

**Janusz URBAŃSKI**

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW  
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU

## **Rozwój miejscowego rozmycia w czasie na modelach jazu w dwóch skalach**

### **Development during of local scour on models of the dam in two scales**

**Słowa kluczowe:** jaz, rozmycia miejscowe, modelowanie

**Key words:** local scour, time scale, modeling

#### **Wprowadzenie**

Badania wyboju powstającego w dolnym stanowisku jazu mają praktyczne zastosowanie w projektowaniu i ocenie bezpieczeństwa budowli. Złożoność zjawiska i duża liczba czynników wpływających na jego przebieg sprawiły, że powstała bogata literatura tego zagadnienia. Opracowano dotychczas wiele równań do opisu głębokości rozmycia. Obszerny przegląd formuł, dokonany między innymi w literaturze krajowej (Dąbkowski i in. 1982, Siwicki 2002, Urbański 2003), wykazał, że ze względu na znaczne zróżnicowanie warunków prowadzenia doświadczeń przez różnych Autorów trudno jest porównywać ich wyniki i analizować łącznie cały zbiór dotychczasowych danych w celu generalizowania wnio-

sków. Praktyczne wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych do prognozowania wielkości rozmyć na rzeczywistych obiektach hydrotechnicznych daje wyniki odbiegające od obserwowanych w naturze. Przyczyną tego jest niewystarczający stopień rozpoznania wielu zagadnień, dotyczących między innymi wpływu wielkości modelu, uziarnienia materiału dennego i czasu trwania przepływu wody na rozmiary rozmycia, a także wpływ tych czynników na strukturę ruchu turbulentnego na wypadzie budowli.

Największą trudnością w laboratoryjnych badaniach rozmyć miejscowych jest modelowanie materiału rozmywalnego. Podstawowym kryterium modelowania powinno być podobieństwo podatności cząstek materiału dennego na przemieszczenie przez strumień wody. Zastosowana po raz pierwszy przez Leviego (1967) metoda modelowania zakłada, że prędkość krytyczna ( $v_0$ ), przy której rozpoczyna się ruch cząstek, i ich cecha hydrauliczna ( $w$ ) po-

winy spełniać warunek podobieństwa prototypu i modelu:

$$\lambda_{v_0} = \lambda_w = \lambda_v = \lambda_h^{1/2} \quad (1)$$

gdzie:

$\lambda$  – skala wielkości występujących jako indeksy,

$h$  – głębokość strumienia wody,

$v$  – prędkość strumienia wody.

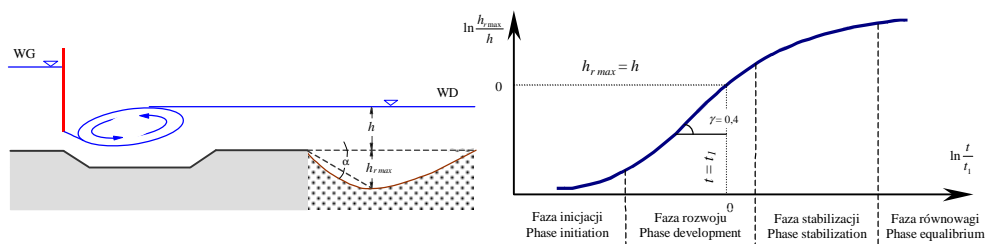
Ważnym czynnikiem w badaniach rozmyć na modelach różnej wielkości jest czas trwania doświadczenia ( $t$ ). Dotychczas niektórzy badacze przyjmowali, że głębokość wyboju po pewnym czasie przestaje wzrastać pomimo dalszego oddziaływania wody na koryto. Na podstawie badań laboratoryjnych na modelach z przepływem strumienia o małej liczbie Froude'a, Breusers (1966), Dietz (1969) i Zanke (1978) wyróżnili cztery fazy rozwoju wyboju: początkową, intensywnego wzrostu, stabilizacji wyboju i fazę równowagi (rys. 1).

Skalę czasu, jako ważny czynnik w badaniach rozmyć na modelach fizycznych, rozważano na podstawie wyników doświadczeń przeprowadzonych dla bardzo zróżnicowanych skal geometrycznych, prędkości i materiału

dennego oraz profilów prędkości i intensywności turbulencji (Breusers 1966, van den Meulen i Vinjé 1975, Błażejowski i Nowak 1986, Hoffmans i Pilarczyk 1995). Stwierdzono, że przy interpretacji wyników badań niezbędne jest uwzględnianie skali czasu formowania się rozmycia. Van den Meulen i Vinjé (1975), na podstawie badań, zaproponowali wyrazić morfologiczną skalę czasu dla rozmyć zależnością:

$$\lambda_T = \lambda_h^{-0,15}$$

Badania Błażejowskiego i Nowaka (1986) przeprowadzone na modelach w trzech skalach wykazały, że morfologiczna skala czasu dla rozmyć nie przyjmuje stałej wartości i zależna jest od fazy rozwoju wyboju. W badaniach tych natężenia przepływów modelowano według kryterium podobieństwa Froude'a, a materiał rozmywalny zgodnie ze skalą geometryczną. Zmienność wykładnika potęgi morfologicznej skali czasu wraz z rozwojem rozmycia wykazały również badania Dąbkowskiego i innych (2004), przeprowadzone na dwóch modelach jazu z przelewem o zaokrąglonej krawędzi bez modelowania materiału rozmywalnego.



RYSUNEK 1. Głębokość rozmycia w zależności od czasu trwania doświadczenia (Hoffmans i Pilarczyk 1995):  $t_1$  – czas, po którym maksymalna głębokość rozmycia jest równa początkowej głębokości strumienia ( $h$ )

FIGURE 1. Relationship between depth of scour and time of experiment (Hoffmans and Pilarczyk 1995):  $t_1$  – time at which the maximum scour depth equals the initial flow depth ( $h$ )

Celem pracy jest analiza procesu rozmywania dna w czasie poniżej jazu odwzorowanego na modelu w dwóch skalach geometrycznych z użyciem jednego materiału rozmywalnego.

## Metoda badań

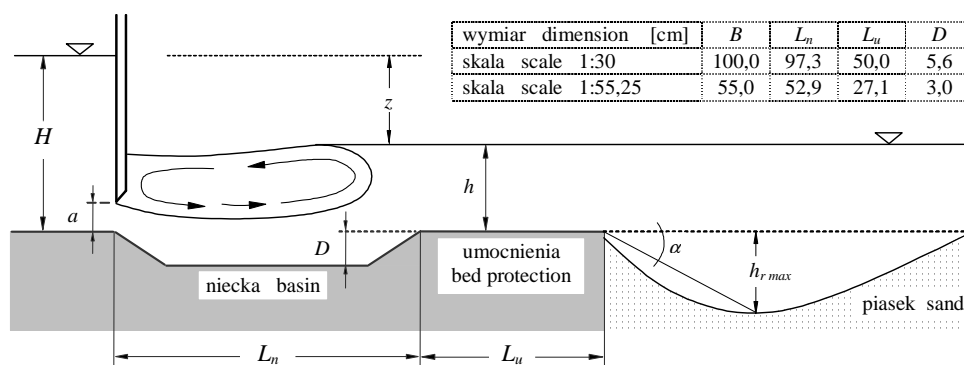
Przebieg rozmywania dna w czasie badano na modelach jazu wykonanych w dwóch skalach 1 : 30 i 1 : 55,25. Schemat badanej budowli wraz z wymiarami przedstawiono na rysunku 2. Był to jaz z zamknięciem zasuwowym, podnoszonym na wysokość  $a$  podczas każdego doświadczenia, niecką wypadową i odcinkiem dna umocnionego. Woda przepuszczana była pod zamknięciem. Modele zbudowane były w korytach prostokątnych o szerokości  $B$ .

Hydrauliczne warunki, w jakich przeprowadzono doświadczenia, zamieszczono w tabeli 1. Natężenia przepływu modelowano według kryterium podobieństwa Froude'a. Zatem wartości bezwymiarowej liczby Froude'a ( $Fr_d$ ) strumienia w dolnym stanowisku są jednakowe dla odpowiadających sobie

przepływów na modelach (tab. 1). W badaniach wykorzystano jeden materiał rozmywalny – piasek sortowany, o krzywej uziarnienia i średnicach charakterystycznych ( $d$ ) przedstawionych na rysunku 3. Czas trwania przepływów na obu modelach wynosił 8 godzin. Profile rozmyć mierzono w osi koryta po czasie: 1, 2, 4, 6 i 8 godzin od początku doświadczenia.

## Wyniki badań i ich analiza

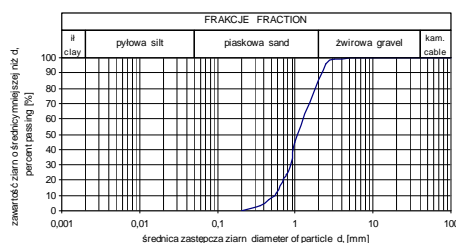
Pomierzone w osi modelu profile rozmyć po różnym czasie trwania doświadczenia przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Wynika z nich, że na obu modelach i dla wszystkich badanych przepływów profile wyboju zmieniały się w czasie 8 godzin trwania doświadczenia. Nie osiągnięto stabilizacji dołu rozmycia, zarówno pod względem kształtu, jak i głębokości maksymalnej, oraz położenia przekroju, w którym ona występuje. Nieznacznie zmieniało się położenie i nachylenie opadającego stoku wyboju. Położenie stoku wznoszącego się ulegało zmianom, przy



RYSUNEK 2. Schemat i podstawowe wymiary badanej budowli piętrzącej  
FIGURE 2. Schema and basic dimensions of investigated taired construction

TABELA 1. Parametry hydrauliczne przepływu podczas doświadczeń na modelach  
TABLE 1. Hydraulic parameters of flow during of experiments on models

q	a	H	h	z	Fr <sub>d</sub>
[m <sup>2</sup> /s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
model w skali / model in scale 1:30					
0,049	0,033	0,417	0,133	0,296	0,11
0,073	0,049	0,445	0,165	0,292	0,12
0,097	0,065	0,462	0,193	0,281	0,13
model w skali / model in scale 1:55,25					
0,020	0,021	0,217	0,072	0,183	0,11
0,030	0,031	0,230	0,090	0,178	0,12
0,039	0,041	0,240	0,105	0,173	0,13



d	[mm]
d <sub>5</sub>	0,42
d <sub>10</sub>	0,53

d	[mm]
d <sub>5</sub>	0,42
d <sub>10</sub>	0,53
d <sub>16</sub>	0,64
d <sub>50</sub>	1,10
d <sub>60</sub>	1,40
d <sub>84</sub>	2,00
d <sub>90</sub>	2,40
d <sub>95</sub>	2,50

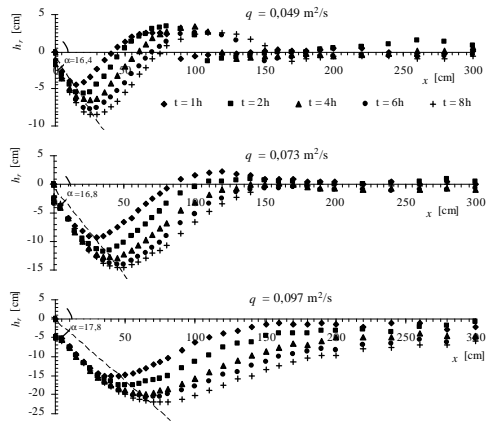
RYSUNEK 3. Krzywa uziarnienia i średnice charakterystyczne materiału rozmywalnego użytego w doświadczeniach na obu modelach

FIGURE 3. Granulation and characteristic diameters of sand used on the two models

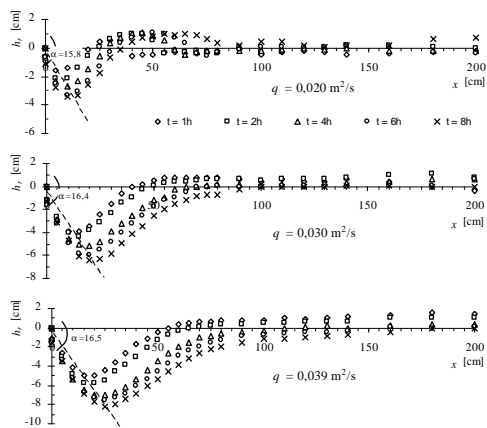
czym odcinki tego stoku o największym nachyleniu do poziomu były w kolejnych odcinkach czasu w przybliżeniu równoległe do siebie. Za wybojem, na odcinku rozmytego dna o niewielkim nachyleniu stoku występowały fałdy tworzące się z materiału wlezonego. Kąt  $\alpha$  odchylenia od poziomu prostej poprowadzonej z końca umocnienia i łączącej punkty o maksymalnej głębokości rozmycia w kolejnych odcinkach czasu dla badanych przepływów wynosił od 16,4° do 17,8° na modelu więk-

szym i od 15,8° do 16,5° na mniejszym (rys. 4 i 5).

Dla wszystkich badanych przepływów na mniejszym modelu za dołem rozmycia formowało się odsypisko materiału wyerodowanego. Na modelu większym powstawało ono tylko w doświadczeniach z mniejszymi przepływami, przy czym dla przepływu  $q = 0,073 \text{ m}^2/\text{s}$  występowało tylko w początkowej fazie doświadczenia. Związane jest to z tym, iż rzeczywiste prędkości przepływu na modelu w skali



RYSUNEK 4. Profile rozmycia w czasie na modelu w skali 1 : 30  
 FIGURE 4. Profiles of erosion during investigation on scale model 1 : 30



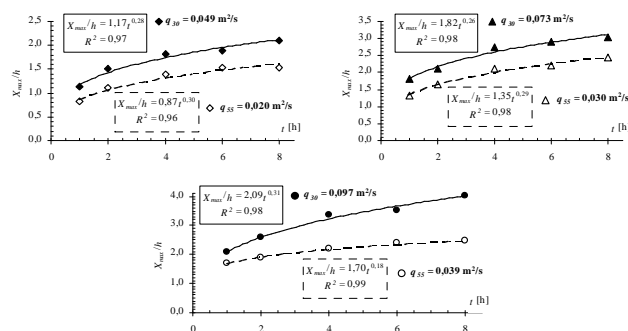
RYSUNEK 5. Profile rozmycia w czasie na modelu w skali 1 : 55,25  
 FIGURE 5. Profiles of erosion during investigation on scale model 1 : 55,25

1 : 55,25 są mniejsze. Na obu modelach wykorzystano ten sam materiał rozmywany i przy jednakowych prędkościach granicznych potrzeba dłuższego czasu trwania przepływu na modelu mniejszym na przetransportowanie ziaren gruntu. Odsypisko w miejscu występowania zmniejsza przekrój przepływu, co powoduje wzrost prędkości. Jednocześnie podpiętrza ono strumień powyżej i tam prawdopodobnie zmniejsza prędkości. Opóźnia to erozję wznoszącego się stoku wyboju.

Względne odległości  $X_{\max}/h$  od końca umocnień do miejsca występowania maksymalnej głębokości rozmycia  $h_{r\max}$  kształtowały się inaczej na każdym z modeli (rys. 6). Na modelu większym dla wszystkich badanych przepływów głębokość maksymalna oddalała się szybciej od przekroju końca umocnień. We wszystkich badanych przypadkach wartości  $X_{\max}/h$  ciągle wzrastały, a więc

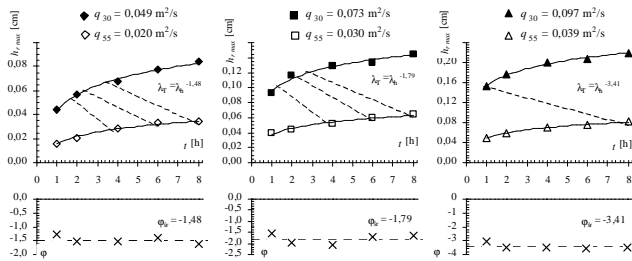
proces rozmycia nie uległ jeszcze zakończeniu.

Dla warunków, w jakich przeprowadzono doświadczenia, przeanalizowano morfologiczną skalę czasu wyrażoną równaniem zaproponowanym przez Dietza (1969) i przyjmowanym między innymi w pracach Błażejewskiego i Nowaka (1986):  $\lambda_T = \lambda_h^\varphi$ . Głębokości rozmyć na modelu mniejszym przeliczono na odpowiadające im głębokości na modelu większym, uwzględniając przyjęte skale geometryczne. Odpowiadające sobie głębokości rozmyć na obu modelach połączono linią przerywaną na rysunku 7. Okazało się, że średnie wartości wykładnika potęgi  $\varphi$  są różne w zależności od badanego przepływu i maleją wraz ze wzrostem  $q$ . Wykładnik potęgi  $\varphi$  nie przyjmuje również stałej wartości w czasie początkowych ośmiu godzin



RYSUNEK 6. Zmiana odległości przekroju występowania maksymalnej głębokości wyboju od końca umocnień w trakcie trwania przepływów na obu modelach

FIGURE 6. Change of distance of cross section occurrence of maximum depth of scour from the end of bed protection during investigation on two models



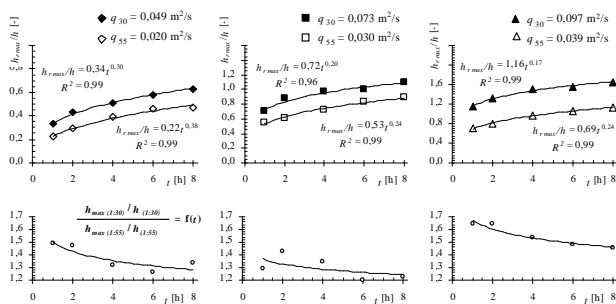
RYSUNEK 7. Zmienność wykładnika potęgi  $\varphi$  morfologicznej skali czasu dla dwóch modeli jazu  
 FIGURE 7. Change of  $\varphi$  parameter for morphological time scale between two models of the dam

kształtowania się wyboju, a nieznacznie maleje (rys. 7). Z uzyskanej zmienności skali czasu widać, że wybój szybciej rozwijał się na modelu większym.

O intensywniejszym rozwoju rozmycia na modelu większym świadczą również wykresy na rysunku 8. Przedstawiają one przyrosty względnej maksymalnej głębokości wyboju ( $h_{rmax}/h$ ) na obu modelach w czasie dla odpowiadających sobie par przepływów. W trakcie

doświadczeń większa jest względna głębokość rozmycia na modelu w skali 1 : 30. Im dłuższy czas trwania przepływu, tym mniejsza różnica względnej głębokości wyboju między dwoma modelami, na co wskazuje malejąca w czasie wartość ilorazu

$$\frac{h_{rmax(1:30)} / h_{0(1:30)}}{h_{rmax(1:55)} / h_{0(1:55)}} \quad (\text{rys. 8}).$$



RYSUNEK 8. Zmienność względnej maksymalnej głębokości rozmycia ( $h_{rmax}/h$ ) podczas doświadczeń na obu modelach  
 FIGURE 8. Change of relative maximum depth of scour ( $h_{rmax}/h$ ) during investigation on two models

## Wnioski

1. W modelowaniu procesu rozmycia istotny jest czynnik czasu. Na obu modelach profile wyboju zmieniały się w trakcie trwania doświadczenia. Nieznacznie zmieniało się położenie i nachylenie opadającego stoku wyboju, a wyraźnym zmianom ulegało położenie stoku wznoszącego się. W czasie 8 godzin trwania doświadczenia dla badanych przepływów na modelach nie osiągnięto stabilizacji dołu rozmycia.
2. Intensywność rozwoju wyboju w czasie zależy od skali modelu. Badania z wykorzystaniem jednego materiału rozmywalnego wykazały, że rozmycie postępuje intensywniej na modelu większym. Wykładnik potęgi dla skali czasu zmieniał się w trakcie doświadczenia oraz przyjmował różne wartości w zależności od hydraulicznych warunków przepływu. Różnica przebiegu rozmyć na obu modelach spowodowana jest tym, że rzeczywiste prędkości i naprężenia styczne na obu modelach były inne, a materiał rozmywalny ten sam. Występowania odsypiska materiału wyerodowanego z wyboju na mniejszym modelu także powoduje powolniejszy rozwój rozmycia i wydłuża czas ostatecznego zakończenia procesu. Badania wykazały, że im dłuższy czas trwania doświadczenia tym mniejsza różnica względnej głębokości wyboju między dwoma modelami.
3. Przyjmując model większy, jako prototyp dla mniejszego, w modelowaniu przepływu według kryterium Froude'a (bez modelowania

materiału rozmywanego) maksymalna głębokość rozmycia rozwija się wolniej na modelu niż na prototypie.

## Literatura

- BŁAŻEJEWSKI R., NOWAK J. 1986: Some scale effects in modelling two-dimensional local scour, Proc. of IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomena, Toronto, Canada.
- BREUSERS H.N.C. 1966: Conformity and time scale in two-dimensional local scour. Proc. Symp. on Model and Prototype Conformity. Hydr. Res. Lab. Poona, India.
- DĄBKOWSKI L., SIWICKI P., URBAŃSKI J. 2004: Wpływ skali modelu jazu na rozmycie miejscowe. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura* 3 (1).
- DĄBKOWSKI L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- DIETZ J.W. 1969: Kolkbildung in feiner oder leichten Sohlmaterialien bei strömen dem Abfluß, Mitteilungen des Theodor Rehbock Flußbaulaboratorium. Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- HOFFMANS G.J.C.M., PILARCZYK K.W. 1995: Local scour downstream of hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 121: 4.
- LEVI I.I. 1967: Modelirovanie gidravliczeskich javlenii. Energia, Moskva.
- SIWICKI P. 2002: Analiza wpływu skali modelu i uziarnienia materiału dennego na kształtowanie się w warunkach laboratoryjnych rozmyć koryta poniżej jazu. Rozprawa doktorska (maszynopis). Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- URBAŃSKI J. 2003: Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych. Rozprawa doktorska (maszynopis). Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- Van der MEULEN T., VINJE J.J. 1975: Three-dimensional local scour in non-cohesive sediments. Proc. 16th IAHR-Congr. Sao Paulo, Brazil.



ZANKE U. 1978: Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport. Teil 2. Berechnung des Sedimenttransportes hinter befestigten Sohlenstrecken. Sonderfall zweidimensionaler Kolk. Mittlungen des Franzius-Institut der TU Hannover, Helf 48, Germany.

## Summary

**Development during of local scour on models of the dam in two scales.** Paper presented analysis results of investigations of influence scale model on formation of scour in time. Investigations were conducted on two model this same taired constructions with the over of water under the closure, bottom of water basins and wash-

ing-out area. Models were made in two scales 1 : 30 and 1 : 55. In investigations were used this same eroded material on two models – sand. Estimated change of parameter for morfological time scale between two models of the dam. In Froudian models with a nonlinearly scaled size of sand grains the maximum depth of local scour develop slower than their linear counterparts in prototypes, except for the initial stage of scour.

### Author's address:

Janusz Urbański  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska  
02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159  
Poland