

Artykuł naukowy

Analiza zagrożenia powodziowego Kazimierza Dolnego

Flood risk analysis of Kazimierz Dolny

Przemysław Krawczyk, Beata Calka, Elżbieta Bielecka

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji

Abstract

Flooding is one of the most frequent and devastating natural disasters in the world, generating negative impact to people, environment and economy. The paper aims in flood risk modelling and risk assessment based on one-dimensional HEC-RAS model and open data derived from the Head Office of Geodesy and Cartography. The research area covers the small historic city Kazimierz Dolny located on the Vistula River. The research was carried out in three stages. After digital elevation model and river valley elements (e.g. valley cross sections) data acquisition, as well as elaborating a roughness layer based on Manning's indicators, the ten-, one-hundred- and five-hundred-year floods water were modelled. The risk analysis showed that the 100-year flood is already causing quite significant damage to human and cultural assets, and the 500-year flood significantly increases it, destroying 2,016 buildings and flooding an area of almost 207 hectares.

Słowa kluczowe: powódź, ocena zagrożenia, model HEC-RAS, GIS, otwarte dane, Wisła

Keywords: flood, risk assessment, HEC-RAS model, GIS, open data, Vistula

Wprowadzenie

Powódź należy do najczęściej występujących i najbardziej niszczycielskich klęsk żywiołowych na świecie generującym wiele negatywnych skutków społeczno-ekonomicznych i środowiskowych (Taylor et al. 2011). W ostatnich 40–50 latach znacznie wzrosła roczna liczba silnych powodzi i szkód spowodowanych przez podtopienia (Kundzewicz, 2014). Według WHO (Światowa Organizacja Zdrowia) w XXI wieku powodzie wystąpiły prawie we wszystkich krajach Europy, w ich wyniku zginęło ponad dwa tysiące osób, a koszty ekonomiczne usuwania strat szacowano na 70 miliardów Euro (WHO, 2017). W Polsce według Pajewskiej-Kwaśny (2012) aż 98,5% strat

powstałych wskutek klęsk żywiołowych jest spowodowanych przez powódzie, co świadczy o ich sile i znaczeniu. Zagrożenie powodzią dotyczy życia i dobytku ludzkiego oraz zniszczeń infrastruktury na terenie zalanym. Jest ono tym większe im teren jest bardziej zurbanizowany, a jak wiadomo ludzie od wieków osiedlają się blisko rzek, ze względu na dostęp do wody i wynikające z tego liczne korzyści społeczno-gospodarcze.

W minionym trzydziestoleciu w kraju miały miejsce trzy katastrofalne powódzie, w 1997, 2001 i 2010 roku. Powódź opadowa w lipcu 1997 roku, zwana powodzią tysiąclecia, spowodowana była dwiema falami intensywnych opadów. Powódź ta spowodowała największe straty w dorzeczu górnej Odry, gdzie maksymalne stany wody zostały przekroczone o 2-3 m, dorzecze Wisły zostało mniej dotknięte ze względu na mniejsze opady (Kundzewicz et al. 1999). Podczas powodzi w roku 2001 maksymalne przepływy oraz stany wody na Wiśle przekroczyły wartości odnotowane w 1997 roku. Ostatnia duża powódź na Wiśle miała miejsce w 2010 roku, a jej przyczyną były bardzo także intensywne opady w maju i czerwcu. Powódź ta charakteryzowała się wydłużoną, największą od 160 lat falą kulminacyjną, która spowodowała uszkodzenia i pęknięcia wałów pod wpływem nasiąkania. Gmina Wilków zlokalizowana około 10 km od Kazimierza Dolnego, w wyniku przerwania wału została zalana w 90%.

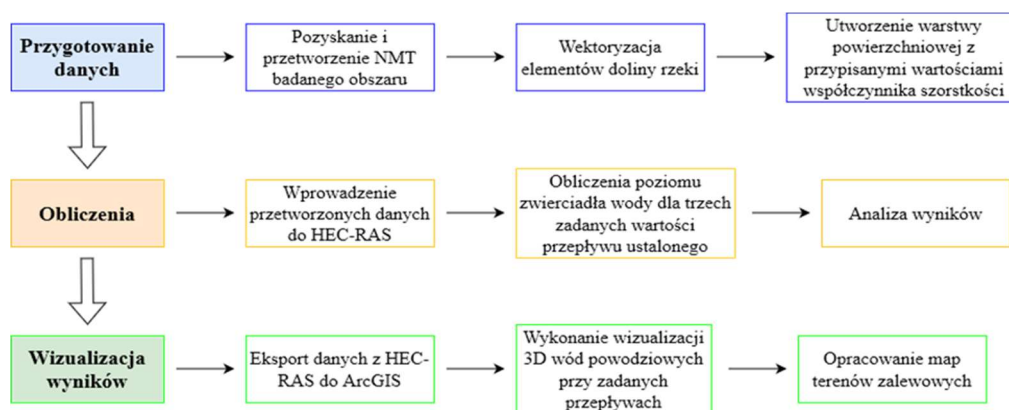
Warto zwrócić uwagę, że po katastrofalnych powodziach, które nawiedziły Polskę w latach 1997 i 2001 powstało kilka ogólnokrajowych inicjatyw dotyczących wzrostu świadomości zagrożenia powodziowego, w tym System Informatyczny Ochrony Kraju przed Ekstremalnymi Zagrożeniami (ISOK). Jednym z prewencyjnych produktów ISOK są mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego udostępniane przez Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie za pomocą przestrzennych serwisów internetowych (ISOK, 2022).

Celem niniejszej publikacji jest opracowanie modelu zasięgu wody powodziowej oraz analiza strat dotyczących budynków i użytków gruntowych w Kazimierzu Dolnym, niewielkim lecz cennym ze względu na liczne zabytki mieście położonym nad Wisłą.

Metoda badań

Do obliczenia przepływów powodziowych i opracowania modelu zwierciadła wody wykorzystano model hydrauliczny HEC-RAS i rozszerzenie HEC-GeoRAS dedykowane do współpracy z programem ArcGIS. HEC-RAS, model opracowany przez US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, jest modelem jednowymiarowym. Podstawowe założenie dotyczy przyjęcia składowej prędkości wody zgodnej z kierunkiem osi rzeki i modelowaniu geometrii obszaru przepływu wody na podstawie przekrojów prostopadłych do kierunku przepływu (Tymków i Stodolak, 2012). Model jest powszechnie wykorzystywany do jednowymiarowego opisu i wizualizacji stref zagrożenia powodziowego (Krawczyk, 2022; Źneš et al. 2020; Bobkowska et al. 2015; Tymków i Stodolak, 2012; Gudowicz, 2008).

Prace badawcze przeprowadzono w trzech etapach, schematycznie pokazanych na rys. 1. Etap przygotowawczy obejmował pozyskanie i przetworzenie do formatu TIN (ang. Triangulated Irregular Network) danych NMT, wektoryzację elementów doliny rzeki (linii: rzeki, nabrzeży rzeki, wału przeciwpowodziowego oraz przekroje poprzeczne doliny) (rys.2).



Rys. 1. Schemat badań (opracowanie własne)



Rys. 2. Geometria doliny rzecznej (opracowanie własne w ArcMap)

Tabela 1. Wartości współczynników Menninga

Rodzaj pokrycia terenu	Współczynnik Menninga
Wody powierzchniowe	0,025
Tereny leśne	0,120
Zabudowa	0,050
Place	0,016
Roślinność trawiasta i grunty orne	0,035

Tabela 2. Wartości przepływów maksymalnych dla wody powodziowej o prawdopodobieństwie wystąpienia co 10 lat, 100 lat, 500 lat)

Prawdopodobieństwo powodzi	Przepływ maksymalny Q_{\max} [m ³ /s]
10% (raz na 10 lat)	4500
1 (raz na 100 lat)	7350
0,2 (raz na 500 lat)	9270

(źródło: Raport 2.0, 2022)

W ramach prac przygotowawczych opracowano także warstwę szorstkości terenu, przyjmując najczęściej wykorzystywane wg. Tymkova i Stodolaka (2012) współczynniki Menninga dla rodzajów pokrycia tereny BDOT10k. Współczynniki te przyjęły wartości zestawione w tabeli 1.

Obliczenia poziomu zwierciadła wody dla trzech przepływów maksymalnych odpowiadających wystąpieniu powodzi o prawdopodobieństwie dziesięcioletnim, stuletnim oraz pięćsetletnim. wykonano w programie HEC-RAS. Wartości przepływów zgodnie z danymi zawartymi w Raporcie z wykonania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego (Raport 2.0, 2022) i przedstawiono w tabeli 2. Parametry modelowania przepływu ustalono na podstawie: spadku dna rzeki, liczby modelowanych przepływów oraz wartości przepływów. Spadek rzeki ustalono na 0,24%, co jest średnim spadkiem lubelskiego odcinka Wisły (Dziechciaż, 2010), jego wprowadzenie umożliwia obliczenie dolnego warunku brzegowego, czyli położenia zwierciadła wody na dolnym końcu opracowywanego fragmentu rzeki.

Obszar badań i wykorzystane dane

Obszar badań obejmuje fragment lubelskiego odcinka Wisły w okolicy Kazimierza Dolnego od 494,0 km do 528,5 km, co przedstawiono na rys. 3. Analizowany teren zajmuje powierzchnię ok. 30 km². W Kazimierzu Dolnym znajdują się liczne obiekty zabytkowe i historyczne, o dużej wadze kulturalnej, w tym ruiny zamku pochodzącego z XIII w., kościół farny św. Jana Chrzciciela i kościół św. Bartłomieja z XVI w.



Rys. 3. Obszar badań (geoportal.gov.pl)

W okolicy Kazimierza Dolnego szerokość doliny Wisły wynosi 1,2 – 1,5 km co stanowi najwęższy odcinek w jej środkowym i dolnym biegu. Na analizowanym odcinku Wisła ma charakter rzeki dzikiej z występującymi wyspami, łachami i mieliznami, które powodują dzielenie się nurtu, nie występują żadne dopływy istotne w ujęciu ogólnym rzeki (Piskozub, 1982), są jednak budowle hydrotechniczne, takie jak wały czy ostrogi. Maksymalne stany na wodowskazach znajdujących się na odcinku lubelskim Wisły podczas wybranych powodzi zestawiono w tabeli 3. Jak podaje Łajczak (2006), budowa wałów przeciwpowodziowych na odcinku Wisły od Zawichostu do Puław w latach 30.–70. XX w. znacznie zmniejszyła zagrożenie powodziowe okolicznych terenów.

Tabela 3. Maksymalne stany wód [w cm]

Wodowskaz	Stan ostrzegawczy [cm]	Stan alarmowy [cm]	Maks. stan wody podczas powodzi 1997 r. [cm]	Maks. stan wody podczas powodzi 2001 r. [cm]	Maks. stan wody podczas powodzi 2010 r. [cm]
Dęblin	400	500	580	624	612
Puławy	450	550	682	720	750
Zawichost	480	620	794	845	873

(źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW)

W modelowaniu obszarów zagrożonych powodzią kluczową rolę odgrywa informacja o ukształtowaniu terenu i pokryciu terenu na co zwracają uwagę m.in. Parvin et al. (2022), Pham et al. (2022) i Bobkowska et al. (2015). Numeryczny model terenu (NMT) oraz dane dotyczące pokrycia i użytkowania terenu są udostępniane bezpłatnie przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii za pośrednictwem krajowego punktu dostępu do danych przestrzennych, geoportal.gov.pl. Dane te stanowią podstawowy zasób Infrastruktury Informacji Przestrzennej. NMT pobrano w formacie Arc/Info ASCII Grid, dane o pokryciu terenu, będące jedną z warstw tematycznych BDOT10k

(Bazy Danych Obiektów Topograficznych) w postaci plików shp. Do analiz wykorzystano ArcGIS z dodatkiem HEC-GeoRAS oraz HEC-RAS.

Wyniki i dyskusja

Model zweryfikowano na podstawie wartości przepływów i głębokości wody dla powodzi 100-letniej udostępnionych na stronie internetowej Wodowskazy Wiślane (<http://ds.prazmow33.pl/wodowskazy/>). Wyniki zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry przepływu i głębokości wody dla wodowskazu Kazimierz Dolny

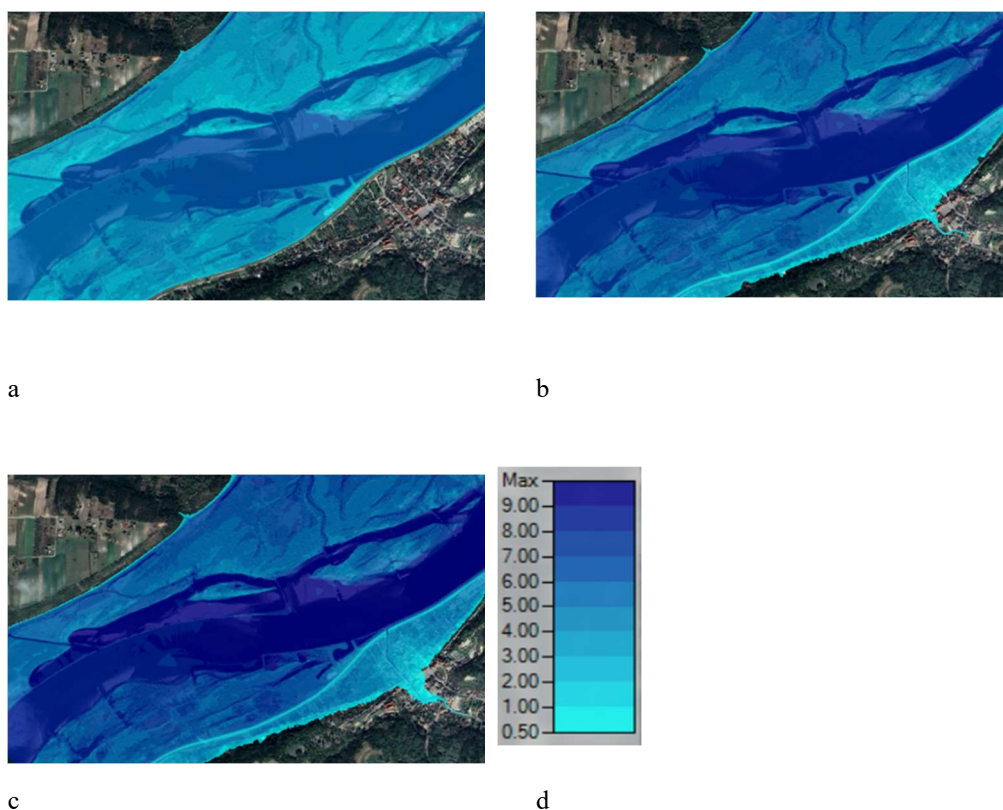
Powódź	Przepływ [m ³ /s]	Wskazanie wodowskazu [cm]	Głębokość wody (model) [cm]	Różnica głębokości [cm]
22.07.1970	6460	675	687	12
28.07.1980	6580	679	693	14
29.07.2001	7550	720	740	20

(Źródło: opracowanie własne)

Różnica w głębokości wody odnotowanej na wodowskazach i obliczonej w wyniku modelowania wynosi do 1,78% dla powodzi z 1970 i 2,78% dla tej z roku 2001. Otrzymane wartości na podstawie literatury przedmiotu można uznać za zadowalające (Pathan i Agnihotri, 2019; Magnuszewski i Gutry-Korycka, 2009).

Przy przepływie wynoszącym 4500 m³/s (rys. 3a) woda nie przekroczy linii wałów przeciwpowodziowych i zaleje obszar 162,43 ha. Największa odnotowana głębokość wyniesie 6,8 m. Zalane zostaną głównie tereny o charakterze zadrzewionym gdzie zwierciadło wody znajdzie się od 2 do 4 m ponad powierzchnią terenu. W okolicy portu tafla wody osiągnie 1,7 m nad terenem, gdzie podtopieniu ulegnie zabudowa jednorodzinna.

Przepływ maksymalny o wartości 7350 m³/s (rys. 3b) charakteryzuje się największą głębokością wody na poziomie 8,5 m w obrębie koryta rzeki, zwiększa się także powierzchnia zlane, która wynosi 202,71 ha. Woda przekroczy linię wałów i zaleje zabudowę Kazimierza Dolnego wdzierając się na wysokości portu 250 m w głąb miasta, nie docierając jednak do rynku. Najbardziej ucierpi zabudowa jednorodzinna oraz hotelowa. Dotknięte zostaną obszary zabudowane znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie prawego koryta rzeki. Tafla wody na zalanych terenach zabudowanych znajdzie się od 1,5 do 3 m ponad powierzchnią terenu. Woda stuletnia zaleje 87 budynków jednorodzinnych, 28 gospodarczych, 25 hoteli oraz 24 mieszkalnych wielorodzinnych. Zalane zostaną również obiekty cenne kulturowo takie jak Kamienica Celejowska (siedziba Muzeum Nadwiślańskiego) oraz Spichlerz Feistersteina. Powódź dotknie także obiekty użyteczności publicznej, dworzec autobusowy oraz dwie szkoły. Łącznie zostanie zalanych 187 budynków.



Rys. 4. Modele zasięgu powodzi dla przepływów maksymalnych: a) $Q_{\max,p10\%}=4500$ m³/s, c) $Q_{\max,p1\%}=7350$ m³/s, c) $Q_{\max,p0,2\%}=9270$ m³/s wraz z głębokością wody w m (Krawczyk, 2022)

Głębokością maksymalną na poziomie 9,5 m charakteryzuje się przepływ wynoszący 9270 m³/s, o najmniejszym prawdopodobieństwie wystąpienia (rys. 3c). Przy takim poziomie woda przedostanie się do 100 m dalej w zabudowę miasta, w porównaniu do wody stuletniej, zalane zostaną okolice ulic Senatorskiej i Nadrzecznej. Na rynku tafla wody znajdzie się na wysokości 0,3 m nad powierzchnią terenu. W pobliżu ulic Krakowskiej i Sadowej osiągnie 4 m nad terenem. Całkowita powierzchnia zalana dla powodzi 500-letniej wyniesie 206,92 ha. Zalana zostanie nie tylko zabudowa jednorodzinna ale także wielorodzinna. W wyniku powodzi 500-letniej liczba potencjalnie narażonych budynków wzrośnie do 216. Głównie zwiększy się liczba zagrożonych budynków mieszkalnych: jednorodzinnych do 95 oraz wielorodzinnych do 36. W porównaniu do wody stuletniej do obiektów cennych kulturowo zagrożonych powodzią dołączą dodatkowo dwa budynki muzeów Spichlerz Ulanowskich (Muzeum Nadwiślańskie) oraz Biuro Muzeum Przyrodniczego.

Jak zauważa Łajczak (2006) prace regulacyjne na lubelskim odcinku Wisły spowodowały zmniejszenie szerokości koryta rzeki, czego efektem są duże zmiany współczynnika zwartości

(iloraz szerokości i średniej głębokości koryta), decydującego o prędkości przepływu wód korytowych. Konsekwencją tych prac regulacyjnych było także większe zagrożenie powodziowe (Łajczak, 2006). Poza kształtem koryta rzeki na wielkość obszarów zalania mają wpływ pokrycie i ukształtowanie terenu (Parvin et al. 2022; Pathan et al. 2022; Magnuszewski i Gutry-Korycka 2009). W wykonanych analizach informacje o pokryciu terenu pozyskano z BDOT10k, czyli z dokładnością odpowiadającą skali mapy 1:10 000, przyjmując jedną wartość współczynnika szorstkości Menninga dla poszczególnych rodzajów pokrycia (patrz tabela 1) co niewątpliwie miało wpływ na wynik końcowy. Chcąc zwierzyć dokładność analiz należałoby przyjąć mniejszy stopień generalizacji pokrycia terenu, korzystając na przykład z danych ewidencyjnych lub klasyfikacji obrazów satelitarnych.

Podsumowanie i wnioski

Wykonane badania potwierdzają skuteczność kombinacji oprogramowania ArcGIS i HEC-RAS w modelowaniu powodzi. Opracowany model można wykorzystać do prognozowania stanu wody oraz zasięgu fali powodziowej i tym samym oszacować wielkość strat przy założonym przepływie maksymalnym. Otrzymane wyniki odnoszą się do wód powodziowych o prawdopodobieństwie wystąpienia dziesięcioletnim, stuletnim oraz pięćsetletnim i obrazują w jakim stopniu miasto Kazimierz Dolny zagrożone jest wystąpieniem powodzi. Mimo zabezpieczenia przeciwpowodziowego w postaci wałów przy wysokim stanie wód, jaki towarzyszy największym powodziom, woda przedostanie się do miasta i stanowić będzie zagrożenie dla licznych budynków i dziedzictwa kulturowego.

Podziękowania

W artykule wykorzystane zostały badania wykonane w ramach pracy inżynierskiej P. Krawczyka pt. 'Opracowanie mapy i wizualizacji obszarów zalewowych', obronionej na Wydziale Inżynierii Lądowej (WIG) Wojskowej Akademii Technicznej (kierunek: geodezja i kartografia) w styczniu 2022. Badania te następnie zostały poszerzone w trakcie magisterskich studiów indywidualnych kontynuowanych na WIG WAT.

Literatura (References)

- Bobkowska, K., Cur, M., Piask, A. 2015: *Przetwarzanie i analiza danych z wykorzystaniem metod geodezyjnych na potrzeby opisu środowiska wodnego*. Wydawnictwo Polskiego Internetowego Informatora Geodezyjnego, seria GEOMATYKA. Dostępne on-line: <http://www.geomatyka.eu/publikacje/isbn9788393460922/isbn9788393460922.pdf> (dostęp 28.11.2022).
- Całka, B., Nowak Da Costa, J., Bielecka, E. 2017: Fine scale population density data and its application in risk assessment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 8:2, 1440-1455, DOI: 10.1080/19475705.2017.1345792

- Dziechciarz M. 2010: Historyczne powódzie na Wiśle Lubelskiej w świetle znaków i tablic wielkich wód. Praca magisterska, promotor Grześ M., Toruń 2010, Uniwersytet Mikołaja Kopernika.
- Gudowicz, J. 2008: Metoda modelowania zasięgu wód wezbraniowych na równinie zalewowej na przykładzie doliny Parsęty. *Landform Analysis* 8: 29–32.
- ISOK, <https://www.isok.gov.pl/hydroportal.html>
- Krawczyk, P. 2022: Opracowanie mapy i wizualizacji obszarów zalewowych. Praca inżynierska, Wydział Inżynierii Lądowej Wojskowej Akademii Technicznej, kierunek: geodezja i kartografia.
- Kundzewicz, W.Z. 2014: Adapting flood preparedness tools to changing flood risk conditions: the situation in Poland. *Oceanologia* 56(2):385–407. doi:10.5697/oc.56-2.385
- Kundzewicz, Z.W., Szamalek, K., Kowalczyk, P. 1999: The Great Flood of 1997 in Poland. *Hydrological Sciences Journal* 44:6, 855-870, DOI: 10.1080/02626669909492285.
- Magnuszewski, A., Gutry-Korycka, M. 2009: Rekonstrukcja przepływu wielkich wód Wisły w Warszawie w warunkach naturalnych. *Prace i studia geograficzne* 43: 141-151.
- Łajczak, A. 2006: Regulacja rzeki a zagrożenie powodziowe, na przykładzie Wisły między Skoczowem a Puławami. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4/1: 197-215.
- Pajewska-Kwaśny, R., 2012: Zagrożenie katastrofami naturalnymi w Polsce. *Wiadomości Ubezpieczeniowe* 3, 77–86.
- Parvin, F., Ali, S.A., Calka, B., Bielecka, E., Linh, N.T.T., Pham, Q.B. 2022: Urban flood vulnerability assessment in a densely urbanized city using multi-factor analysis and machine learning algorithms. *Theor Appl Climatol* 149, 639–659 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04068-7>
- Pathan, A. I., Agnihotri, P. G. 2019: A Combined Approach For 1-D Hydrodynamic Flood Modeling By using Arc-Gis, Hec-Georas, Hec-Ras Interface A Case Study On Purna River Of Navsari City, Gujarat. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 8(1):1410-1417.
- Pham, Q. B., Ali, S. A., Bielecka, E., Calka, B., Orych, A., Parvin, F., Łupikasza, E. 2022: Flood vulnerability and buildings' flood exposure assessment in a densely urbanised city: comparative analysis of three scenarios using a neural network approach. *Natural Hazards*, 1-39.
- Piskozub, A. (Ed.). 1982: *Wisła: monografia rzeki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łącznością.
- Raport 2.0. 2022: Raport z wykonania przeglądu i aktualizacji map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie, raport z projektu Przegląd i aktualizacja map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego POIS.02.01.00-00-0013/16.
- Taylor, J., Man Lai, K., Davies, M., Clifton, D., Ridley, I., Biddulph, P. 2011: Flood management: prediction of microbial contamination in largescale floods in urban environments. *Environ Int* 37(5):1019–1029.
- Tymków, P.1., Stodolak, R. 2012: Sposoby reprezentacji danych geoprzestrzennych w systemach modelowania hydrodynamicznego przepływów powodziowych. Sympozjum Europejskie – Współczesne Problemy Ochrony Przeciwpowodziowej Paryż – Orlean 28-30.03.2012.

- Üneş, F., Ziya Kaya, Y., Varçin, H., Demirci, M., Taşar, B., Zelenakova, M. 2020: Flood Hydraulic Analyses: A Case Study of Amik Plain, Turkey. *Water* 12, 2070. <https://doi.org/10.3390/w12072070>
- WHO. 2017: *Flooding: managing health risks in the WHO European Region*. WHO Regional Office for Europe. Dostępne on-line: <https://www.who.int/publications/i/item/flooding-managing-health-risks-in-the-who-european-region> (dostęp 28.11.2022).

Streszczenie

Powodzie to jedna z najczęstszych i najbardziej niszczycielskich klęsk żywiołowych na świecie, które mają negatywny wpływ na ludzi, środowisko i gospodarkę. Artykuł ma na celu modelowanie i ocenę ryzyka powodziowego wykorzystując jednowymiarowy model HEC-RAS oraz otwarte dane udostępniane przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Obszar badań obejmuje Kazimierz Dolny położony nad Wisłą. Badania przeprowadzono w trzech etapach. Po pozyskaniu danych z numerycznego modelu terenu i elementów doliny rzecznej (np. przekrojów poprzecznych doliny) oraz opracowaniu warstwy szorstkości na podstawie wskaźników Manninga, wymodelowano wody wezbraniowe dla powodzi dziesięcio-, stu- i pięćset letniej. Analiza ryzyka wykazała, że powódź 100-letnia powoduje już dość znaczne szkody w dobrach ludzkich i kulturowych, a powódź 500-letnia znacznie je powiększa, niszcząc 2016 budynków i zalewając obszar o powierzchni niemalże 207 ha.

Dane autorów / Authors details:

inż. Przemysław Krawczyk

przemyslaw.krawczyk@student.wat.edu.pl

dr inż. Beata Całka

ORCID 0000-0002-7147-0849

beata.calca@wat.edu.pl

prof. dr hab. inż. Elżbieta Bielecka

ORCID 0000-0003-3255-1264

elzbieta.bielecka@wat.edu.pl

Przesłano / Received	22.11.2022
Zaakceptowano / Accepted	22.12.2022
Opublikowano / Published	30.12.2022



© Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

