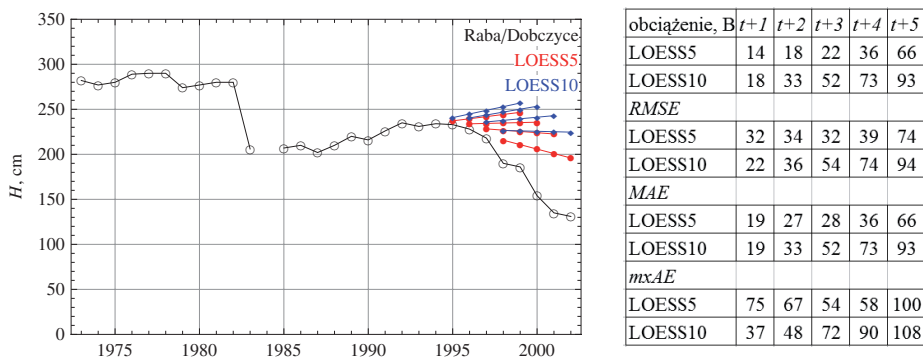


**Rysunek 5.** Pięcioletnia prognoza oparta na 5-letnich (LOESS5) i 10-letnich (LOESS10) ciągach danych. Wykres pokazuje prognozy co 5 lat, liczby w tabeli odnoszą się do wszystkich lat z okresu branego do oceny prognozy.

Kolumna  $t + i$  symbolizuje charakterystykę prognozy o wyprzedzeniu  $i$  lat

**Figure 5.** Five-year forecast based on 5-year (LOESS5) and 10-year (LOESS10) series.

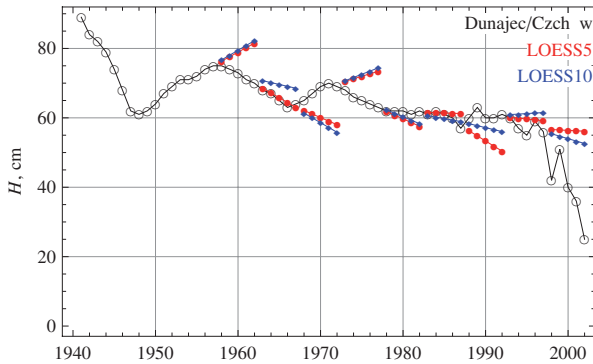
The graph shows forecasts each 5 years, the numbers in the table refer to all years of the period taken to the analysis. The  $t + i$  column denotes forecast efficiency measures of the  $i$ -year lead time



**Rysunek 6.** Pięcioletnia prognoza oparta na 5-letnich (LOESS5) i 10-letnich (LOESS10) ciągach danych. Wykres pokazuje prognozy dla wszystkich lat z okresu branego do oceny prognozy

**Figure 6.** Five-year forecast based on 5-year (LOESS5) and 10-year (LOESS10) series.

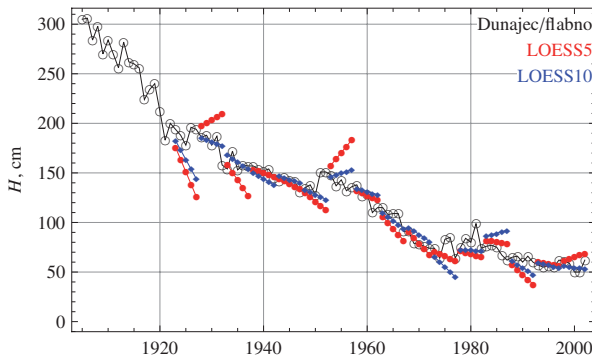
The graph shows forecasts for all years of the period taken to the analysis



obciążenie, B	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5
LOESS5	0,2	0,2	0,1	0	0,1
LOESS10	0,4	0,7	1	1,4	1,8
<i>RMSE</i>					
LOESS5	3,5	4,7	6,6	8,8	12
LOESS10	4,1	5,4	6,9	8,4	10
<i>MAE</i>					
LOESS5	2,3	3,4	4,7	6,4	8,4
LOESS10	2,9	4	5,3	6,6	8
<i>mxAE</i>					
LOESS5	15	14	21	27	34
LOESS10	13	16	20	23	28

**Rysunek 7.** Pięcioletnia prognoza oparta na 5-letnich (LOESS5) i 10-letnich (LOESS10) ciągach danych. Wykres pokazuje prognozy co 5 lat, liczby w tabeli odnoszą się do wszystkich lat z okresu branego do oceny prognozy

**Figure 7.** Five-year forecast based on 5-year (LOESS5) and 10-year (LOESS10) series. The graph shows forecasts each 5 years, the numbers in the table refer to all years of the period taken to the analysis



obciążenie, B	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5
LOESS5	-0,4	-0,3	-0,5	-1	-1,3
LOESS10	-0,2	-0,4	-0,6	-1,2	-1,8
<i>RMSE</i>					
LOESS5	12	15	16	21	25
LOESS10	10	12	14	17	21
<i>MAE</i>					
	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5
LOESS5	9	11	13	16	18
LOESS10	7,7	9,6	11	13	16
<i>mxAE</i>					
LOESS5	32	45	48	57	90
LOESS10	30	36	35	42	59

**Rysunek 8.** Pięcioletnia prognoza oparta na 5-letnich (LOESS5) i 10-letnich (LOESS10) ciągach danych. Wykres pokazuje prognozy co 5 lat, liczby w tabeli odnoszą się do wszystkich lat z okresu branego do oceny prognozy

**Figure 8.** Five-year forecast based on 5-year (LOESS5) and 10-year (LOESS10) series. The graph shows forecasts each 5 years, the numbers in the table refer to all years of the period taken to the analysis

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Obserwacje i obliczenia przebiegu procesu erozji dennej w badanych profilach wodowskazowych wskazują, że erozja dna koryt rzecznych jest procesem naturalnym, jednak jej intensywność jest zwiększona (przyspieszona) przez czynniki antropogeniczne. W wyniku budowy i oddania do eksploatacji obiektów hydrotechnicznych zmiany erozyjne w korycie rzeki Dunajec w Czchowie oraz rzeki Raby w Dobczycach, dno poniżej zapór uległo obniżeniu o około 1,0 m w ciągu 10 lat. Koryto uległo stabilizacji po tym okresie czasu w wyniku wytworzenia się naturalnej warstwy obrukowania.

2. Obserwacje wykazały, że prace regulacyjne polegające na skrótach i zawężeniach koryt oraz intensywnym poborem rumowiska rzeczno są przyczyną występowania bardzo intensywnej erozji dennej, co obserwuje się w Żabnie na rzece Dunajec. W wyniku systematycznie prowadzonych regulacji i poboru rumowiska z koryta rzeki koryto Dunajca uległo obniżeniu o 2,5 m w ciągu około 90 lat. Podobne skutki regulacji i poboru rumowiska z koryta rzeki prowadzonych od 1960 roku obserwuje się na Rabie w okolicy Mszany Dolnej, gdzie koryto obniżyło się w ciągu 40 lat o około 1,5 m. Czynnikiem zwiększającym intensywność procesu erozji są ponadto wezbrania występujące na Dunajcu i na Rabie systematycznie.

3. Porównanie jakości prognozy 5-letniej opartej na 10- i 5-letniej historii pokazuje, że zależy ona od sposobu zmienności ciągu obserwacji, tzn. istnienia lub nieistnienia w danych pewnej regularności (tendencji) oraz od wielkości nieregularności i ich fluktuacji. Fakt ten sugeruje potrzebę wstępnej analizy danych przed wyborem metody prognozy.

*Praca wykonana w ramach projektu badawczego PB-5546/B/T02/2010/38  
finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego*

## BIBLIOGRAFIA

- Cleveland, W. S., Loader, C. 1995. *Smoothing by local regression: Principles and methods*. Technical Report, AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, NY.
- Helsel D. R., Hirsch R. M. 1997. *Statistical Methods in Water Resources*, Elsevier.
- Łapuszek M., Ratomski J., *Metodyka określania i charakterystyka przebiegu erozji dennej rzek górskich dorzecza górnej Wisły*, Monografia 332, Politechnika Krakowska, Kraków 2006
- NIST 2011, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmd/section1/pmd144.htm>, [dostęp: 19 IX 2011].

Dr inż. Marta Łapuszek  
Politechnika Krakowska  
Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
tel. 012 628 28 89  
mlapuszek@iigw.pl

Dr hab. Stanisław Węglarczyk, prof. PK  
Politechnika Krakowska  
Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
sweglar@pk.edu.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Gruszczyński*