

## **ANALIZA NUMERYCZNA WPLYWU POZIOMU MORZA NA PRZEBIEG WEZBRAŃ W NADMORSKICH CIEKACH POWIERZCHNIOWYCH NA PRZYKŁADZIE POTOKU STRZYŻA W GDAŃSKU**

Jakub Hakiel

Politechnika Gdańska

**Streszczenie.** W dzisiejszych czasach coraz większym problemem stają się podtopienia na terenach zurbanizowanych. Biorąc to pod uwagę, należy większą wagę przyłożyć do prawidłowego obliczania przepustowości koryta. Jednym z czynników wpływających na nie są warunki na odpływie. W przypadku potoków nadmorskich zależą one ściśle od poziomu morza. W pracy podjęto próbę wyznaczenia wpływu poziomu morza na przebieg wezbrań w nadmorskich ciekach powierzchniowych. W tym celu przeprowadzono analizę numeryczną przepływu wody w potoku Strzyża w Gdańsku, którego odbiornikiem jest Martwa Wisła, której poziom wody jest jednakowy z poziomem morza. Obliczenia wykonano na modelu numerycznym opartym na układzie równań de Saint-Venanta w postaci zachowawczej, rozwiązanej metodą różnic skończonych (schemat McCormacka). Analizę przeprowadzono dla dwóch fal wezbraniowych o prawdopodobieństwie przekroczenia 1% i 10% oraz dla sytuacji, gdy w potoku występuje jednostajny przepływ średni. Dla każdego wariantu przyjęto dwa współczynniki szorstkości Manninga: 0,04 oraz 0,08. Otrzymane wyniki przedstawiono w postaci profili maksymalnych poziomów wody w potoku oraz zestawienia zasięgów wpływu poziomu morza na poziom wody w cieku. Podsumowując wykonane obliczenia, wykazano, że oddziaływanie morza zależy bezpośrednio od poziomu wody w potoku. Zdecydowanie większy wpływ na przebieg wezbrania mają przyjęte do obliczeń wartości przepływu. Stanowi to kluczową informację przy określaniu poziomu istotności analizowanego problemu. Praca ta może być wstępem do bardziej szczegółowego rozpoznania zjawiska.

**Słowa kluczowe:** koryto otwarte, przepływ, hydraulika potoku, analiza numeryczna

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: mgr inż. Jakub Hakiel, Katedra Hydrotechniki, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; e-mail: [Jakub.hakiel@pg.gda.pl](mailto:Jakub.hakiel@pg.gda.pl).

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2014

## WSTĘP

W dzisiejszych czasach coraz większym problemem stają się podtopienia na terenach zurbanizowanych. Powodem tego są coraz większe ilości wód opadowych odprowadzane do powierzchniowych cieków wodnych. Sprawia to, że obserwowane w nich wezbrania są coraz gwałtowniejsze. Biorąc to pod uwagę, należy większą wagę przyłożyć do prawidłowego obliczania przepustowości koryta. W tym celu istotne staje się wyznaczenie przepływów występujących w cieku. Jednym z czynników wpływających na nie są warunki na odpływie. W przypadku potoków nadmorskich zależą one ściśle od poziomu morza.

W pracy podjęto próbę wyznaczenia wpływu poziomu morza na przebieg wezbrań w nadmorskich ciekach powierzchniowych. W tym celu przeprowadzono analizę numeryczną przepływu wody w potoku Strzyża w Gdańsku, którego odbiornikiem jest Martwa Wisła, gdzie poziom wody jest jednakowy z poziomem morza. Analizę przeprowadzono wielowariantowo, aby w pełni przedstawić charakter zjawiska. Na podstawie wyników obliczeń wyciągnięto wnioski dotyczące omawianego zjawiska.

## MODEL NUMERYCZNY

W celu określenia wpływu poziomu morza na przebieg wezbrań w nadmorskich potokach dokonano analizy numerycznej ruchu nieustalonego w kanale otwartym. Może on być skutecznie opisywany równaniami de Saint-Venanta (1) [Kubrak 1998].

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S} \quad (1)$$

gdzie:

- $t$  – czas,
- $x$  – odległość wzdłuż kanału,
- $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{S}$  – wektory definiowane zgodnie z (2).

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + 0,5gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

- $h$  – napętnienie, m,
- $u$  – uśredniona wzdłuż głębokości prędkość,  $m \cdot s^{-1}$ ,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ,
- $S_0$  – spadek dna kanału, –,
- $S_f$  – spadek linii energii, –.

Równania (1) i (2) wykorzystywane są zazwyczaj w modelach jednowymiarowego przepływu w kanale otwartym, co pozwala na wykorzystanie ich przy analizie wpływu poziomu morza na przebieg wezbrań w potoku.



W celu rozwiązania układu równań de Saint-Venanta wykorzystano metodę różnic skończonych [Szymkiewicz 2007], z użyciem numerycznego schematu McCormacka [McCormack 1971], pozwalającego na rozwiązanie równań (1) i (2) za pomocą dwuczłonowej zależności predyktor–korektor (3), (4). Jest to schemat jawny pozwalający na dokonanie obliczeń w oparciu jedynie o wartości ze znanego poziomu czasowego.

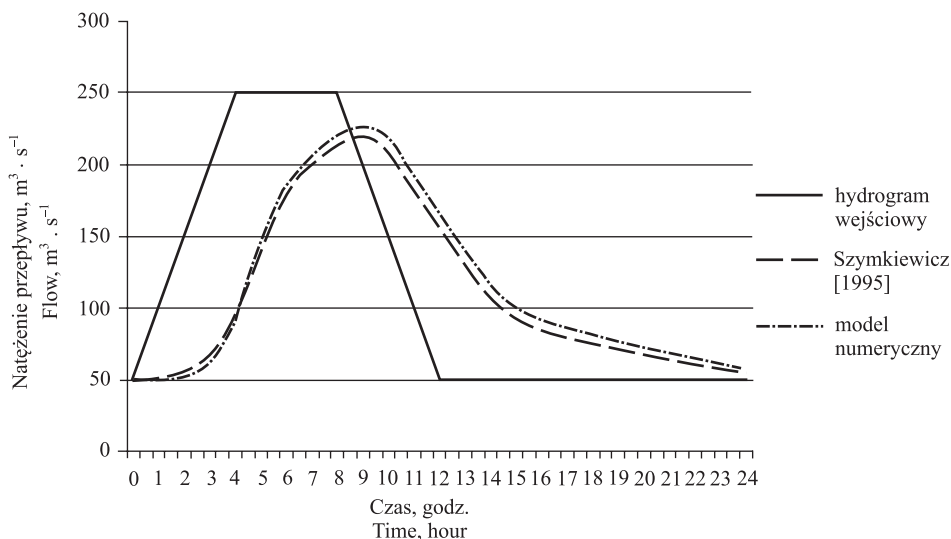
$$\mathbf{U}_i^p = \mathbf{U}_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{F}_{i+1}^k - \mathbf{F}_i^k) - \Delta t \mathbf{S}_i^k \quad (3)$$

$$\mathbf{U}_i^{k+1} = \frac{1}{2} (\mathbf{U}_i^k + \mathbf{U}_i^p) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\mathbf{F}_i^p - \mathbf{F}_{i-1}^p) - \frac{1}{2} \Delta t \mathbf{S}_i^p \quad (4)$$

gdzie:

- $\Delta t$  – krok czasowy całkowania,
- $\Delta x$  – krok przestrzenny całkowania,
- $i$  – nr przekroju obliczeniowego,
- $k$  – nr kroku czasowego,
- $p$  – pośredni krok obliczeniowy,
- $\mathbf{U}, \mathbf{F}, \mathbf{S}$  – wektory definiowane zgodnie z (2).

Wykonany model obliczeniowy w celu weryfikacji uzyskanych wyników poddany został testowi obliczeniowemu zgodnie z metodyką przedstawioną w artykule Szymkiewicza [1995]. Na wykresie 1 przedstawiono zestawienie otrzymanych hydrogramów.



Ryc. 1. Zestawienie wyników testu numerycznego

Fig. 1. Summary of numerical test results



Na tak stworzonym modelu przeprowadzono obliczenia wykorzystane w następnym kroku do analizy wpływu poziomu morza na przebieg wezbrań w cieku powierzchniowym.

## OBLICZENIA

Obliczenia wykorzystane w analizie wykonane zostały dla potoku Strzyża w Gdańsku, który ze względu na swoje położenie (jest to potok uchodzący do Martwej Wisły) pozostaje pod stałym wpływem zmian poziomu morza. Do obliczeń przyjęto ujściowy odcinek potoku o długości 1,640 km. Dane geometryczne dotyczące analizowanego odcinka uzyskano z opracowania geodezyjnego [Wysocki 2013]. Koryto na odcinku tym ma charakter uregulowany, co w znacznym stopniu uprościło obliczenia.

Jako górny warunek brzegowy w modelu obliczeniowym przyjęto hydrogram dopływu opracowany na podstawie danych hydrologicznych [Szydłowski 2012]. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch fal wezbraniowych o prawdopodobieństwie przekroczenia kolejno 1% oraz 10%. Warunek brzegowy dolny określał poziom morza. W celu odwzorowania w obliczeniach zmian poziomu Martwej Wisły wywołanego dopływem z potoku Strzyża przekrój, w którym założono sztywny poziom zwierciadła wody odsunięto od ujścia cieku o 300 m, uwzględniając na tym odcinku parametry geometryczne Martwej Wisły.

Analizy dokonano dla kilku wariantów w zależności od przyjętych współczynników oporu oraz zadanej fali wezbraniowej. Wszystkich obliczeń dokonano dla poziomów morza 0 m n.p.m. oraz 1,5 m n.p.m., co odpowiada kolejno stanowi normalnemu oraz występującej na Martwej Wiśle cofce wywołanej podniesieniem poziomu morza o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 0,3\%$ . W tabeli 1 przedstawiono przyjęte do analizy warianty.

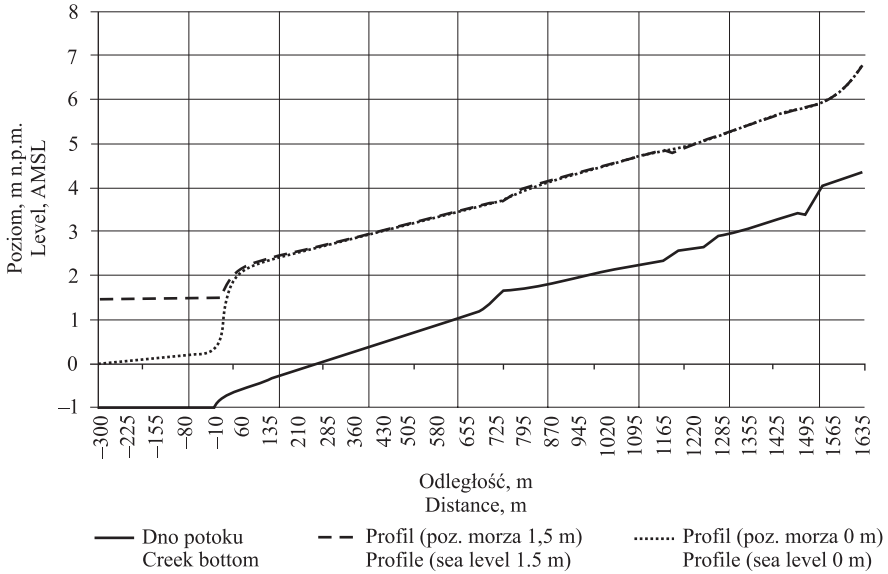
Tabela 1. Zestawienie wariantów obliczeniowych

Table 1. Summary of calculation variants

| Parametr<br>Parameter  | Wariant 1<br>Variant 1 | Wariant 2<br>Variant 2 | Wariant 3<br>Variant 3 | Wariant 4<br>Variant 4 | Wariant 5<br>Variant 5 | Wariant 6<br>Variant 6 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Współczynnik szorstkości Manninga<br>Manning roughness coefficient<br>$s \cdot m^{-1/3}$ | $n = 0,04$             | $n = 0,08$             | $n = 0,04$             | $n = 0,08$             | $n = 0,04$             | $n = 0,08$             |
| Fala wezbr. o prawdopodobieństwie<br>Probability of spate                                | $p = 1\%$              | $p = 1\%$              | $p = 10\%$             | $p = 10\%$             | brak wezbr.            | brak wezbr.            |

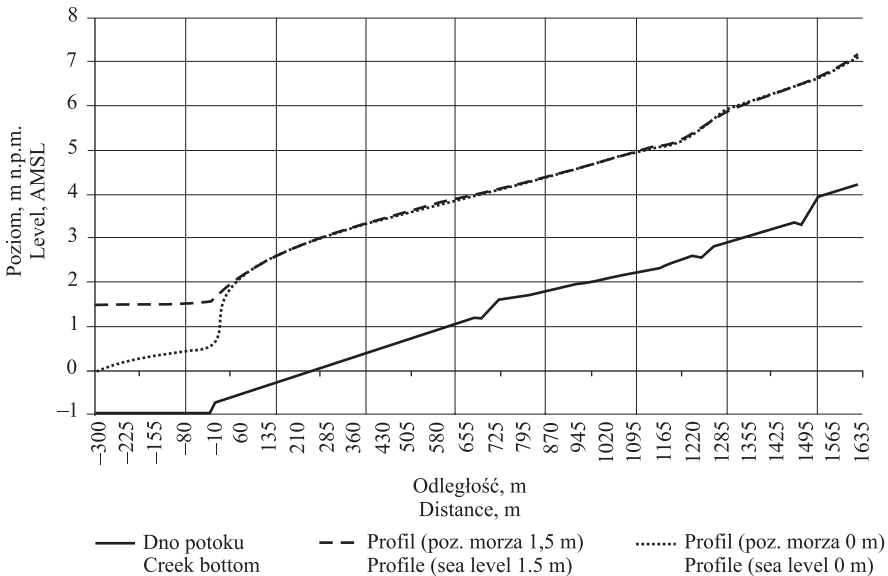
Na rycinach 2–7 przedstawiono wyniki obliczeń dla poszczególnych wariantów. Na każdej rycinie zaprezentowano profile maksymalnego poziomu zwierciadła wody w potoku przy poziomie morza 0 m n.p.m. i 1,5 m n.p.m. oraz linie przedstawiającą poziom dna.





Ryc. 2. Profile zwierciadła wody dla wariantu 1, poziomów morza 0 oraz 1,5 m n.p.m. (n = 0,04, p = 1%)

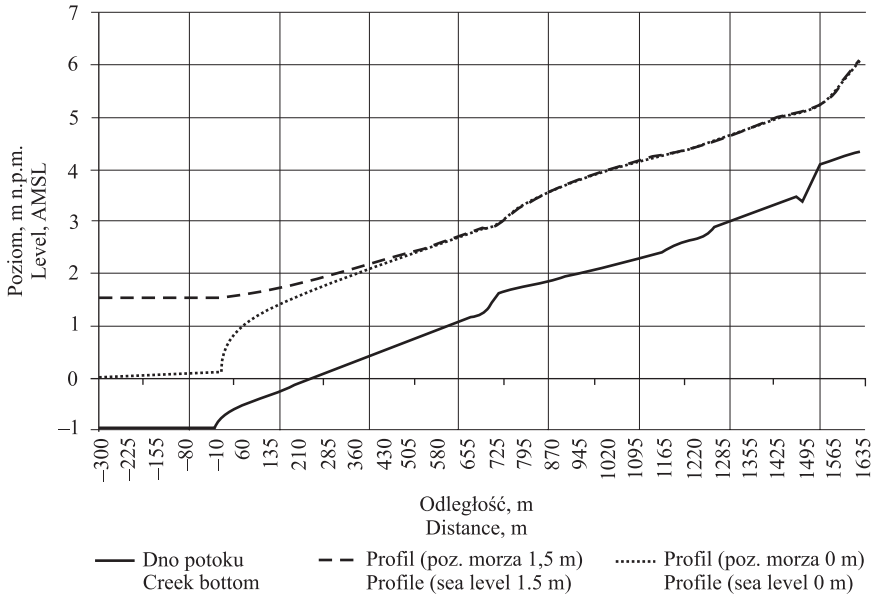
Fig. 2. Water level profiles for variant 1, sea levels 0 and 1,5 AMSL (n = 0,04, p = 1%)



Ryc. 3. Profile zwierciadła wody dla wariantu 2, poziomów morza 0 oraz 1,5 m n.p.m. (n = 0,08, p = 1%)

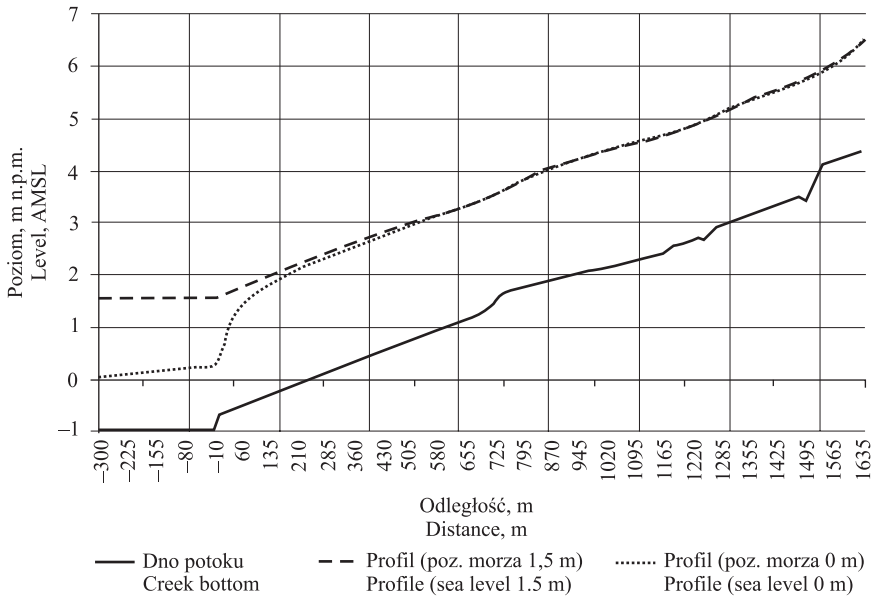
Fig. 3. Water level profiles for variant 2, sea levels 0 and 1,5 AMSL (n = 0,08, p = 1%)





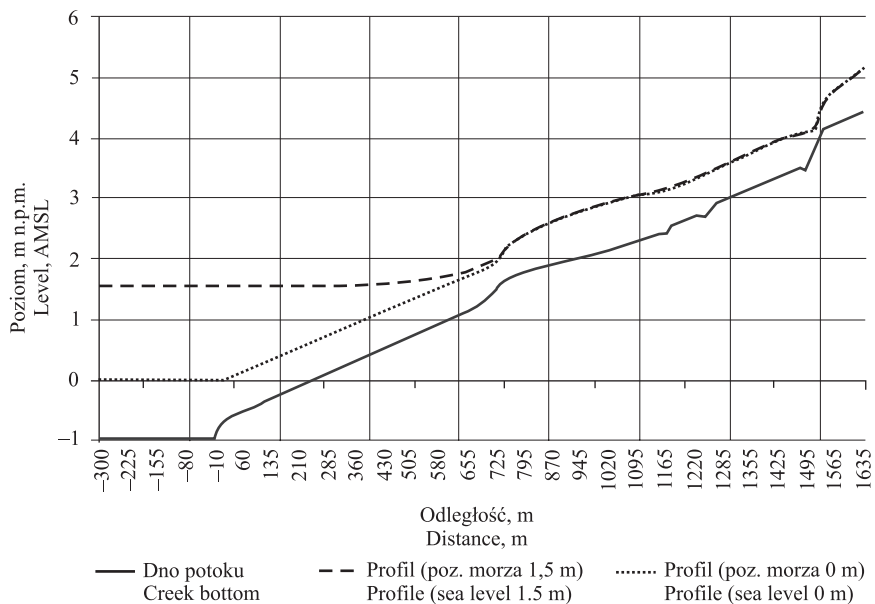
Ryc. 4. Profile zwierciadła wody dla wariantu 3, poziomów morza 0 oraz 1,5 m n.p.m. ( $n = 0,04$ ,  $p = 10\%$ )

Fig. 4. Water level profiles for variant 3, sea levels 0 and 1,5 AMSL ( $n = 0,04$ ,  $p = 10\%$ )



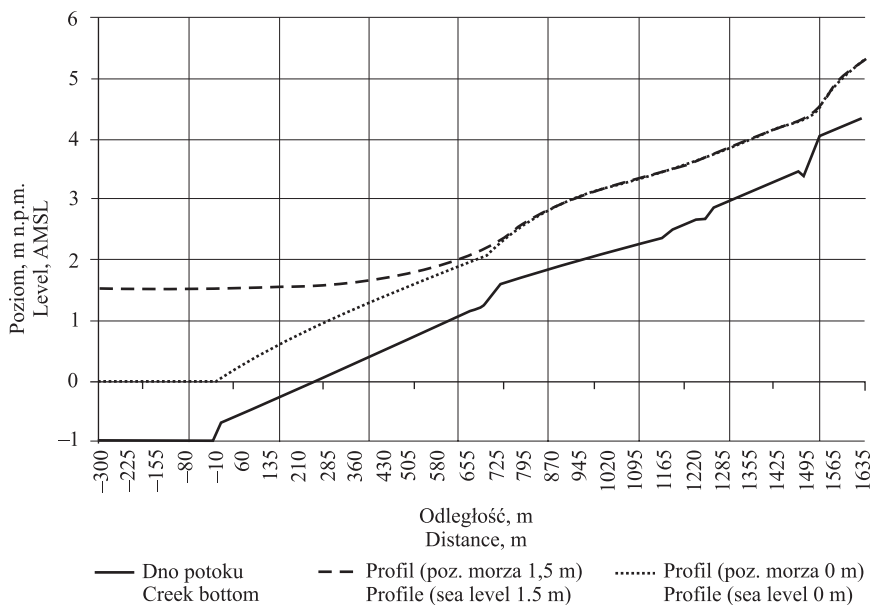
Ryc. 5. Profile zwierciadła wody dla wariantu 4, poziomów morza 0 oraz 1,5 m n.p.m. ( $n = 0,08$ ,  $p = 10\%$ )

Fig. 5. Water level profiles for variant 4, sea levels 0 and 1,5 AMSL ( $n = 0,08$ ,  $p = 10\%$ )



Ryc. 6. Profile zwierciadła wody dla wariantu 5, poziomów morza 0 oraz 1,5 m n.p.m. (n = 0,04)

Fig. 6. Water level profiles for variant 5, sea levels 0 and 1,5 AMSL



Ryc. 7. Profile zwierciadła wody dla wariantu 6, poziomów morza 0 oraz 1,5 m n.p.m. (n = 0,08)

Fig. 7. Water level profiles for variant 6, sea levels 0 and 1,5 AMSL

Na podstawie wykresów 2–7 wyznaczono zasięg oddziaływania morza dla wszystkich wariantów z podziałem na wpływ istotny oraz zauważalny. Pierwszy zdefiniowany został jako zasięg, w którym różnica poziomów wody w potoku dla poziomów morza 0 m n.p.m. oraz 1,5 m n.p.m. wynosi ponad 10 cm, drugi natomiast dla różnicy poziomów 1 cm. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie zasięgu oddziaływania morza dla poszczególnych wariantów obliczeniowych

Table 2. Summary of sea influence range for each calculation variant

| Zasięg<br>Influence reach                                  | Wariant 1<br>Variant 1 | Wariant 2<br>Variant 2 | Wariant 3<br>Variant 3 | Wariant 4<br>Variant 4 | Wariant 5<br>Variant 5 | Wariant 6<br>Variant 6 |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Istotny wpływ<br>Significant impact<br>$\Delta h > 10$ cm  | 75 m                   | 45 m                   | 360 m                  | 240 m                  | 610 m                  | 565 m                  |
| Zauważalny wpływ<br>Noticeable impact<br>$\Delta h > 1$ cm | 535 m                  | 360 m                  | 725 m                  | 710 m                  | 725 m                  | 750 m                  |

## OMÓWIENIE WYNIKÓW

Wyniki wskazują, że wpływ poziomu morza na przebieg wezbrań zależy w dużej mierze od parametrów przepływu w potoku. Dla analizowanych wariantów obliczeniowych w większości przypadków profile zwierciadła wody układają się w zupełnie odmienny sposób, pewne podobieństwo daje się jedynie zauważyć w wariantach 5 i 6. Większy wpływ poziomu morza można zaobserwować dla fal wezbraniowych o większym prawdopodobieństwie wystąpienia, tzn. o mniejszych wartościach natężeń przepływów. Może to wynikać z mniejszych poziomów wody w potoku.

Analizując otrzymane wyniki, należy zauważyć również wyraźny wpływ współczynnika szorstkości na charakter przebiegu wezbrań w potoku. Zwiększenie współczynnika powoduje zmniejszenie zasięgu wpływu poziomu morza na poziom wody w cieku.

Porównując wyniki otrzymane dla wszystkich wariantów, widać, że największy zasięg oddziaływania morza występuje w sytuacji, gdy na potoku nie obserwujemy wezbrania. Jest to niezwykle ważne, biorąc pod uwagę proces projektowania koryt dla tego typu potoków. Jednocześnie trzeba podkreślić, że koryto przystosowane do przejścia wezbrania o prawdopodobieństwie wystąpienia 1%, nie będzie zagrożone przepełnieniem w przypadku przepływów mniejszych niezależnie od poziomu morza.

Z powyższych obserwacji można wyciągnąć wniosek, że zasięg wpływu poziomu morza na przebieg wezbrania w potoku zależy w dużej mierze od poziomu wody w samym cieku. Im jest on mniejszy (im mniejsze przepływy), tym zasięg ten jest większy. Można wyraźnie zaobserwować to przy obliczeniach wariantów 5 i 6, tak samo wskazuje na to porównanie wyników dla różnych współczynników szorstkości.



## PODSUMOWANIE

Należy zauważyć, że otrzymane wyniki obliczeń wskazują na stosunkowo duży zasięg wpływu poziomu morza na poziom wody w potoku Strzyża. Jednak skala tego zjawiska jest niewielka, zmiany w poziomach wody są nieznaczne, a jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie odbiornika widać wyraźniejsze różnice w poziomach. Pozwala to stwierdzić, iż w praktycznych pracach zdecydowanie ważniejsze jest prawidłowe określenie przepływów miarodajnych, które mają większy wpływ na poziom wody w potoku. Świadczy to o tym, że zjawisko zmian poziomu morza w trakcie występowania wezbrań jest zagadnieniem, które w celu prawidłowego uwzględnienia należy analizować kompleksowo wraz z pozostałymi czynnikami wpływającymi na kształtowanie się zwierciadła wody w potokach.

Wpływ morza na przebieg wezbrań określony w opracowaniu wyznaczony został bez uwzględnienia zmian czasowych poziomu morza oraz zjawiska falowania, które na potokach dopływających do Martwej Wisły nie występuje. Należy podkreślić, że powyższe procesy mogłyby mieć znaczący wpływ na analizowany fenomen w przypadku cieków uchodzących bezpośrednio do morza.

Przedstawiona w pracy analiza numeryczna może stanowić wstęp do dalszych rozważań nad tematem wpływu poziomu morza na przebieg wezbrań w potokach nadmorskich. Należałoby przeanalizować zmienność poziomu wody w cieku i jednocześnie wahania poziomu wody w morzu. Wartościowe mogłyby w takiej sytuacji okazać się kompleksowo wykonane pomiary powyższych wielkości.

## PIŚMIENNICTWO

- Byczkowski, A. (1996). Hydrologia. T. II. Wydawnictwo SGGW Warszawa.
- Hakiel, J. (2014). Przepustowość małych cieków powierzchniowych na terenach zurbanizowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Kubrak, J. (1998). Hydraulika techniczna. Wydawnictwo SGGW Warszawa.
- Machalińska, J., Szydłowski, M. (2012). Numeryczna analiza zagrożenia powodziowego na odcinku starego koryta Raduni w Kolbudach. *Gosp. Wodna*, 5, 208-215.
- McCormack, R.W. (1971). Numerical solution of the interaction of a shock wave with a laminar boundary layer. *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Numerical Methods in Fluid Dynamics*. Springer Verlag Berlin.
- Szydłowski, M. (2007). Modelowanie zjawisk powodziowych wywołanych opadami w zlewni miejskiej. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk.
- Szydłowski, M. (red.) (2012). Charakterystyka hydrologiczna zlewni Potoku Strzyża. Model hydrologiczny opad – odpływ. Załącznik do raportu z realizacji projektu badawczo-rozwojowego pt. „Monitorowanie, modelowanie i analiza zagrożenia powodziowego w małej zlewni miejskiej na przykładzie zlewni Potoku Strzyża w Gdańsku”. Politechnika Gdańska Gdańsk.
- Szymkiewicz, R. (1995). Method to solve 1D unsteady transport and flow equations. *J. Hydraul. Engineer.*, 121(5), 396–403.
- Szymkiewicz, R. (2007). Metody numeryczne w inżynierii wodnej. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk.
- Wysocki, T. (2013). Pomiary geodezyjne. Operat techniczny z wykonania przekrojów dolinowych oraz pomiarów przepustów drogowych. DEMO, Gdańsk.

## NUMERICAL ANALYSIS OF IMPACT OF SEA LEVEL ON THE DEVELOPMENT OF SWELLINGS IN SEASIDES SURFACE STREAMS ON EXAMPLE OF STRZYŻA STREAM IN GDAŃSK

**Abstract.** Nowadays, flooding in the urbanized areas gets more of a problem. Taking this into consideration, there should be more weight put on the correct calculation of flow capacity. One of the factors affecting it is the hydraulic conditions at the outlet. In the case of seaside streams it depends strictly on the level of the sea. The paper attempts to designate the impact of sea level rise on the course of swellings in seaside surface water streams. For this purpose the numerical analysis of water flow were made for stream Strzyża in Gdańsk, where the receiver is Martwa Wisła, where the water level is equal to the level of the sea. The calculations were performed on a numerical model based on the de Saint-Venant equations, solved using the finite difference method (McCormack scheme). The analysis was performed for two flood waves of exceeding probability 1 and 10%, and average flow in stream. For each variant two Manning roughness factors were adopted. The results obtained are shown in the form of profiles of maximum water levels in the creek and the summary of the range of impact of sea level. Summing performed calculations, it turned out that the impact of the sea depends directly on the level of water in the creek. Much greater impact on the calculations have flow values. This is crucial information in determining the level of significance of the analyzed problem. This work may be a prelude to a more detailed diagnosis of the phenomenon.

**Key words:** open channel, flow, stream hydraulic, numerical analysis

XXXIII OGÓLNOPOLSKA SZKOŁA HYDRAULIKI – Zakopane 2014

Zorganizowana pod patronatem

Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk

przez

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Dofinansowanie:

Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie

Wydanie publikacji zostało dofinansowane przez MGGP S.A.



*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.02.2015*

Do cytowań – For citation: Hakiel, J. (2015). Analiza numeryczna wpływu poziomu morza na przebieg wezbrań w nadmorskich ciekach powierzchniowych na przykładzie potoku Strzyża w Gdańsku. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiecus*, 14(1), 75–84.