

WSTĘPNA OCENA PRZEPUSTOWOŚCI KORYTA CIEKU MIEJSKIEGO W WARUNKACH SILNEJ ANTROPOPRESJI

Leszek Lewicki

Politechnika Krakowska

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych przejścia fali wezbraniowej w korycie cieków miejskich pod kątem wstępnej oceny przepustowości jego odcinka poddanego silnej antropopresji. Jako obszar analiz wybrano odcinek potoku Sudół Dominikański (Rozrywka) na terenie Krakowa. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w oparciu o model 1-D przepływu nieustalonego zbudowany z zastosowaniem programu MIKE 11 firmy DHI. W modelu uwzględniono obiekty zabudowy inżynierskiej koryta, takie jak mosty, przepusty, odcinek zarurowany oraz potencjalne obszary zalewowe. Ze względu na brak posterunków wodowskazowych, jako warunki brzegowe zastosowano fale hipotetyczne oparte na modelu opad–odpływ.

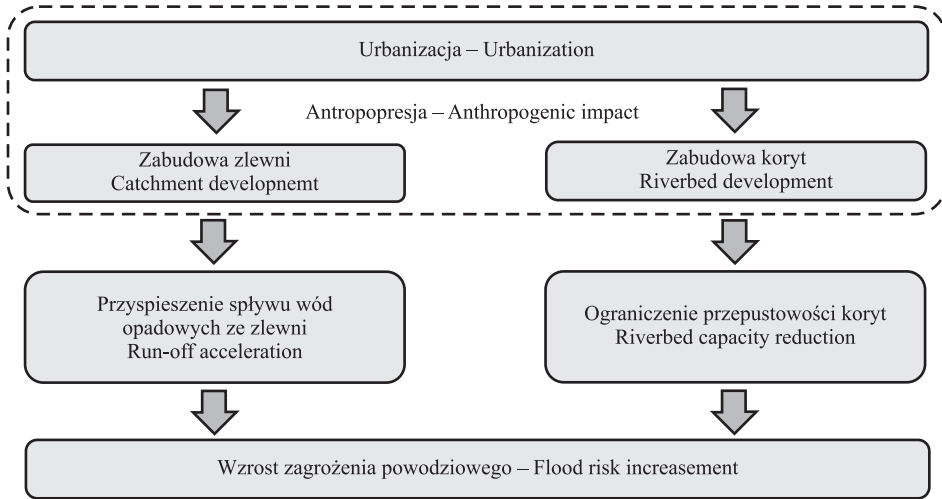
Słowa kluczowe: antropopresja, przepustowość koryta, modelowanie 1-D

WSTĘP

Doświadczenia ostatnich lat wskazują na rosnące znaczenie w ogólnym bilansie strat powodziowych zagrożeń ze strony systemu hydrograficznego na obszarach miejskich. Ma to ścisły związek z postępującym nieuchronnie procesem urbanizacji i łączącymi się z tym procesem presjami antropicznymi. Presje tego rodzaju, określane również mianem antropopresji, przejawiają się, ogólnie rzecz ujmując, zabudową powierzchni zlewni oraz zabudową samych koryt (ryc. 1) i skutkują niekiedy negatywnymi zmianami w warunkach odpływu wód opadowych do koryt cieków miejskich (przyśpieszeniem odpływu) oraz zmianami warunków przepływu w samych korytach (ograniczeniem ich przepustowości).

Przedmiotem niniejszej pracy jest wstępna ocena przepustowości koryta cieków miejskich w warunkach silnej antropopresji na przykładzie cieków z obszaru aglomeracji

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Leszek Lewicki, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: leszek.lewicki@iigw.pk.edu.pl



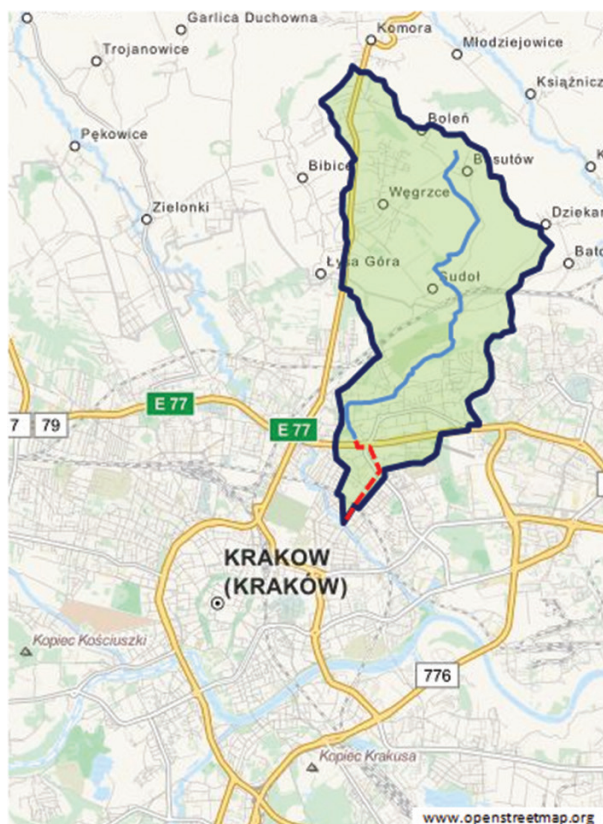
Ryc. 1. Wpływ urbanizacji na wzrost zagrożenia powodziowego
 Fig. 1. Impact of urbanization on flood risk increase

krakowskiej. Jako przedmiot badań wybrano potok Sudół Dominikański, przy czym analizą objęto odcinek jego koryta poddany szczególnie silnym przeobrażeniom antropicznym związanym z rozbudową okolicznych osiedli mieszkaniowych. Analiza danych archiwalnych wykazuje, że jest to równocześnie odcinek, na którym w ostatnich latach miały miejsce stosunkowo liczne przypadki wystąpienia z brzegów wody i podtapiania osiedla Prądnik Czerwony w Krakowie. Zbieżność ta może sugerować istnienie związku między występowaniem intensywnej zabudowy koryta a jego zdolnością odprowadzania wysokich wód wezbraniowych. Potwierdzenie i wstępne rozpoznanie charakteru takiego związku było przesłanką do podjęcia niniejszej pracy i stanowić może podstawę dalszych, bardziej szczegółowych analiz w przyszłości. Ponadto może być przyczynkiem do opracowania wytycznych do projektowania przepustów w warunkach intensywnej zabudowy koryt z uwzględnieniem oddziaływań pomiędzy obiektami znajdującymi się w niewielkich odległościach od siebie w sposób zapewniający ograniczenie wzrostu zagrożenia powodziowego – co stanowi istotny problem w szczególności na obszarach miejskich.

OPIS ANALIZOWANEGO ODCINKA

Sudół Dominikański (dawniej Suchydół Dominikański, znany także pod nazwami Sudół Dominikański i Rozrywka) to niewielki potok w województwie małopolskim o długości ok. 8,5 km i powierzchni zlewni ok. 15,5 km². Sudół Dominikański jest lewobrzeżnym dopływem rzeki Prądnik (Białucha) i uchodzi do niego w km 2+140, w rejonie ul. Olszyny w Krakowie. Poczynając od Bosutowa, gdzie znajduje się jego źródło, potok przepływa dalej przez Węgrzce, Dziekanowice, Batowice, a następnie, już w obrębie Krakowa, przez osiedla Mistrzejowice, Prądnik Czerwony oraz Olszę. Na

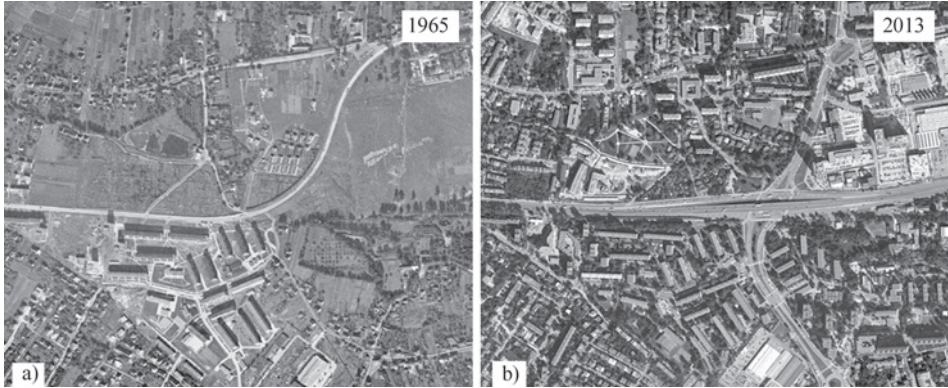
obszarze zlewni potoku obejmującej obszary gmin Zielonki i Kraków dominują tereny zabudowane. Lokalizację potoku i jego zlewni zobrazowano na ryc. 2 (linią przerywaną zaznaczono odcinek zarurowany).



Ryc. 2. Lokalizacja zlewni potoku Sudół Dominikański
Fig. 2. Location of the Sudół Dominikański stream catchment

Koryto cieków, szczególnie na obszarze Krakowa, w obrębie osiedli Prądnik Czerwony i Olsza, uległo silnej antropopresji związanej z budową i rozbudową tych osiedli (Ortofotomapy Krakowa, ryc. 3).

W latach 70. XX w., wraz z rozpoczęciem budowy osiedla Prądnik Czerwony zaczęły następować liczne i niekorzystne przekształcenia układu hydrograficznego tego obszaru [Nowacka-Rejzner 2011]. Likwidacji uległa wówczas Młynówka Olszecka, dwa stawy przy Żabim Młynie oraz ostatni wodny Królewski Młyn przy ul. Młyńskiej. Jeszcze w roku 1979 koryto potoku przechodziło pod ul. Lublańską, a następnie pod ul. Młyńską, w stronę ul. Pijarów i dalej wzdłuż ul. Młyńska Boczna i ul. Pilotów jako koryto otwarte i dopiero w okolicy ul. Żarnowej zniknęło w kolektorze odprowadzającym wodę do Prądnika, tuż powyżej mostu w ciągu ulic Brodowicza–Olszyny. W latach 80. ubiegłego wieku, w związku z budową nowych osiedli mieszkaniowych



Ryc. 3. Zdjęcia lotnicze obszaru Prądnika Czerwonego i Olszy a) rok 1965, b) rok 2013 (źródło: <http://mozliwosci.com/krakow>)

Fig. 3. Aerial photograph of the Prądnik Czerwony and Olsza area a) year 1965, b) year 2013 (source: <http://mozliwosci.com/krakow>)

na Olszy II, cały ten odcinek również zostaje ujęty betonowym kolektorem biegnącym wzdłuż ul. Młyńskiej i ul. Pilotów (fragment starego koryta nadal znajduje się w okolicy stacji benzynowej koło estakady im. gen. Tadeusza Rozwadowskiego, wybudowanej w 2007 r.). Całkowita długość tego zaruwanego odcinka wynosi ok. 1650 m, co stanowi prawie 20% długości całego cieku. Powyżej ul. Lublańskiej w kolejnych latach koryto potoku także zostało zakryte na znacznej długości przepustami pod ul. Dobrego Pasterza i skrzyżowaniem ul. Dominikanów z ul. Jana Kaczary (o długościach odpowiednio 71 m i 61,5 m). W roku 2007 w ramach prac porządkujących koryto, pomiędzy ul. Naczelną a ul. Strzelców, wytyczono sztucznie nowy przebieg koryta – zlikwidowane zostały naturalne meandry, a brzegi i dno wyłożono betonowymi elementami.

Szerokość koryta potoku w części otwartej waha się od ok. 1 m do ok. 2 m. W części zaruwanej wody potoku prowadzone są w betonowym kolektorze – początkowo (na długości ok. 100 m) o przekroju jajowym o szerokości 1,2 m i wysokości 2 m, który następnie przechodzi w przekrój dzwonowy o szerokości 2,2 m i wysokości 2,5 m. Wylot z kolektora znajduje się w niewielkiej odległości (ok. 22 m) przed ujściem do Prądnika. W końcowym odcinku, bezpośrednio poniżej wylotu, znajduje się niekała wypadowa z kolektora o szerokości 4 m. Wewnątrz kolektora znajdują się dwa przepusty o długościach 32 i 65 m w postaci potrójnych betonowych rur o średnicach 1,1 m. Na wlocie i wylocie każdego z przepustów znajdują się komory o wymiarach odpowiednio $6,3 \times 4,5 \times 3,2$ m oraz $5 \times 5 \times 3,2$ m.

Ogółem na całej długości potoku zidentyfikowano 16 przepustów, 4 mosty, 8 kładek dla pieszych oraz 6 przejść przewodów różnego rodzaju instalacji (ciepłowniczych itp.).

Zagrożenie powodziowe od strony Sudolu Dominikańskiego jest potwierdzone licznymi podtopieniami osiedla Prądnik Czerwony na prawym brzegu. Na początku czerwca 2010 r. w wyniku wylewu potoku spowodowanego obfitymi opadami deszczu, zalane zostały rejon ulic Dobrego Pasterza, Majora i Lępkowskiego. Podobne zdarzenie miało miejsce rano 25 czerwca 2013 r. (ryc. 4) oraz wcześniej – w latach 1996 i 1997. Ostatnio

podtopienia, choć o mniejszym zasięgu, wystąpiły w nocy z 9 na 10 lipca 2014 r. po intensywnych opadach deszczu w dniu poprzednim. Za każdym razem przełanie wody miało miejsce na prawym brzegu powyżej wlotu do przepustu pod ul. Dobrego Pasterza na wysokości boiska sportowego (strzałka na ryc. 4).



Ryc. 4. Prądnik Czerwony – powódź w czerwcu 2013 (fot. M. Wit) – strzałka wskazuje miejsce przełania się wody

Fig. 4. Prądnik Czerwony – flood in June 2013 (photo M. Wit) – the arrow indicates the place of water overflow

PRZYJĘTA METODA I ZAKRES OCENY

Symulacje numeryczne przeprowadzono na modelu komputerowym zbudowanym w oparciu o program MIKE 11 firmy DHI. Program pozwala na obliczenia jednowymiarowego (1-D), nieustalonego przepływu w korytach otwartych z wykorzystaniem układu równań Saint-Venanta, tj. równań: ciągłości (1) i zachowania pędu (2), w postaciach przedstawionych poniżej [MIKE 11 2009]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu,
- A – powierzchnia przepływu,
- q – dopływ boczny,
- h – rzędna zwierciadła wody,
- R – promień hydrauliczny,
- C – współczynnik Chezy'ego,
- α – współczynnik Coriolisa,
- t – czas,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Równanie zachowania pędu (2) stosowane jest przy założeniu ruchu spokojnego w korycie – w przypadku ruchu rwącego stosowane jest równanie w postaci zredukowanej (3):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (3)$$

Stosowanie powyższych równań dozwolone jest przy założeniu jednorodności i nieściśliwości wody oraz niewielkich spadków dna [MIKE 11 2009].

Ze względu na złożoną geometrię przekrojów (terasy zalewowe) w obliczeniach zastosowano promień hydrauliczny liczony na podstawie powierzchni efektywnej (*Effective Area Hydraulic Radius*) i względnych współczynników oporów (*Relative Resistance*).

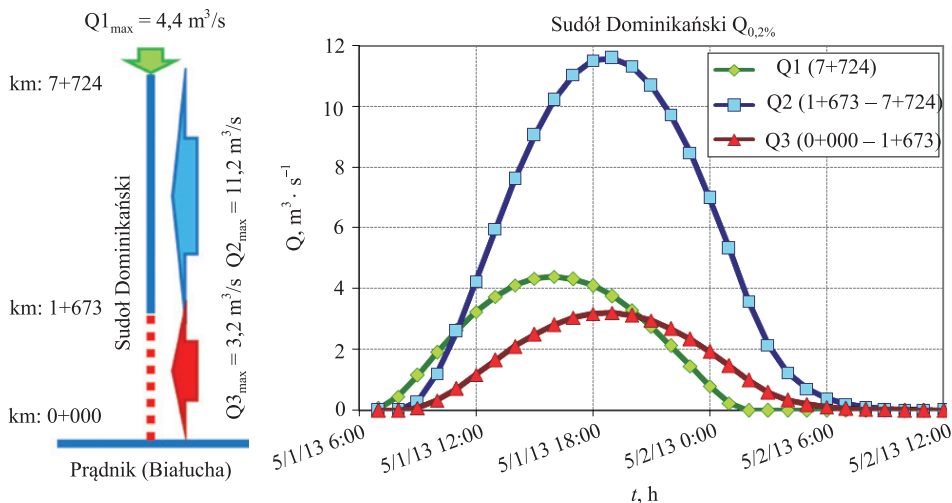
Modelowaniem objęto odcinek Sudołu Dominikańskiego od ujścia (km 0+000) do przekroju w km 7+724 (ryc. 5). Ze względu na to, że potok jest ciekim nieobserwowanym (brak posterunków wodowskazowych) w obliczeniach, jako górny i boczne warunki brzegowe, wykorzystano fale hipotetyczne o wartościach kulminacji odpowiadających przepływowi $Q_{0,2\%}$, opracowane w oparciu o model opad–odpływ w Instytucie Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej. Podejście takie umożliwiło określenie zależności Q-H dla szerokiego zakresu napełnień koryta.

Dopływy boczne rozłożone zadano odrębnie dla części zarurowanej (na odcinku od ujścia do przekroju w km 1+673) i odrębnie dla części korytowej, na pozostałym odcinku (ryc. 5) – w tym pierwszym przypadku dla uwzględnienia licznych odprowadzeń z kolektorów kanalizacji deszczowej.

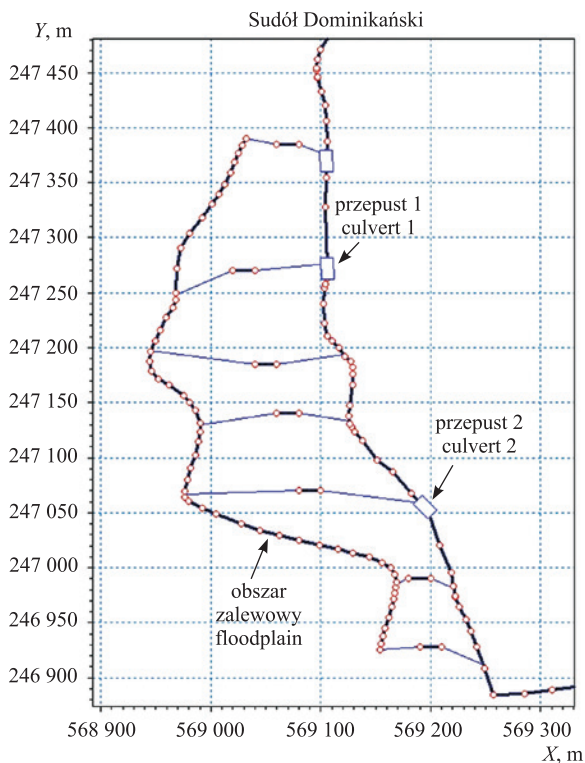
Jako dolny warunek brzegowy wprowadzono rzędną $Z = 204,81$ m n.p.m., tj. rzędną zwierciadła wody w Prądniku, odpowiadającą przepływowi $Q_{1\%}$, uzyskaną z odrębnie wykonanego modelu dla tej rzeki.

Schematyzacji trasy przepływu w planie dokonano z uwzględnieniem możliwości przelania się wody na obszary zalewowe, definiując przy tym połączenia hydrauliczne (*link channel*) z korytem głównym. Przykład schematyzacji terenu zalewowego na obszarze osiedla Prądnik Czerwony pokazano na ryc. 6.

Geometrię kolektora zdefiniowano w modelu za pomocą przekrojów zamkniętych (*closed*). Geometrię obszaru przepływu w części korytowej odwzorowano z wykorzystaniem dolinowych przekrojów geodezyjnych, dokonując jej schematyzacji dla uwzględnienia obszarów zalewowych (*floodplain*), zgodnie z wymogami programu za pomocą odpowiednich markerów korytowych.



Ryc. 5. Schemat warunków brzegowych i hydrogramy fal wejściowych do modelu hydraulicznego Fig. 5. Scheme of boundary conditions and input flow hydrograms for the hydraulic model



Ryc. 6. Schematyzacja obszaru zalewowego w planie Fig. 6. Schematization of floodplain on plan

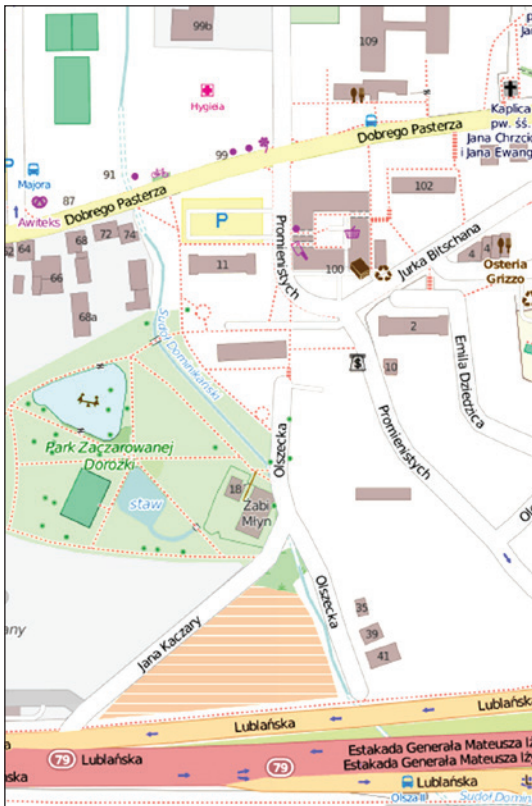
W modelu uwzględniono ogółem 19 obiektów istotnych dla przebiegu transformacji fali wezbraniowej w korycie. Za kluczowe dla kształtowania się poziomu zagrożenia powodziowego na osiedlu Prądnik Czerwony uznano 3 obiekty:

- przepust 1 – przepust pod ul. Dobrego Pasterza,
- przepust 2 – przepust pod skrzyżowaniem ulic Jana Kaczary i Dominikańskiej,
- odcinek zarurowany – kolektor o zmiennym przekroju z wewnętrznymi przepustami wraz z komorami wlotowymi i wylotowymi; uwzględniono także trzy załamania (pod kątem 75–80°) oraz przeszkodę w postaci rury przecinającej poprzecznie kolektor, tworzącej próg o wysokości 50 cm.

WYNIKI OBLICZEŃ MODELOWYCH

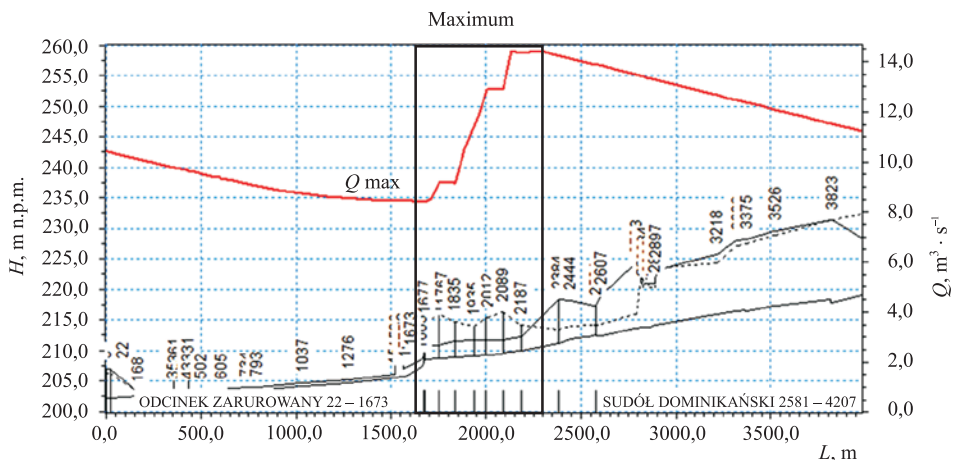
W przypadku cieków niekontrolowanych klasyczna kalibracja i weryfikacja modelu jest niemożliwa. W tej sytuacji dokonano eksperckiej oceny warunków przepływu wody w całym zakresie przepływów. Wartości współczynników szorstkości w przekrojach określono na podstawie informacji o rodzaju pokrycia terenu w poszczególnych punktach pomiarowych, zawartej w dokumentacji geodezyjnej.

Zakres obszaru poddanego analizie przedstawiono na ryc. 7.



Ryc. 7. Zakres analizowanego obszaru
Fig. 7. Range of analyzed area

Na ryc. 8 przedstawiono obwiednię przepływów maksymalnych na długości ciekłu (fragment). Jej przebieg potwierdza, że wybrany do analiz odcinek (ramka na ryc. 8) rzeczywiście charakteryzuje się zwiększonym poziomem zagrożenia powodziowego ze względu na zmniejszoną przepustowość.

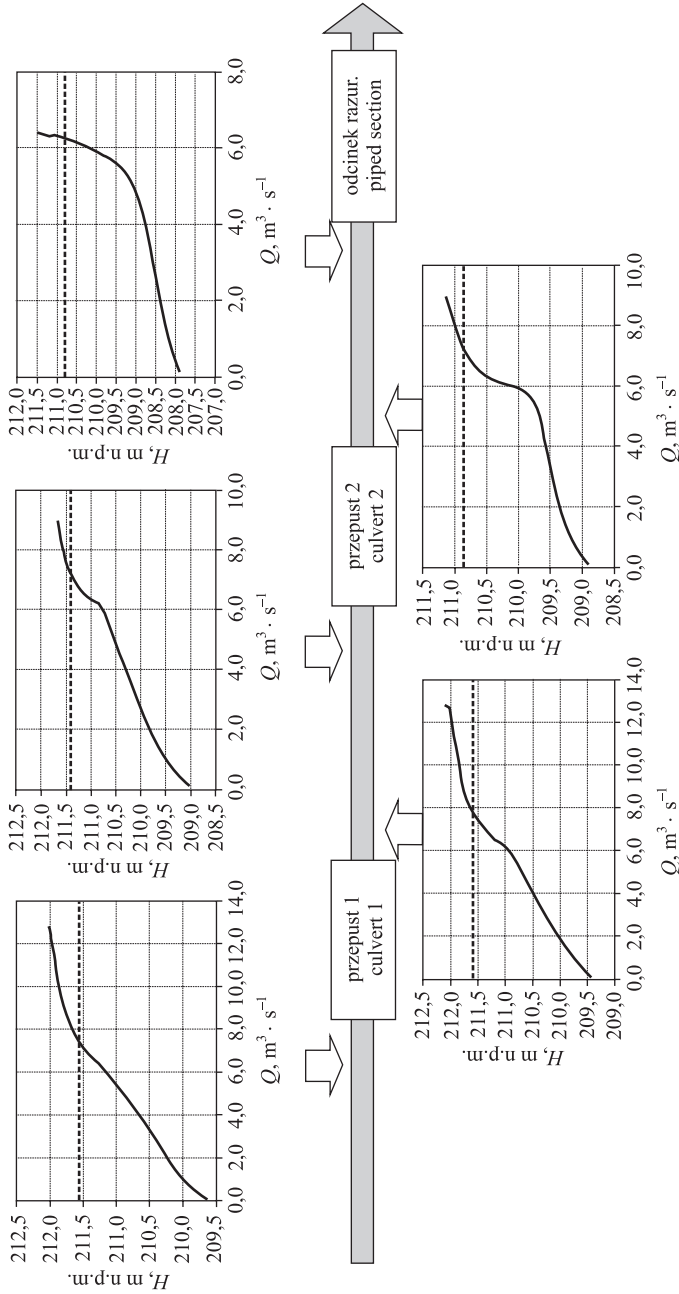


Ryc. 8. Obwiednia przepływów maksymalnych
 Fig. 8. Envelope of maximum flow discharges

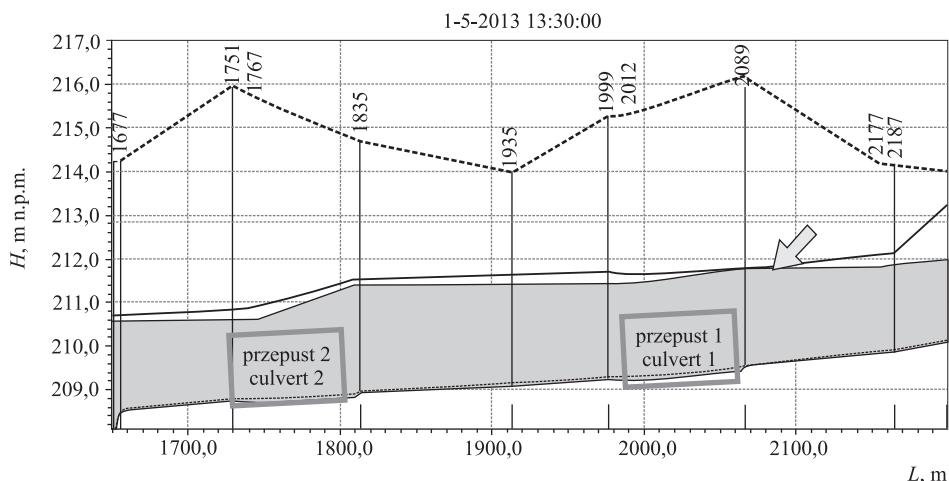
Najmniejszą wartość (ok. $8,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) maksymalny przepływ przyjmuje tu w przekroju przed wlotem do odcinka zarurowanego. Przepływ ten jest jednak osiągnięty już po rozlaniu się wody na obszar zalewowy. Rzeczywista przepustowość będzie zatem mniejsza. Dla jej oszacowania sporządzono krzywe konsumpcyjne i przeanalizowano zmiany ich kształtu w wybranych przekrojach na długości ciekłu, tj. w przekrojach wlotowych i wylotowych przepustów 1 i 2 oraz przekroju wlotowym do odcinka zarurowanego (ryc. 9).

Pozioma przerywana linia wyznacza poziom, przy którym woda zaczyna się wylewać z koryta (rzędna niższego z wysokich brzegów). Przecięcie się krzywych konsumpcyjnych z tą linią wskazuje największy przepływ, który mieści się w korycie, a zatem pozwala określić jego przepustowość. Taka analiza krzywych wskazuje, że najmniejszą przepustowością charakteryzuje się przekrój wlotowy do odcinka zarurowanego (ok. $6,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) – przepustowości pozostałych przekrojów są do siebie zbliżone i nie przekraczają $7,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Z kolei analiza kształtu krzywej konsumpcyjnej pozwala na określenie przepływu, przy którym przestaje on być swobodny. Rosnącym rzędnym zaczynają wtedy odpowiadać coraz mniejsze przyrosty natężenia przepływów, co jest charakterystyczne dla przepływów ciśnieniowych. W przypadku przekrojów wlotowych, odpowiada to zatopieniu wlotu i towarzyszy temu rosnące spiętrzenie powyżej obiektu. Występowanie tego efektu w przekrojach wylotowych wskazuje na to, że znajdują się one w zasięgu oddziaływania spiętrzenia wywołanego przez obiekt poniżej. Potwierdza to profil podłużny zwierciadła wody w chwili przelania się wody w przekroju wlotowym do przepustu 1 (przepust pod ul. Dobrego Pasterza) (ryc. 10).



Rys. 9. Zmiany charakterystyk Q-H na długości analizowanego odcinka
 Fig. 9. Changes of Q-H characteristics along the analyzed section



Ryc. 10. Profil zwierciadła wody
Fig. 10. Water surface profile

W świetle obowiązujących wytycznych dotyczących projektowania przepustów [Rozporządzenie... 2007] w ciekach o spokojnym reżimie przepływu dopuszcza się zarówno przepływ ciśnieniowy w przepuście, jak i spiętrzenie wody w jego górnym stanowisku. Zalecane jest także uwzględnienie wpływu zabudowy już istniejącej na warunki przepływu w projektowanym obiekcie. Wytyczne nie odnoszą się jednak do problemu oddziaływania nowo projektowanego obiektu na warunki przepływu w obiektach już istniejących. Takie oddziaływanie w postaci spiętrzenia ma charakter wsteczny i poprzez zwiększenie głębokości w dolnych stanowiskach obiektów zlokalizowanych powyżej może powodować dodatkowe spiętrzenie w górnych stanowiskach tych obiektów.

W przypadku szeregu obiektów zlokalizowanych w niewielkich odległościach od siebie (jak w rozważanym przypadku) może pojawić się efekt kaskadowy zwiększający zasięg spiętrzenia i jego przyrost – jakkolwiek ilościowe określenie efektów tego typu oddziaływania wymaga dalszych szczegółowych analiz.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza zmian historycznych układu hydrograficznego wykazuje, że wybrany do analiz odcinek potoku Sudół Dominikański charakteryzuje się korytem o silnie zmienionych antropogenicznie warunkach przepływu wód – w dużej mierze jest to koryto ukształtowane sztucznie i ze znaczną ilością obiektów zabudowy technicznej (kolektor, przepusty, mosty, kładki).

Wyniki obliczeń modelowych potwierdzają istnienie realnego zagrożenia osiedla Prądnik Czerwony w Krakowie ze strony Sudółu Dominikańskiego. Na podstawie obliczeń przepustowość koryta na rozważanym odcinku potoku można oszacować na $6,8\text{--}7,8\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ze względu na wstępny charakter oceny wartości te należy traktować orientacyjnie. W praktyce przepustowość może być nawet mniejsza ze względu na kraty

na wlotach, które mogą zatrzymywać niesione wraz z wodą gałęzie i inne przedmioty, dodatkowo blokując w ten sposób światło przepływu i powodując spiętrzenia już przy niższych przepływach.

Analiza przebiegu wezbrania hipotetycznego wskazuje, że bezpośrednim źródłem zagrożenia jest spiętrzenie wody przez przepust pod ul. Dobrego Pasterza. Przy wysokich przepływach spiętrzenie to może być dodatkowo potęgowane przez zatopienie wylotu przepustu wskutek oddziaływania obiektów zabudowy koryta znajdujących się poniżej w niewielkiej odległości, tj. przepustów pod ul. Jana Kaczary i ul. Dominikańską oraz kolektora pod ul. Lublańską. Istnienie innych czynników nie uwzględnionych w modelu może jeszcze dodatkowo zwiększyć to spiętrzenie.

Przedstawiona w artykule wstępna ocena przepustowości odcinka koryta poddanego szczególnie silnej antropopresji pozwala na sformułowanie następujących wniosków ogólnych:

- Silna antropopresja może przyczynić się do obniżenia przepustowości koryt cieków.
- Sprzyja temu szczególnie intensywna zabudowa obiektami, w których dopuszcza się przepływ ciśnieniowy i podpiętrzenie (przepusty), co przyczynia się do wzrostu zagrożenia powodziowego terenów przybrzeżnych.
- Wzrost ten może być potęgowany przez wzajemne oddziaływanie obiektów zlokalizowanych szeregowo w niewielkich odległościach od siebie.
- Oddziaływania takie powinny być brane pod uwagę na etapie projektowania zabudowy koryt w zakresie analiz:
 - wpływu obiektów już istniejących (poniżej obiektu projektowanego) na przepustowość obiektów projektowanych;
 - wpływu obiektów projektowanych na przepustowość obiektów już istniejących (powyżej).

PIŚMIENNICTWO

MIKE 11 (2009). A Modelling System for Rivers and Channels. DHI Denmark.

Nowacka-Rejzner, U. (2011). Małe rzeki i potoki, jako wartość zagrożona i zagrożenie w przestrzeni miejskiej. Na przykładzie potoku Sudół Dominikański w Krakowie. Czas. Techn. 17, Architektura 6-A.

Ortofotomapy Krakowa, <http://mozliwosci.com/krakow/#hybrid,50.095667,19.978959,16>.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie. Dz. U. z 2007 r. Nr 86, poz. 576.

PRELIMINARY ASSESSMENT OF URBAN WATERCOURSE CAPACITY UNDER SIGNIFICANT ANTHROPOGENIC IMPACT

Abstract. The article gives the results of numerical simulation of flood wave routing through an urban riverbed for preliminary evaluation of capacity of its section exposed to strong anthropogenic impact. As a study area the Sudół Dominikański stream (called also Rozrywka) in the area of Krakow was chosen. The numerical calculations were performed basing on 1-D unsteady flow model built using the MIKE 11 by DHI program. In the model

the objects of engineering constructions were included such as: bridges, culverts, piped section and the potential floodplain areas. Due to lack of a gauge stations, the hypothetical waves built basing on the rainfall-runoff model were used as a boundary conditions.

Key words: anthropogenic impact on the environment, riverbed conveyance, 1-D modeling

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: 3.02.2015

Do cytowań – For citation: Lewicki, L. (2015). Wstępna ocena przepustowości koryta cieków miejskich w warunkach silnej antropopresji. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 14(1), 135–147.