INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 3/III/2012, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 123–134
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Robert Banasiak

WYKORZYSTANIE TECHNIK GIS I NUMERYCZNYCH MODELI HYDRODYNAMICZNYCH DO OCENY ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO

USE OF GIS TECHNICS AND NUMERICAL HYDRODYNAMIC MODELS FOR FLOOD HAZARD ASSESSMENT

Streszczenie

W ramach projektu pt. Informatyczny System Osłony Kraju przed Zagrożeniami (ISOK) realizowane są działania zmierzające do określenia stref (map) zagrożenia i ryzyka powodziowego. Jednym z głównych elementów tych działań jest modelowanie hydrodynamiczne, tj. utworzenie modeli 1D dla rzek o dużym lub znacznym potencjale powodziowym. W szczególnych przypadkach, zwłaszcza dla aglomeracji miejskich, wskazane jest zastosowanie modeli dwuwymiarowych (2D). Artykuł przybliża obecne możliwości tworzenia i zastosowania numerycznych modeli hydrodynamicznych. Omówione zostaną dane wraz z ich przetwarzaniem oraz oprogramowanie służące obliczeniom i prezentacji danych. Szczególną rolę mają dane geoprzetrzenne w postaci numerycznych modeli terenu (NMT), pozyskiwane nowoczesnymi metodami aerooptycznymi oraz dwuwymiarowe modele hydrodynamiczne, czemu poświęcone zostanie więcej miejsca. Artykuł przedstawia także model hydrodynamiczny 2D odwzorowujący przebieg wezbrania (wraz z awarią zbiornika Niedów) na Nysie Łużyckiej w 2010 r.

Słowa kluczowe: GIS, modele hydrodynamiczne 1D i 2D, mapy zagrożenia powodziowego

Summary

In the frame of a country-scale project "IT system for protection against extraordinary hazards" (ISOK), tasks aiming at the development of flood risk maps are realized. The major activity related is the creation of hydrodynamic models (1D) for rivers with significant flooding potential. For certain conditions, especially for urban areas a 2D modelling is recommended and will also be applied. The paper presents the current methodological background and the feasibility of numerical hydraulic modelling. Data resources and their processing along with software for numerical computation and results visualisation will be outlined. A focus will be given to the geoinformation data, in particular to air-born Digital Elevation Models (DEM) and 2D hydrodynamic modelling tools. Finally, a 2D hydrodynamic model for the Nysa Łużycka simulating the passage of flood in 2010, influenced by the failure of the Niedów Dam, will be presented as well.

***Key words**: GIS, 1D and 2D hydrodynamic models, flood hazard maps*

WSTĘP

Podczas gdy ruch wody w korytach otwartych został już stosunkowo dawno dobrze opisany, zastosowanie i rozwiązywanie równań matematycznych tego opisu napotykało w praktyce ograniczenia. W ciągu ostatnich trzech dekad sytuacja uległa zmianie. Rozwój technik pomiarowych, oprogramowania oraz wzrost szybkości obliczeniowej popularnych komputerów i pojemności dysków twardych daje nowe możliwości pozyskiwania, przetwarzania i gromadzenia danych. Szczególnie w ostatnich kilku latach postęp jest najbardziej znaczący ze względu na zastosowanie wysoce produktywnych aerooptycznych systemów pomiarowych ukształtowania i pokrycia terenu. Z tym idą w parze platformy programów komputerowych do przetwarzania i wizualizacji danych, jak np. ArcGIS. Również oprogramowanie w zakresie modelowania hydrodynamicznego podlega rozwojowi i staje się coraz bardziej zaawansowane i wydajne.

Niedawno powołane w ramach projektu pt. Informatyczny System Osłony Kraju przed Nadzwyczajnymi Zagrożeniami (ISOK), m.in. w celu realizacji dyrektywy wodnej EU, Centra Modelowania Powodziowego (CMP) czerpią i wdrażają najnowsze osiągnięcia techniki w zakresie pozyskiwania danych topograficznych, ich obróbki i wykorzystania z użyciem zaawansowanych modeli hydrodynamicznych. Zadaniem CMP jest gromadzenie danych i budowa modeli numerycznych zdolnych do realistycznego odwzorowania przepływów w korytach rzek i ich dolinach w ruchu ustalonym i nieustalonym, na potrzeby określenia stref zagrożenia i ryzyka powodziowego, w przyszłości także na użytek prognoz hydrologicznych i hydraulicznych.

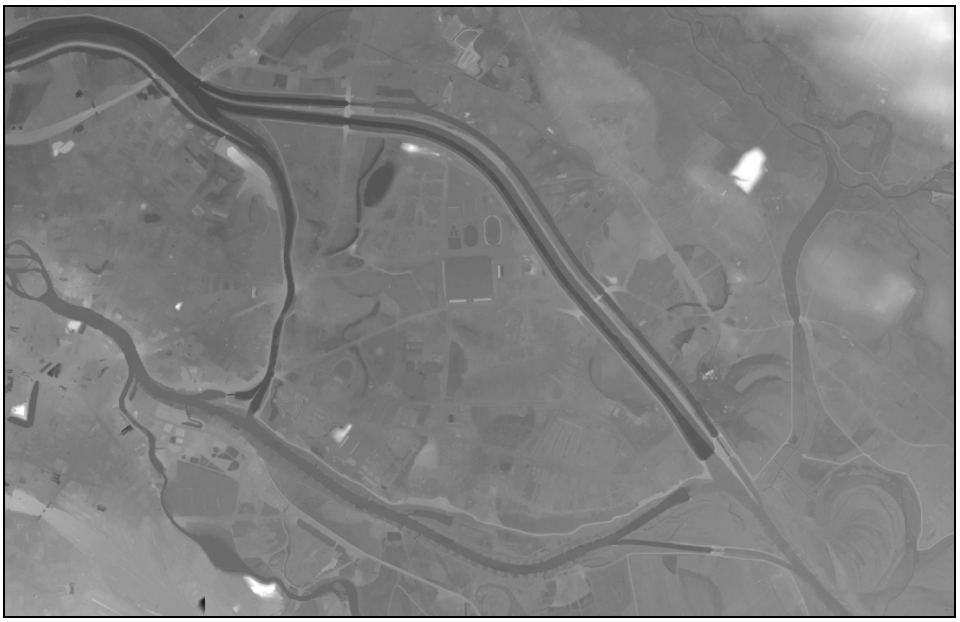
Celem niniejszego artykułu jest omówienie zasadniczych aspektów modelowania numerycznego powodzi (dot. danych, narzędzi i wyników), przybliżenie możliwości w tym zakresie, gdyż obecnie można modelować więcej, szybciej i dokładniej.

MODELOWANIE RUCHU USTALONEGO I NIEUSTALONEGO

Trudnym do osiągnięcia celem, szczególnie w złożonej konfiguracji korytowej i doliny, jest, aby model hydrodynamiczny poprawnie odwzorowywał przepływ zarówno w ruchu ustalonym jak i nieustalonym. Model hydrodynamiczny symulujący ruch ustalony (dQ/dt=0) powinien właściwie określać przepustowość koryta i doliny rzecznej podczas wezbrań, natomiast do poprawnej analizy ruchu nieustalonego musi także właściwie ujmować retencję dolinową. Częstą praktyką, ujętą również w wymogach unijnych, jest tworzenie stref zagrożenia zalewem dla przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia, przy założeniu ruchu ustalonego. Jednak na pewnych obszarach powierzchnie zalewu mogą znacznie się różnić w sytuacji, gdy wezbranie z przepływem maksymalnym o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia, np. 1%, trwa 1-6 godz. lub gdy utrzymuje się nieprzerwanie (wg definicji ruchu ustalonego). Modele hydrauliczne powinny zatem być budowane i opierane na rzeczywistych bądź hipotetycznych falach wezbraniowych. To nakłada zdecydowanie wyższe wymogi co do ilości i jakości danych, budowy modelu (reprezentacji/schematyzacji geometrycznej) i jego tarowania. Wiąże się to oczywiście ze znacznie wyższymi nakładami pracy. Opis oporów ruchu stanowi odrębny i szeroki temat. Szczególnie utrudniającym odwzorowanie przepływów wody tak w korycie głównym jak i na terenach zalewowych jest nieliniowość oporów ruchu, tj. zmienność wraz z napełnieniem i prędkością przepływu (Verhoeven i in., 2005). Wyznaczanie współczynników szorstkości do modelu określających opory przepływu wiąże się z wiedzą z zakresu hydrauliki, reprezentacją geometryczną cieku, jakością danych hydrologicznych i wreszcie doświadczeniem modelującego.

DANE UKSZTAŁTOWANIA I POKRYCIA TERENU

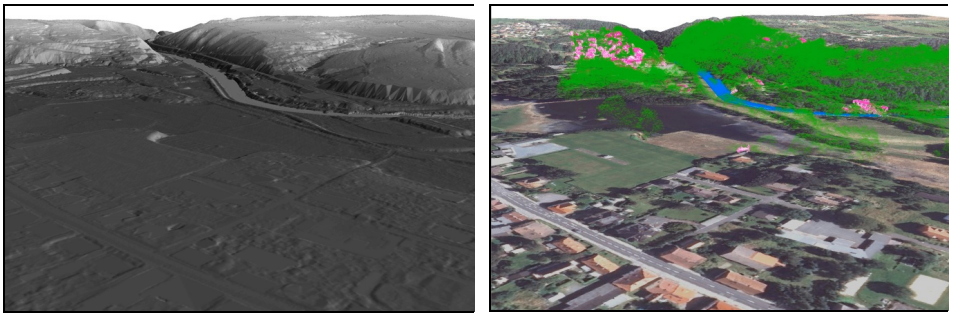
Olbrzymi postęp i ułatwienie w modelowaniu powodziowym wprowadziły nowe techniki pozyskiwania danych pokrycia i ukształtowania terenu z powietrza. Od kilku lat dostępne są ortofotomapy, np. online na www.geoportal.pl. Obrazy te pozwalają na ocenę uwarunkowań przepływu wód w dolinie rzeki, co w znacznej mierze lub całkowicie pozwala zastąpić wizje lokalne lub korzystania z map topograficznych. Fotografie z powietrza pozwalają na ocenę ukształtowania morfologicznego rzek, określenie pokrycia roślinnego i użytkowania przez człowieka, lokalizacji/inwentaryzacji zabudowy hydrotechnicznej, komunikacyjnej i innej mogącej mieć wpływ na warunki przepływu i zasięgu zalewów. Obecnie opracowuje się dokładniejsze i kolorowe ortofotomapy z rozdzielczością rastra poniżej 0,5 m.



Rysunek 1. Numeryczny model terenu dla Wrocławia
Figure 1. Digital Terrein Model for Wrocław

Nowością, na tak dużą skalę, w zasobach geodezyjnych naszego kraju są numeryczne modele terenu (NMT, ang. DTM lub DEM). Obecnie w ramach wspomnianego projektu ISOK dokonuje się lotniczego laserowego skanowania (metodą LIDAR), dużej powierzchni kraju (ok. 60 %), w pierwszej kolejności wzdłuż tras głównych cieków. Prace są zaawansowane. W ich wyniku powstają cyfrowe zasoby dot. ukształtowania terenu o wysokiej jakości, tj. wielkości rastra rzędu 0,5-1,0 m oraz dokładności określenia rzędnej terenu dochodzącej do kilku centymetrów. Przykład, część NMT dla Wrocławia, przedstawiony jest na rysunku 1. Powstają dodatkowo warstwy ujmujące zabudowę (budynki), roślinność (drzewa, lasy), które można ze sobą łączyć (rys. 2).

NMT terenu stanowi szczególnie cenną bazę informacji topograficznej, która jest wykorzystywana nie tylko do tworzenia modeli 1D, poprzez generowanie przekroi poprzecznych doliny rzeki, wyznaczania tras potencjalnego przepływu i obszarów/objętości retencji, ale pozwala także na tworzenie szczegółowych modeli hydrodynamicznych 2D. Należy dodać, iż obecnie realizuje się także geodezyjne pomiary geometrii korytowej rzek, będące uzupełnieniem NMT. Więcej o pomiarze geometrii korytowej, jej generowaniu w przestrzeni 3D i łączeniu z NMT na potrzeby modelowania 2D można znaleźć w niniejszym zeszycie (Zdralewicz i in. 2012).



Rysunek 2. Numeryczny model terenu bez i z warstwami pokrycia terenu
Figure 2. Digital Terrain Model without and with land cover layers

PRZETWARZANIE DANYCH W ŚRODOWISKU ARCGIS

Platformą komputerową do zestawienia, obróbki i wizualizacji danych jest powszechne już środowisko ArcGIS. Oprogramowanie to jest niezwykłe pomocne w modelowaniu powodziowym ze względu na możliwość nakładania na siebie warstw odnoszących się do różnych danych, zarówno tych starszych, tradycyjnych (zdygitalizowanych), jak i wyników nowych pomiarów (NMT) i danych hydrologicznych. Zestawienie i wizualizacja (w różnej skali) na podkładzie map topograficznych lub ortofotomap, a szczególnie MNT, informacji o obszarach zalewów historycznych, budowlach wodnych, różnych danych geodezyjnych (przekroi poprzecznych), tras cieków, kilometrażu historycznego, obliczeniowego i inne jest niezwykle pomocne w trakcie budowy, parametryzacji, analizie wyników i zarządzania modelem. Oprogramowanie ArcGIS służy także do wyznaczania i graficznej prezentacji (2D i 3D, także dynamicznie) obszarów zalewów na podstawie obliczonych modelami 1D i 2D rzędnych zwierciadła wody.

PLATFORMA MODELOWANIA MIKE

Poniżej omówiono elementy pakietu MIKE od DHI (Danish Hydraulic Institute), które są wykorzystywane na potrzeby modelowania powodziowego. Wskazano na niektóre cechy oprogramowania i aspekty wiążące się z ich praktycznym wykorzystaniem.

MIKE11.

Ten jednowymiarowy model rozwiązuje równania Saint-Venanta od postaci uproszczonej (model kinematyczny) do ogólnej (w pełni dynamiczny, także

wyższego rzędu - „high order fully dynamic") wykorzystując w odróżnieniu od większości modeli 1D nie schemat Preissmana, ale Abbota-Ionescu (naprzemienne węzły H i Q). Pozwala na budowę sieci rzecznej, także wydzielenie odrębnego koryta przepływowego na terenie zalewowym i połączenia go za pomocą tzw. „linków" z korytem głównym (działających na zasadzie przelewów). Jest to pomocne, a nawet konieczne w przypadkach, gdy tereny zalewowe znajdują się w poniżej brzegów koryta właściwego, czy też długość trasy koryta właściwego jest znacznie większa od długości doliny (meandrowanie). Tego typu schematyzację, za pomocą sieci kanałów, określa się czasem mianem quasi 2D. Należy pamiętać, iż modelowanie 1D tego typu najlepiej się sprawdza jedynie w przypadku wyraźnie określonych strumieni przepływu. MIKE11 posiada ponadto wiele funkcji określających warunki brzegowe, zasilania i odprowadzania wody z modelu oraz dot. budowli wodnych. Te ostatnie jednak nie zawsze dają właściwą reprezentację hydrauliczną, np. w przypadku jazów wieloprzęsłowych. Więcej o możliwościach i ograniczeniach pakietu modelowania 1D można znaleźć u DHI oraz np. w pracy Toombes i Chanson [2011].

MIKE21, MIKE21FM.

W sytuacjach złożonego ukształtowania topograficznego rzeki i jej doliny, lub w obszarze zurbanizowanym, gdzie modele 1D wymagają zbyt wiele założeń dot. kierunków przepływu i tworzenia się stref retencji, zasadnym lub jedynym praktycznym rozwiązaniem może być modelowanie dwuwymiarowe 2D (Erlich, 2008). MIKE21 oblicza przepływ wód o swobodnym zwierciadle z uśrednieniem w pionie prędkości przepływu rozwiązując równania zachowania masy i pędu w kierunkach poziomych. MIKE21 daje możliwość rozwiązywania powyższych równań w przypadkach różnych oddziaływań i uwarunkowań, takich jak konwekcja i dyspersja (poprzeczna), odziaływanie wiatru, uwzględnienie siły Coriolisa. Opcje modelowania hydrodynamicznego obejmują m.in. także procedurę „flood and drying", czyli włączania i wyłączania komórek zalewanych i wysychających, „sink and sources", tj. możliwość lokalnego lub powierzchniowego doprowadzania i odprowadzania wody do/z modelu z zachowaniem masy i pędu oraz wprowadzenie podstawowych budowli wodnych.

MIKE21 początkowo był kierowany do obliczeń symulacyjnych wód morskich i estuariów, gdzie panuje ruch wolnozmienny (o niskiej liczbie Froude'a). W ostatniej dekadzie poczyniono jednak wiele usprawnień w rozwiązaniach hydrodynamicznych modelu zwiększających jego przydatność do modelowania przepływów w rzekach, w obszarach miejskich oraz propagacji fali na rozległych terenach płaskich, przy przelewaniu się wód przez przeszkody lokalne lub symulacji przepływu na terenie o dużym spadku, także początkowo suchym. Obecnie MIKE21 jest w stanie radzić sobie z wysokimi liczbami Froude'a, a nawet z przepływem superkrytycznym. Dobrze odtwarza tworzenie się płaskich ruchów wirowych w płaskim ukształtowaniu terenu. MIKE21 oznacza się

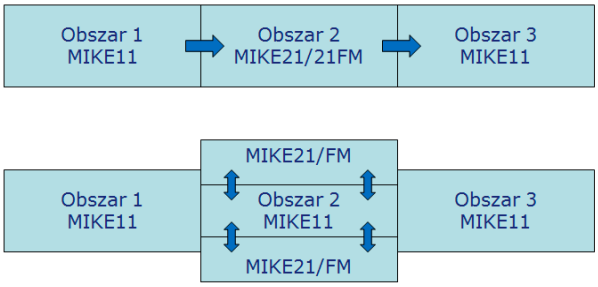
stosunkowo dobrą stabilnością obliczeń. Generalnie wymogiem poprawnego tworzenia modelu 2D jest relatywne dostosowanie wielkości komórki obliczeniowej, wielkości modelowanego obszaru, kroku czasowego obliczeń oraz okresu symulacji, biorąc pod uwagę możliwości sprzętowe (obecnie wieloprocesorowe prowadzenie obliczeń przyśpiesza symulacje).

Hydrograficznymi warunkami brzegowymi mogą być stałe bądź zmienne (w czasie i przestrzeni) przepływy lub stany wody. Podobnie dla wspomnianych już „sink and sources", które mogą się znaleźć w dowolnej części modelu. Model pozwala także na założenie początkowego układu zwierciadła wody. Nie toleruje jednak komórek suchych na granicy modelowanego obszaru. W modelu 2D problematyczna może być geometryczna reprezentacja cieków, których koryto jest stosunkowo nieduże w stosunku do wielkości komórki obliczeniowej. Szczególnie istotne zniekształcenia mogą wystąpić, gdy koryto przebiega pod kątem do ortogonalnej siatki modelu.

Lepiej z tym problemem może radzić sobie MIKE21FM ('Flexible Mesh'), budowany na bazie trójkątnej lub czworobocznej siatce batymetrii o zmiennym rozmiarze, która może być lepiej dopasowana do charakterystyki topograficznej i korytowej, z zagęszczeniem ilości elementów obliczeniowych w hydraulicznie istotnych obszarach. Pociąga to za sobą większą złożoności budowy (i modyfikacji) batymetrii modelu, a szereg innych cech (zalet i wad), na obecnym etapie rozwoju oprogramowania nie przesądza jeszcze o lepszym potencjale hydraulicznej (także geometrycznej) reprezentacji i praktycznym jego wykorzystaniu. Wybór pomiędzy MIKE21 i MIKE21FM zależny jest od modelowanej rzeczywistości. Wadą modelowania 2D pozostaje wciąż jego czasochłonność i duże wymogi dla oprogramowania i sprzętu.

MIKE FLOOD

DHI wprowadziło także możliwość łączenia modeli 1D i 2D. Rysunek 3 przedstawia dwa podstawowe warianty tych połączeń.



Rysunek 3. Podstawowe schematy modelu MIKE FLOOD
Figure 3. Basic schemes for MIKE FLOOD models

W pierwszym schemacie pewien obszar (np. teren zurbanizowany) może być objęty modelem 2D i połączony za pomocą tzw. ”standard link” z modelem 1D, tak od strony dopływu jak i odpływu. W drugim schemacie modelowane w MIKE21 są jedynie tereny zalewowe, a wymiana wód pomiędzy korytem głównym (1D) dokonuje się za pomocą tzw. ‘lateral link’, tj. połączeń działających na zasadzie przelewów o szerokiej koronie, z rzędną korony ustaloną na wysokości brzegów. Tego typu rozwiązanie jest szczególnie zasadne, gdy reprezentacja geometryczna koryta głównego w 2D jest niesatysfakcjonująca. Za tym rozwiązaniem przemawia także możliwość przyśpieszenia obliczeń. Jednak posiada także istotne wady: większa złożoność w budowie i zarządzanie projektem, w analizie i prezentacji wyników, od strony obliczeniowej możliwe deformacje hydrauliczne. Zaletą kombinacji MIKE11 i MIKE21 jest to, iż pozwala na uszczegółowienie i rozszerzenie modeli 2D. MIKE 21 nie zawsze, przy danej wielkości komórki obliczeniowej, może właściwie reprezentować geometrycznie, zatem i hydraulicznie, wąskie kanały. Te elementy modelu można „wpiąć”, modelując w MIKE11. Podobnie w przypadku budowli wodnych. MIKE21 posiada dość ubogą paletę odpowiednich opcji, przy ich stosowaniu spada stabilność obliczeń (z tego powodu konieczne jest skrócenie kroku czasowego, co wydłuża obliczenia, albo odstąpienie od bardziej dokładnego rozwiązania równania energii dla budowli na rzecz ogólnych równań zachowania pędu). Szczegółowe rozwiązania zależą także od celu i wymaganej dokładności obliczeń.

2D MODEL WEZBRANIA NA NYSIE ŁUŻYCKIEJ W 2010 R.

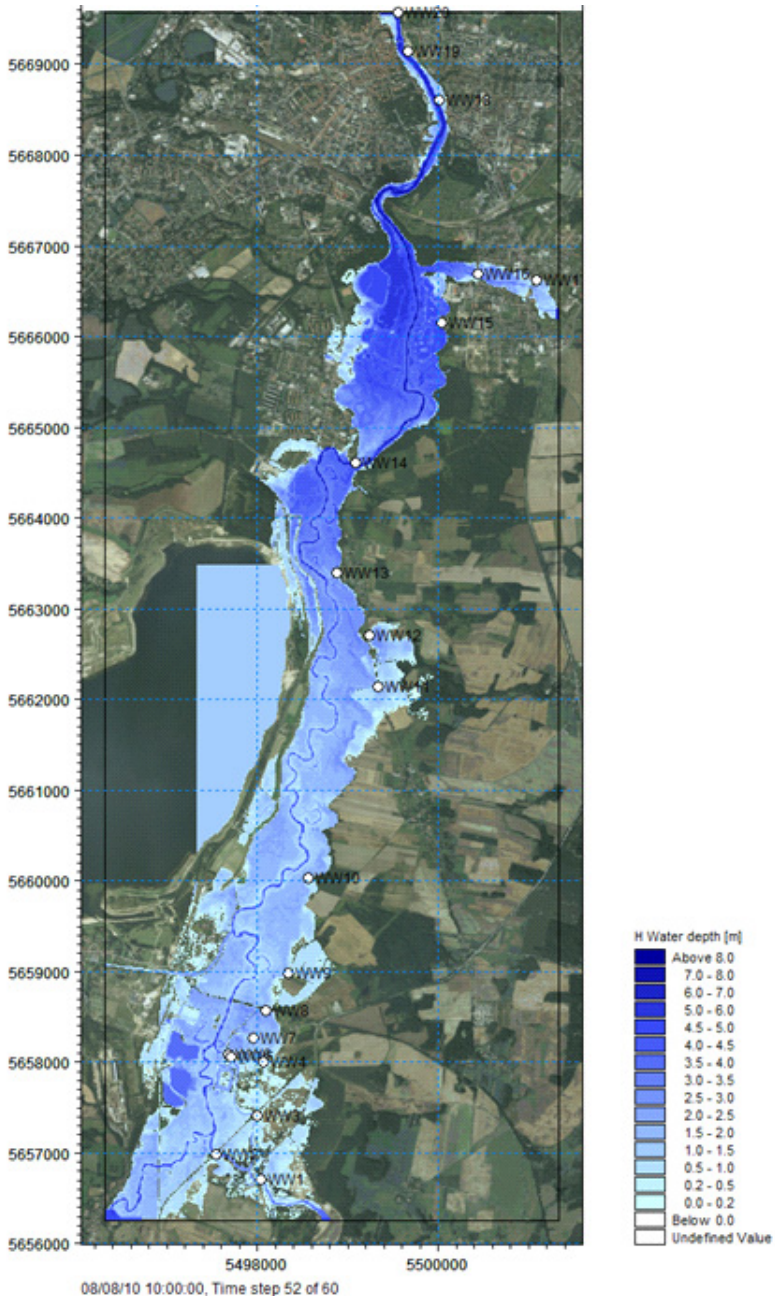
Przykładem modelowania hydrodynamicznego 2D jest model dla Nysy Łużyckiej na odcinku od ujścia Witki do Zgorzelca, wraz z ujściowym odcinkiem Witki poniżej zbiornika Niedów. Celem tych badań numerycznych było określenie wpływu awarii zapory Niedów na wysokość, czas wystąpienia i długość trwania fali wezbraniowej na Nysie Łużyckiej w 2010 r. Zbadano wpływ obszaru zalewowego poniżej zbiornika na transformację fali powodziowej z Witki oraz wpływ zbiornika Berzdorfer See, do którego wlała się woda powodziowa z Nysy Łużyckiej. Model pozwolił nie tylko na odtworzenie zaistniałej sytuacji, ale także na wykazanie, jaki przebieg miałoby wezbranie w przypadku nie wystąpienia awarii, a dokładniej że zbiornik Niedów nie istniałby, oraz różnic pomiędzy obu przypadkami.

Realizacja zadania obejmowała następujące etapy:

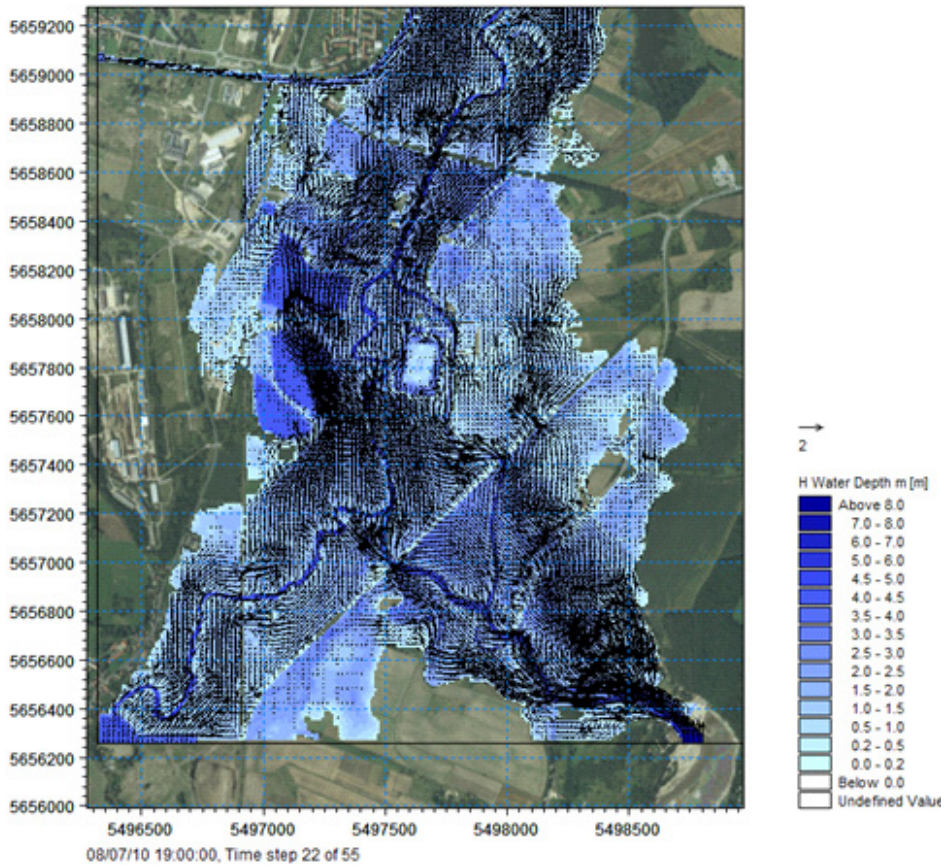
1) opracowanie numerycznego modelu terenu z dostępnych zestawów danych,

2) uzupełnienie NMT interpolowaną z pomierzonych przekroi poprzecznych batymetrią korytową oraz weryfikację i korekty rzędnych korony wałów,

3) wygenerowanie batymetrii obliczeniowej wraz z jej dostosowaniem do wymogów programu MIKE21,



Rysunek 4. Symulacja hydrodynamiczna wezbrania na Nysie Łużyckiej w 2010 r.
Figure 4. Simulation of the flood on the Nysa Łużycka in 2010



Rysunek 5. Głębokości i wektory prędkości przepływu poniżej zbiornika Niedów
Figure 5. Water depths and flow velocity vectors downstream of the Niedów dam

4) wprowadzenie budowli wodnych,

5) określenie klas pokrycia terenu (w formie poligonów) i przypisanie im szorstkości;,

6) zestawienie i weryfikacja danych hydrologicznych do ustalenia warunków brzegowych,

7) określenie hydrogramów przepływu na rzece Witce poniżej zbiornika (z awarią, z dodatkowym wypływem ok. 4,8 mln m^3, i bez),

8) kalibracja modelu do uzyskania maksymalnych rzędnych zwierciadła wody, przepływów i czasów dojścia fali zgodnie z zaobserwowanymi w naturze,

9) dla tak ustalonego modelu przeprowadzenie obliczeń dla wariantu swobodnego przepływu wód przez zbiornik Niedów.

Utworzony model posiada następujące charakterystyki: rozmiar komórki obliczeniowej 5x5 m^2; rozmiar modelu – 2660x1000 komórek (razem 2.66 mln.); długość/szerokość/powierzchnia: 13300 m/5000 m/65,5 km^2.

Rysunek 4 przedstawia zasięg modelu i symulację przejścia wezbrania w 2010 r. Rysunek 5 przedstawia rejon poniżej zbiornika oraz wieś Radomierzyce podczas awarii. Model pozwala otrzymać zarówno głębokości zalewu jak i prędkości przepływu. Pozwala także na uzyskanie charakterystyk hydraulicznych w dowolnym punkcie obliczeniowym modelu. Szczegóły modelu i opis wyników obliczeń znajdują się w Tokarczyk i inni [2011]. Rezultatem badań jest m.in. to, iż wpływ awarii zb. Niedów na miasto Zgorzelec/Goerlitz był niewielki – wzrost maksymalnego stanu wody wyniósł mniej niż 10 cm. Wynika to z ukształtowania doliny Nysy Łużyckiej, dużej jej retencji (ok. 20 mln. m^3), zabudowy hydrotechnicznej i przelania się znacznej ilości wód do zbiornika Berzdorf (ok. 3,5 mln m^3).

PODSUMOWANIE

Dzięki postępowi w technologiach komputerowych, aerooptycznych i oprogramowaniu geoinformacyjnym stało się możliwe tworzenie rozległych i bardziej dokładnych numerycznych modeli przestrzennych i hydrodynamicznych. Szczególnie dotyczy to modeli dwuwymiarowych, co dotychczas było ograniczone do czasochłonnych, akademickich studiów nad stosunkowo niedużymi i uproszczonymi modelami. Rozwój ten pozwala wierzyć, iż modelowanie numeryczne 2D może niebawem stać się częstą praktyką w ocenie zagrożenia powodziowego. W perspektywie kilku lat będzie możliwe tworzenie modeli obliczeniowych dla znacznych obszarów. Już teraz pojawiły się możliwości budowy i wykorzystania dwuwymiarowego modelu dla takich obszarów jak Racibórz ,Opole, a nawet dla Wrocławskiego Węzła Wodnego.

BIBLIOGRAFIA

Erlich M. (2008). *Benefit of 2D modelling approach for urban flood management.* Meteorologia, hydrologia, ochrona środowiska – kierunki badań i problemy. Red. A. Dubicki IMGW, Warszawa, seria Monografie, ISBN 978-83-61102-01-4, s. 105-123.

Toombes L., Chanson H. (2011). *Numerical limitations of hydraulic models.* 34th IAHR World Congress – Balance and Uncertainty, ISBN 978-0-85825-868-6, s. 2322-2329.

Tokarczyk T., Banasiak R., Bogusz, A., Orczykowski T., Zdralewicz M. (2011): *Ocena wpływu awarii zbiornika Niedów na przebieg fali wezbraniowej na odcinku Nysy Łużyckiej od ujścia Witki do przekroju wodowskazowego w Zgorzelcu.* IMGW, Raport, 31 ss.

Verhoeven R., Banasiak R., Okruszko T., Świątek D., Chormanski J., Nowakowski P. (2005). *Numerical modelling of river flow – data collection and problem solving.* Advances in Fluid Mechanics V, ISBN 1-85312-704-3, s. 95-105.

Zdralewicz M., Orczykowski T., Bogusz A. (2012). *Interpolacja przestrzenna koryta na potrzeby modelowania – porównanie metod.* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich - w tym zeszycie.

Dr inż. Robert Banasiak
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Parkowa 30
51-616 Wrocław
e-mail: robert.banasiak@imgw.pl
tel. (71) 3200 320