

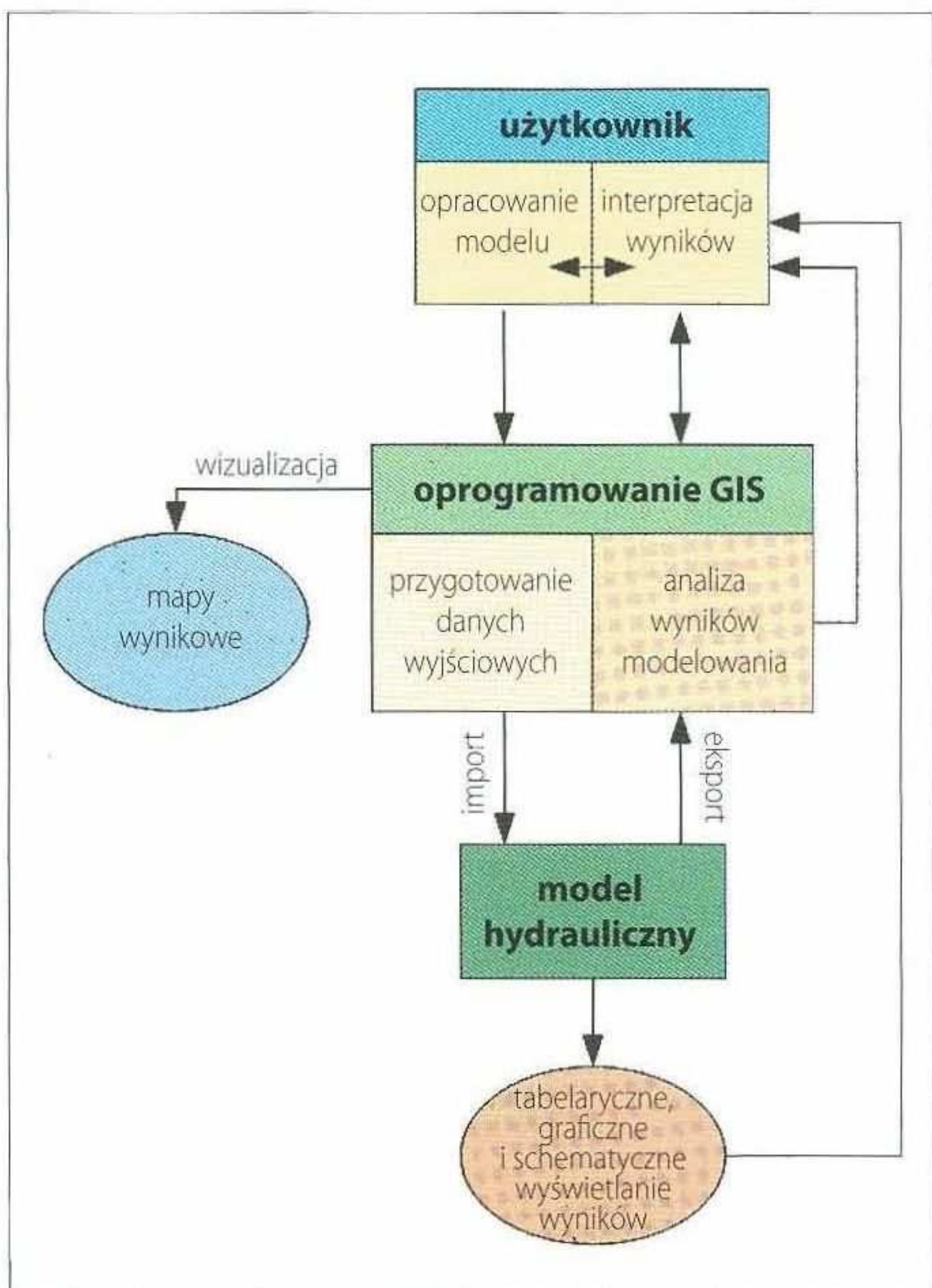
# Narzędzia GIS jako podstawowy instrument pomocniczy wykorzystywany przy wyznaczaniu zasięgu stref zalewowych

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie możliwości, jakie niesie ze sobą wykorzystanie narzędzi GIS w procesie wyznaczania zasięgu stref zalewowych, a także pokazanie korzyści, jakie daje integracja GIS z modelami hydraulicznymi. Artykuł bazuje na doświadczeniach związanych z wykonaniem projektów pn. „Określenie zagrożenia powodziowego w zlewni Wisłoki” oraz „Określenie zagrożenia powodziowego w zlewni Wisłoka”.

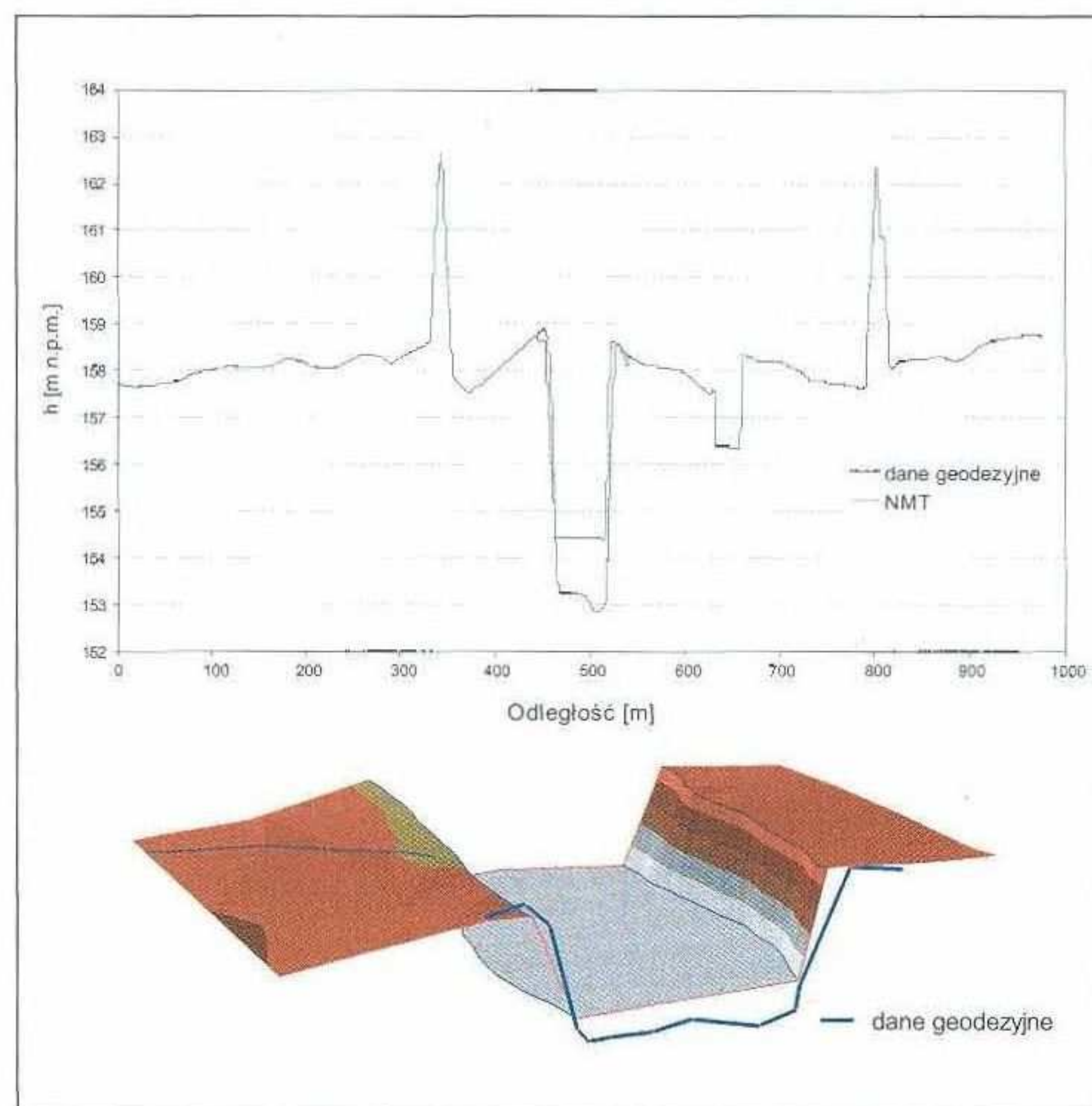
Systemy informacji geograficznej (GIS, ang. Geographic Information System) znajdują szerokie zastosowanie w procesie podejmowania decyzji oraz rozwiązywania problemów o charakterze geograficznym, dostarczając narzędzi niezbędnych do wprowadzania, integracji, zarządzania, analizy oraz wizualizacji danych przestrzennych. Obecnie trudno wyobrazić sobie wykonywanie analiz przestrzennych bez wykorzystania możliwości GIS. Wyznaczanie zasięgu stref zalewowych (zasięgu powodzi) jest skomplikowanym za-

gadnieniem wymagającym pracy na dużych zbiorach danych, ich integracji oraz przeprowadzania złożonych obliczeń i analiz. W tym procesie narzędzia GIS wykorzystywane są od etapu pozyskania i przygotowania danych wejściowych do modelu hydraulicznego, poprzez interpretację i analizę jego wyników, a skończywszy na opracowaniu map wynikowych (Shamsi 2005; rys. 1).

Określanie zasięgu powodzi jest jednym z etapów tworzenia map zagrożenia powodziowego – obowiązek ich wykonania nakłada na państwa Unii Europejskiej dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2007/60/WE, zwana także Dyrektywą Powodziową. Scena-



Rys. 1. Uproszczony schemat przedstawiający relacje między oprogramowaniem GIS a modelem hydraulicznym (na podstawie Shamsi 2005, zmodyfikowany)



Rys. 2. Przekrój korytowy z pomiaru bezpośredniego na tle numerycznego modelu terenu

riusze, dla których wyznaczane są strefy, powinny obejmować niskie, średnie oraz wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi (dyrektywa 2007/60/WE). Według wytycznych zaproponowanych przez Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej do niskich prawdopodobieństw zalicza się zdarzenia występujące raz na 500 lat ( $Q_{0,2\%}$ ) lub raz na 1000 lat (dla zdarzeń ekstremalnych;  $Q_{0,1\%}$ ). Powodzie występujące raz na 100 lat ( $Q_{1\%}$ ) oraz raz na 10 lat ( $Q_{10\%}$ ) zostały w tym opracowaniu zaklasyfikowane odpowiednio jako zdarzenia o średnim oraz wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia. Według wskazań Dyrektywy Powodziowej na potrzeby map zagrożenia oraz ryzyka powodziowego dla każdego z prawdopodobieństw należy oprócz zasięgu powodzi wyznaczyć również głębokości wody oraz w wybranych miejscach prędkości przepływu wody.

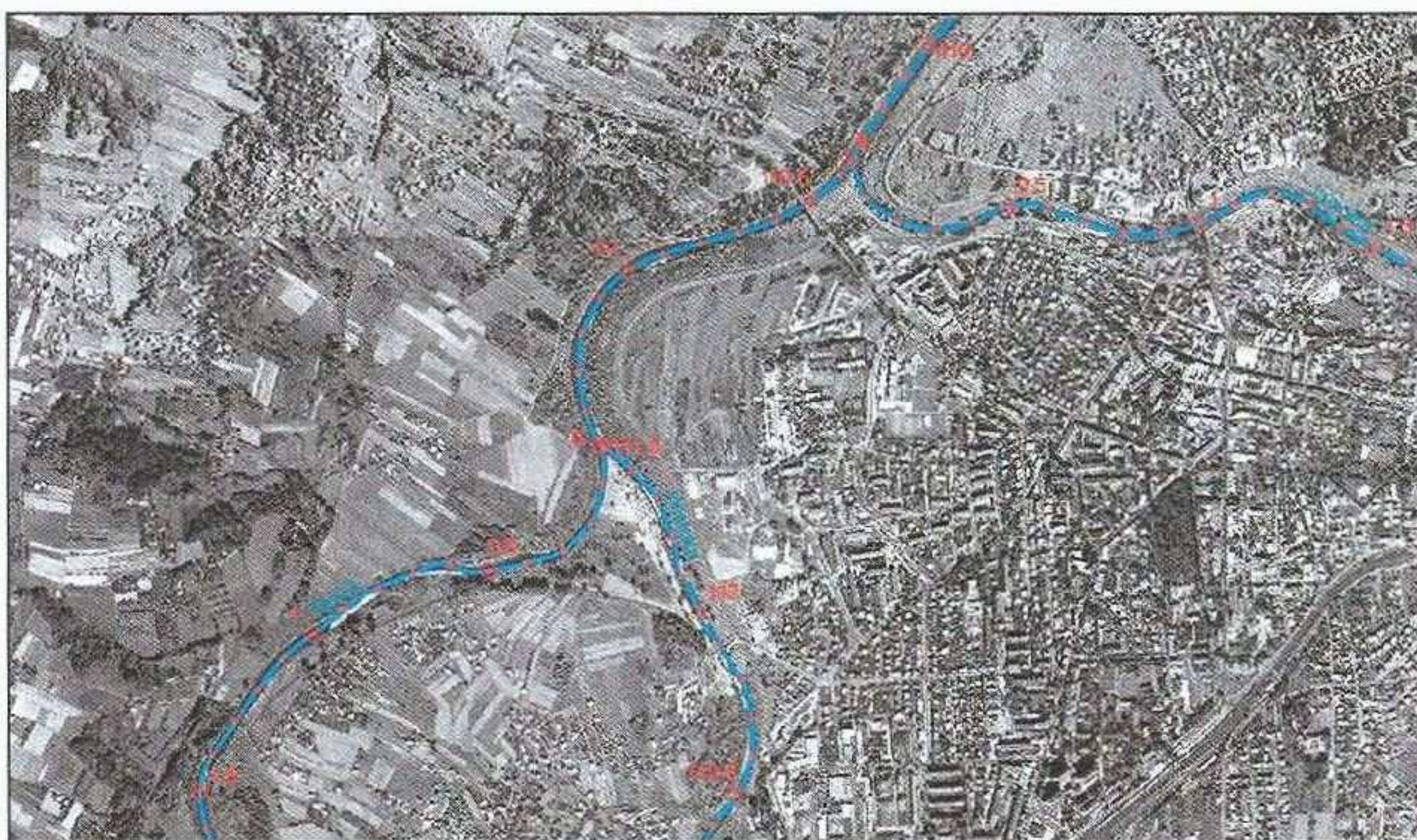
Kolejnym aktem prawnym regulującym zagadnienia związane z ochroną przed powodzią jest ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (DzU Nr 239, poz. 2019 z późn. zm.). Nakłada ona obowiązek wyznaczania zasięgu wód powodziowych, a także określenia kierunków ochrony przed powodzią dzieląc poszczególne obszary na:

- obszary wymagające ochrony przed zalaniem z uwagi na ich zagospodarowanie, wartość gospodarczą lub kulturową,
- obszary służące przepuszczeniu wód powodziowych, zwane obszarami bezpośredniego zagrożenia powodzią,
- obszary potencjalnego zagrożenia powodzią.

W ramach projektów „Określenie zagrożenia powodziowego w zlewni Wisłoki” oraz „Określenie zagrożenia powodziowego w zlewni Wisłoka” wyznaczono zasięgi stref zalewowych dla powodzi o prawdopodobieństwie wystąpienia  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{20\%}$ ,  $Q_{10\%}$ ,  $Q_{5\%}$ ,  $Q_{2\%}$ ,  $Q_{1\%}$  i  $Q_{0,5\%}$ , na podstawie wyników modelowania hydraulicznego jednowymiarowego, a w wybranych wypadkach również modelowania hydraulicznego dwuwymiarowego, z wykorzystaniem programów firmy DHI (Danish Hydraulic Institute) – MIKE 11 (1D) oraz MIKE FLOOD (1D/2D). Oprogramowanie ArcGIS firmy ESRI (Environmental Systems Research Institute) posłużyło do wykonania prac w środowisku GIS.

### ■ Wykorzystane dane oraz przygotowanie danych wejściowych do modelowania hydraulicznego

Jako podstawowych danych do wyznaczania zasięgu stref zalewowych użyto: numerycznych modeli terenu



Rys. 3. Podkład mapowy z wstępną lokalizacją przekrojów

(NMT), map topograficznych, ortofotomap, danych geodezyjnych oraz danych hydrologicznych.

W tym opracowaniu wykorzystano numeryczne modele terenu w postaci nieregularnej siatki trójkątów (TIN, ang. Triangulated Irregular Network), powstałe w ramach systemu identyfikacji działek rolnych. Powyższe NMT pochodzą ze zdjęć lotniczych w skali 1:13 000 wykonanych w latach 2002, 2003 i 2004 na zlecenie ARMiR i GUGiK. Mają one w swojej strukturze następujące elementy: punkty w regularnej siatce o oczku 20–40 m, linie strukturalne, linie obszarów o jednakowym spadku, granice obszarów planarnych i wyłączonych, budowle inżynieryjne (Gotlib i in. 2006). Analogicznie przedstawia się aktualność wykorzystanych ortofotomap w skali 1:5000 lub 1:10 000, które wraz z mapami topograficznymi w skali 1:10 000 (układ PUWG 1992 lub 1965) posłużyły jako dane pomocnicze w procesie wyznaczania zasięgu stref zalewowych oraz jako podkład do map wynikowych. W opracowaniu wykorzystano dane geodezyjne w postaci punktów przekrojów korytowych wraz z budowlami mostowymi i obiektami hydrotechnicznymi zmierzonymi bezpośrednio w terenie. Jako dane hydrologiczne wykorzystano: przepływy maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia oraz hydrogramy przepływów i krzywe natężenia przepływu dla poszczególnych przekrojów wodowskazowych, a także przepływy maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia i hydrogramy hipotetyczne dla zlewni niekontrolowanych.

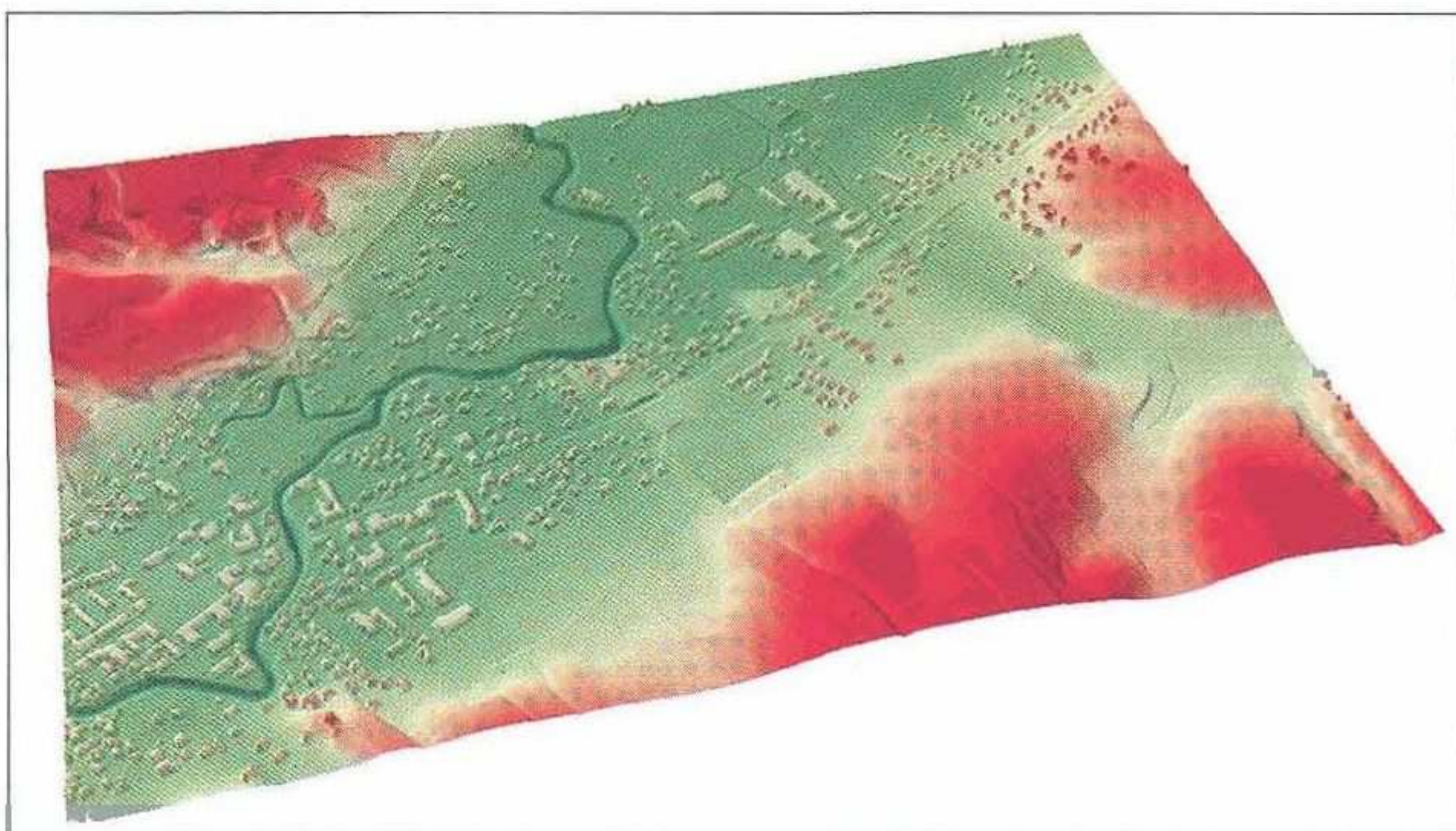
Poszczególne etapy wyznaczania zasięgu stref zalewowych na podsta-

wie modelowania hydraulicznego jednowymiarowego podzielono na następujące etapy:

- wykonanie pomiarów geodezyjnych koryta cieku wraz z budowlami mostowymi i obiektami hydrotechnicznymi,
- przygotowanie przekrojów dolinowych – połączonych przekrojów korytowych i terasowych,
- weryfikacja przebiegu sieci rzecznej,
- przygotowanie danych hydrologicznych,
- wprowadzenie danych do modelu hydraulicznego,
- obliczenia hydrauliczne,
- import wyników modelowania do GIS,
- stworzenie numerycznego modelu powierzchni wody (NMPW),



Rys. 4. Przekroje dolinowe na podkładzie numerycznego modelu terenu



Rys. 5. Zmodyfikowany numeryczny model terenu na potrzeby modelowania 2D

□ wyznaczenie zasięgu strefy zalewowej poprzez odjęcie NMT od NMPW,

□ weryfikacja oraz wygładzenie granicy strefy zalewowej,

□ wykonanie map końcowych.

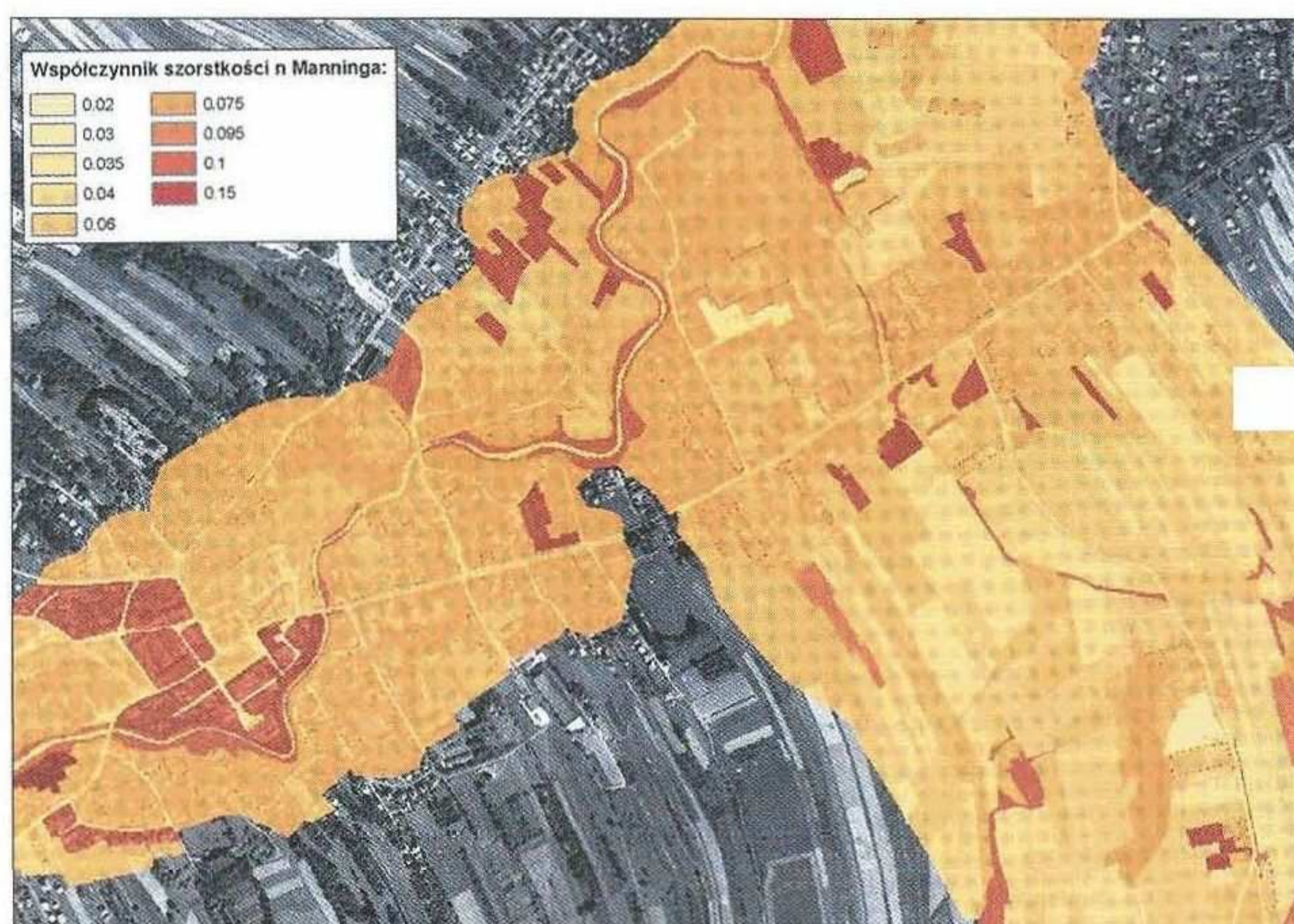
W wypadku modelowania hydraulicznego dwuwymiarowego w pierwszej kolejności należy przygotować NMT oraz mapę szorstkości terenu. Dane te importowane są do modelu 2D, gdzie przeprowadzane są dalsze obliczenia.

Na potrzeby modelowania hydraulicznego niezbędna jest dokładna informacja dotycząca kształtu koryta cieku. Z tych względów dane te pozyskano bezpośrednio z pomiarów w terenie. Dodatkowo danych tych nie można odczytać z NMT, ponieważ nie zawiera

on informacji o kształcie koryta, a jedynie odzwierciedla jego kształt do powierzchni zwierciadła wody (rys. 2).

Narzędzia GIS posłużyły do przygotowania i wytypowania miejsc wykonania koniecznych przekrojów przez geodetów, wstępnego wytypowania lokalizacji przekrojów i wykonania podkładów mapowych (rys. 3) pozwalających w łatwy sposób zlokalizować miejsce docelowe w terenie.

Kolejnym etapem pracy było stworzenie przekrojów dolinowych, czyli połączonej przekrojów korytowych z terasowymi – w wypadku których rzędne punktów pozyskano z NMT. Przekroje terasowe były generowane na podstawie numerycznego modelu terenu, prostopadle do głównego biegu doliny, tzn. prostopad-



Rys. 6. Rozkład współczynnika szorstkości na tle ortofotomapy

le do przebiegu warstw na zboczach ograniczających dolinę cieku (rys. 4). Następnie w miejscach newralgicznych, jak również kontrolnie na kilkunastu odcinkach, sprawdzano „manualnie” poprawność umiejscowienia, wygenerowania oraz odwzorowania danego przekroju.

Efektym finalnym była warstwa punktowa oraz liniowa przedstawiająca przebieg przekroju. Dla warstwy punktowej utworzono atrybuty charakteryzujące dany przekrój, tj.: nazwa rzeki; identyfikator przekroju; lokalizacja punktu na danym przekroju – liczona w metrach od lewej strony przekroju oraz rzędna terenu. Tak przygotowane dane zostały wyeksportowane do pliku tekstowego o odpowiedniej strukturze, umożliwiając w ten sposób automatyczne zaimportowanie przekrojów dolinowych do programu MIKE 11.

Jednym z elementów projektu była konieczność przeprowadzenia weryfikacji przebiegu sieci rzecznej na podstawie NMT i ortofotomapy. W tym celu, wykorzystując NMT, wygenerowano sieć rzeczna, stosując kolejno następujące narzędzia ArcGIS Spatial Analyst:

□ „topo do rastra” – interpolacja powierzchni topograficznej poprawnej hydrologicznie;

□ „kierunek przepływu” – tworzy raster na podstawie rastra powierzchni ukształtowania terenu, który określa kierunek przepływu wody przez piksel;

□ „odbiornik” i „wypełnienie” – identyfikacja i wypełnienie odborników – powierzchnie otoczone przez piksele o wyższych wartościach wysokości, które zatrzymują spływ powierzchniowy;

□ „akumulacja przepływu” – tworzona na podstawie rastra kierunków przepływu, to nic innego jak akumulacja wody przepływającej przez każdy piksel;

□ „ustaw puste” – proces tworzenia warstwy cieków polegający na pozostawieniu wyłącznie pikseli o zadanej, wysokiej wielkości z warstwy akumulacji przepływów;

□ „porządek strumieni” – utworzenie relacji pomiędzy poszczególnymi segmentami cieków na podstawie utworzonej warstwy cieków i warstwy kierunków przepływu (ESRI Polska 2009).

Następnie – wykorzystując tak wygenerowaną sieć rzeczna, ortofotomapy oraz wyniki pomiarów geodezyjnych – wyznaczono przebieg sieci rzecznej, która została zaimportowana do programu MIKE11.

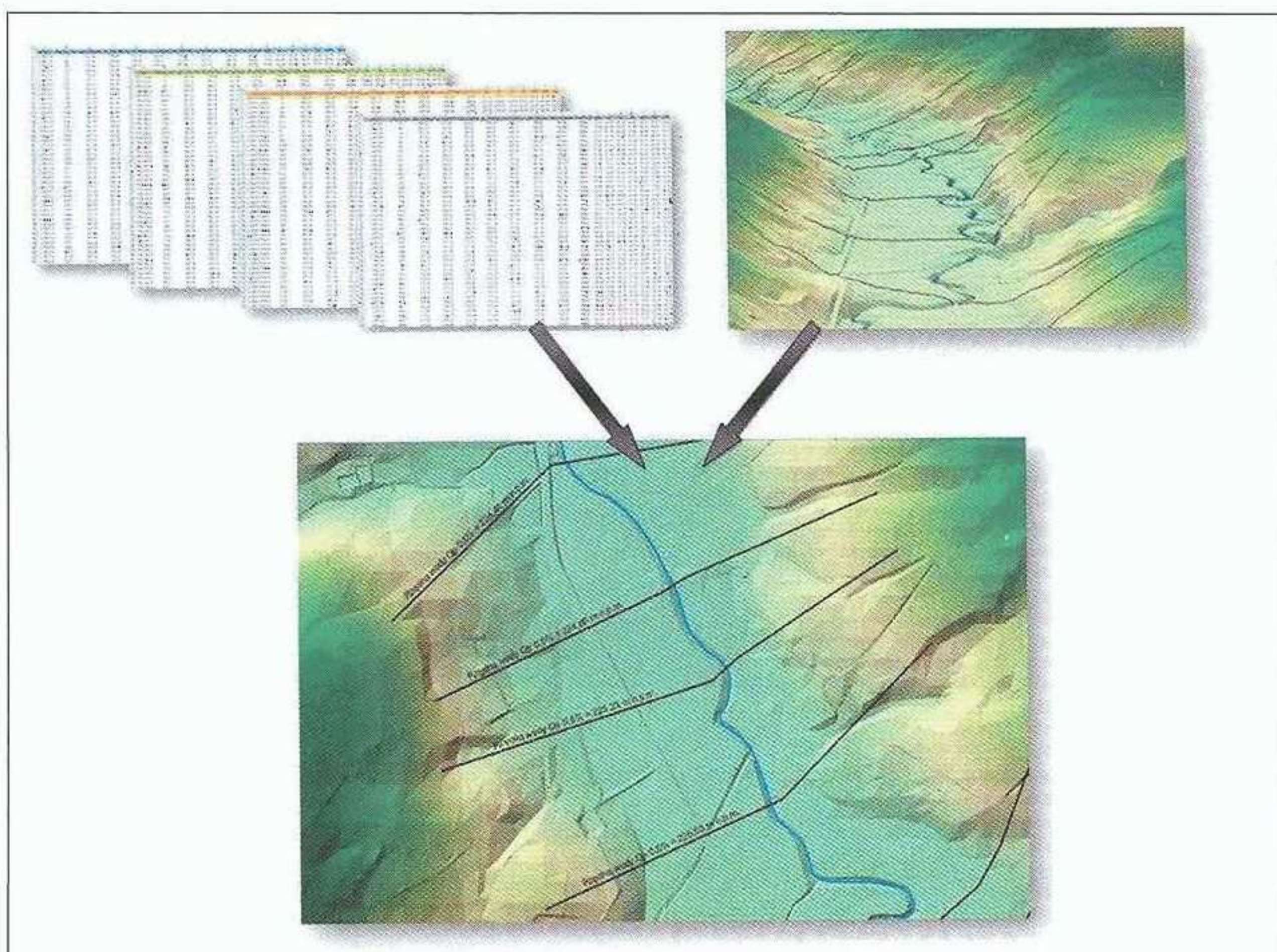
Dane hydrologiczne dla zlewni niekontrolowanych obliczono na podstawie modelu opad-odpływ. Wyznaczono w ten sposób hydrogramy hipotetyczne oraz przepływy maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia.

Na poszczególnych etapach obliczania transformacji opadu w odpływ konieczne jest dysponowanie danymi dotyczącymi środowiska geograficznego, takimi jak: powierzchnia zlewni, długość zlewni, spadek zlewni, rodzaje gleb oraz struktura użytkowania ziemi. Do obliczenia powierzchni oraz długości zlewni wykorzystano standardowe narzędzia GIS, natomiast średnie spadki poszczególnych zlewni obliczono na podstawie NMT z wykorzystaniem narzędzi Spatial Analyst programu ArcGIS. Rodzaj gleb określano na podstawie mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25 000 opracowanej w Instytucie Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach, a informacje dotyczące użytkowania ziemi pozyskano z bazy danych CORINE Land Cover. Nałożenie na siebie tych dwóch danych pozwoliło na wyznaczenie jednorodnych obszarów pod względem rodzaju gleb i użytkowania ziemi oraz obliczenie ich pola powierzchni.

W wyniku modelowania dwuwymiarowego, dla którego bardzo istotnym elementem jest numeryczny model terenu, dokonywane są obliczenia prędkości i kierunku przepływu wody oraz rzędne zwierciadła wody. Z powyższych względów NMT zaktualizowano o linie nieciągłości (obwałowania, nasypy, itp.), a także wprowadzono do niego obiekty kubaturowe mające wpływ na zasięg strefy zalewowej. Równie niezbędna do modelowania 2D jest mapa współczynników szorstkości, którą utworzono na bazie map użytkowania ziemi.

W tym opracowaniu do obliczeń hydraulicznych w modelu 2D wybrano siatkę kwadratów, tzw. GRID, dlatego też dostępne NMT zostały przekonwertowane do formatu rastrowego o pikselu  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ . Na podstawie arkuszy ortofotomap przeprowadzono wektoryzację zabudowy oraz klas użytkowania ziemi, a następnie za pomocą narzędzi Spatial Analyst NMT uszczegółowiono opracowanie o obiekty kubaturowe oraz obwałowania zmierzone w terenie (rys. 5).

Kolejnym etapem było nadanie wyznaczonym klasom użytkowania ziemi odpowiednich wartości współczynnika szorstkości (rys. 6). Ważne jest aby przygotowana mapa współczynników szorstkości miała taki sam rozmiar oraz rozdzielczość przestrzenną jak NMT, tzn. żeby każdej komórce NMT odpowiadała dokładnie jedna komórka mapy współczynnika szorstkości. Tak przygotowane dane zostały wyeksportowane do pliku tekstowego, a następnie zaimportowane do programu MIKE FLOOD, gdzie przeprowadzano

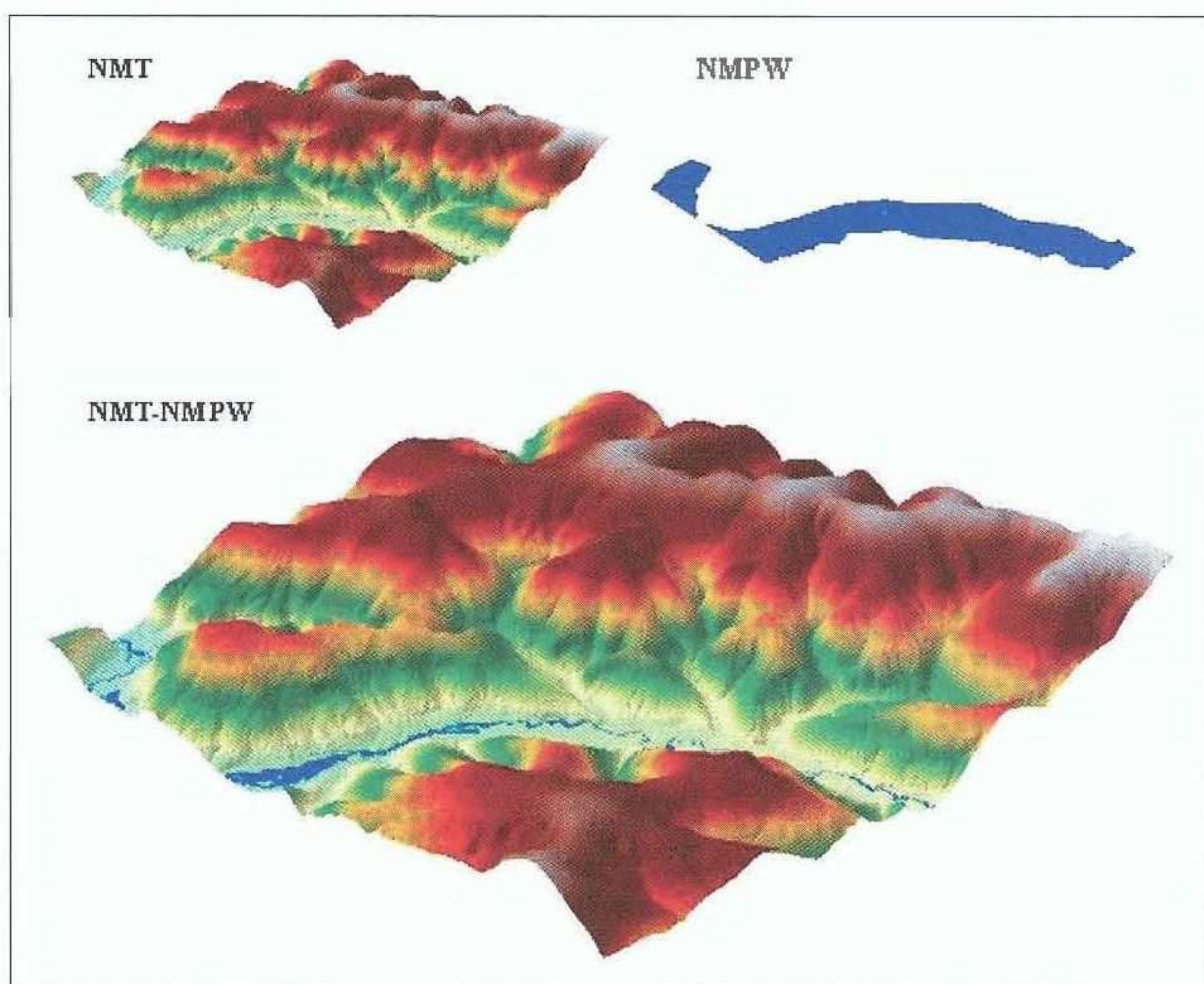


Rys. 7. Implementacja wyników jednowymiarowego modelowania hydraulicznego w przekrojach dolinowych

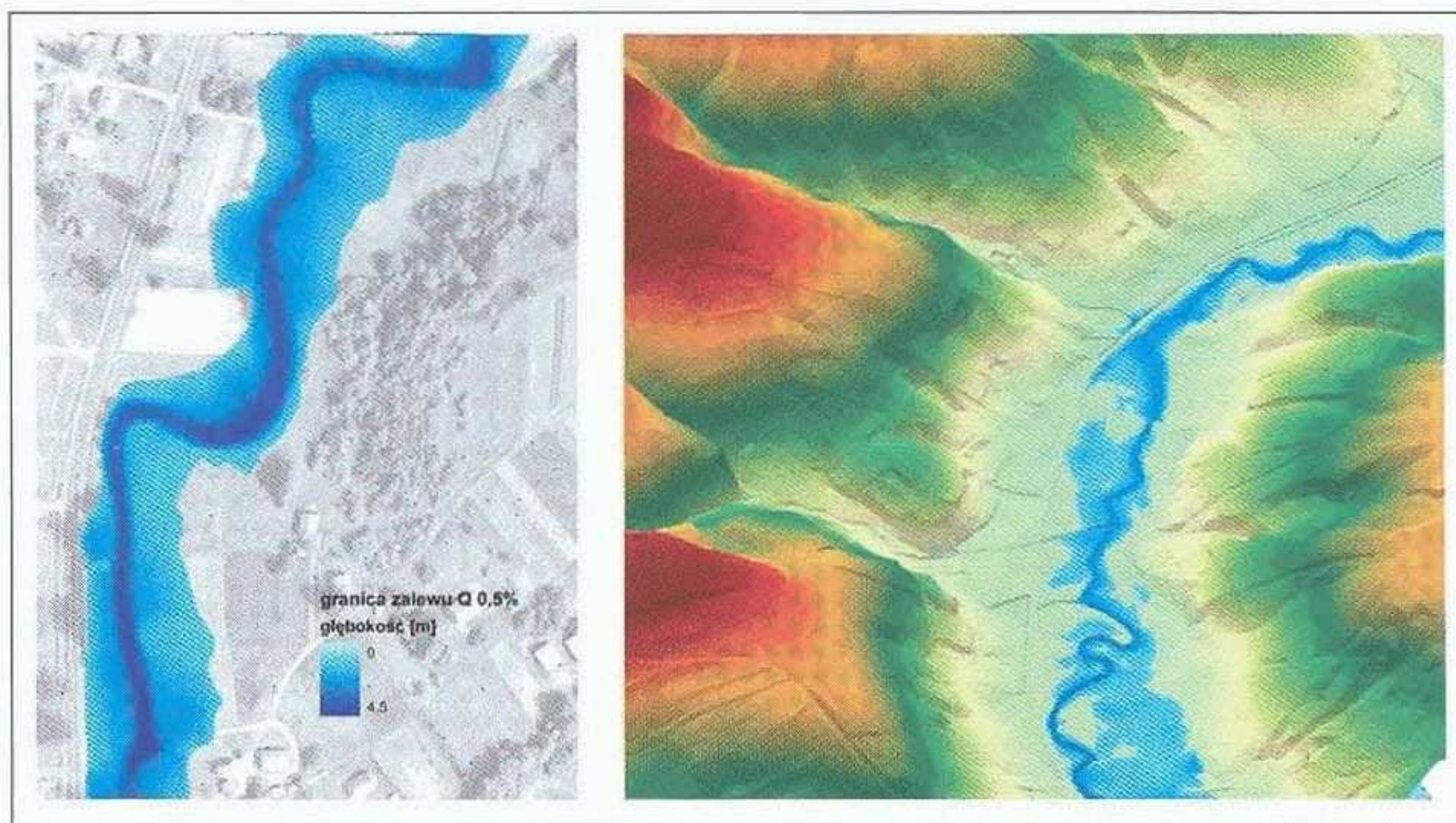
dalsze obliczenia. Program ten w sposób dynamiczny łączy modele jednowymiarowy (MIKE11) i dwuwymiarowy (MIKE21). W praktyce modelowanie jednowymiarowe odbywa się w obrębie koryta cieku. W odpowiedni sposób łączy się je z terasami zalewowymi, na których przebiega modelowanie dwuwymiarowe (DHI 2009).

#### ■ Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego oraz opracowanie map terenów zalewowych

Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego bazuje na wynikach jednowymiarowego modelowania hydraulicznego w przekrojach dolinowych w formie rzędnych zwierciadła wody o prawdo-



Rys. 8. Numeryczny model terenu – numeryczny model powierzchni wody (NMT-NMPW)

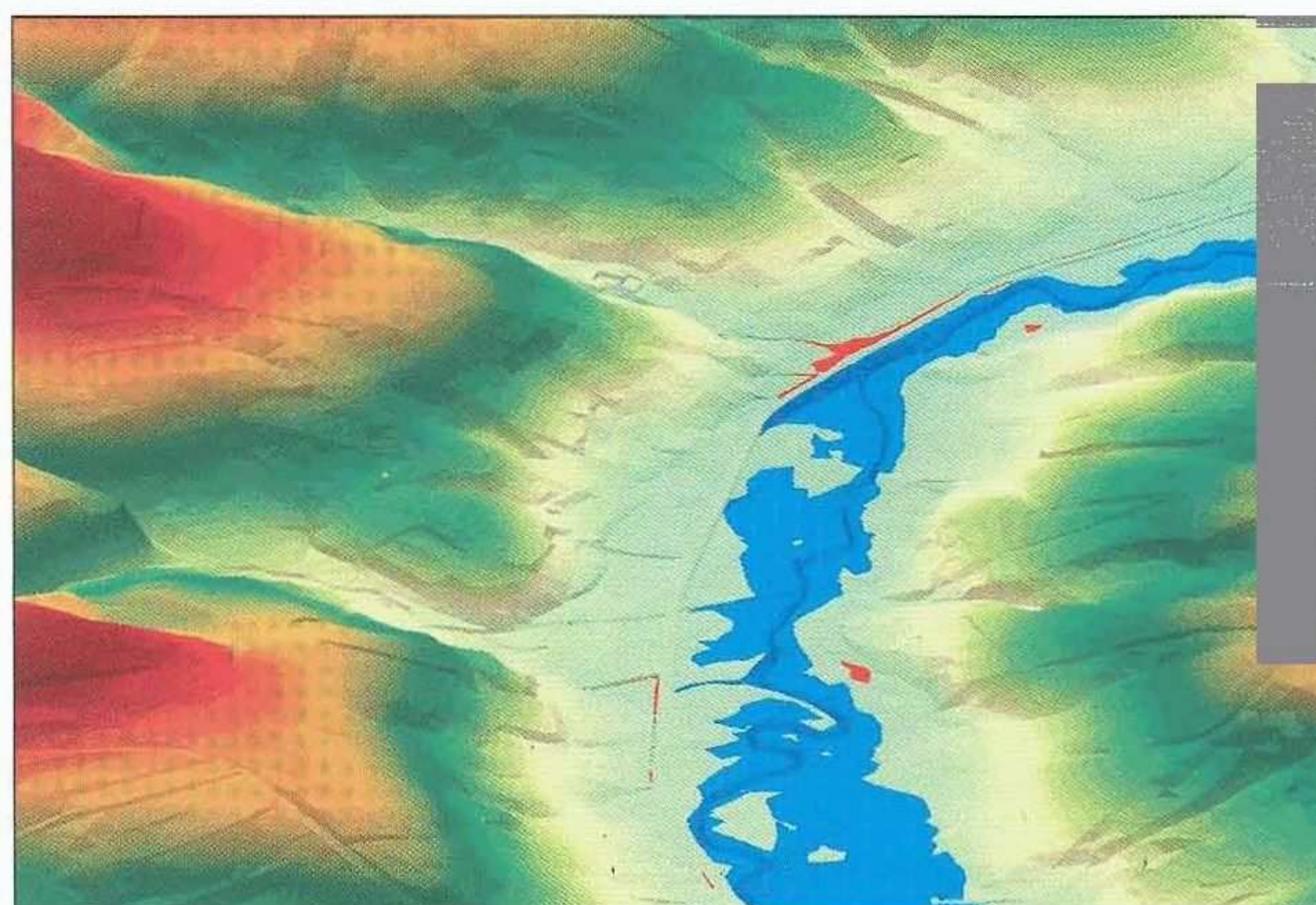


Rys. 9. Zasięg „surowej” strefy zalewowej uwzględniającej głębokości wody

podobieństwie przewyższenia  $p = 50\%$ ,  $p = 20\%$ ,  $p = 10\%$ ,  $p = 5\%$ ,  $p = 2\%$ ,  $p = 1\%$  oraz  $p = 0,5\%$ . Aby móc z nich skorzystać, w dalszym etapie zaimplementowano je do środowiska GIS w formie tabel xls/dbf, a następnie – metodą złączenia przestrzennego – dopisano jako informację atrybutową do uprzednio utworzonej warstwy przekrojów dolinowych (rys. 7).

Tak przygotowane dane są głównym elementem generowania stref zagrożenia powodziowego. Sam proces polega na skonfrontowaniu informacji hydrologicznej z rzędnymi wysokościami terenu, a dokładniej na utworzeniu numerycznego modelu powierzchni wody i następnie jego nałożeniu na numeryczny model terenu. Tworzenie NMPW opiera się na rzęd-

nych zwierciadeł wody przyporządkowanych do poszczególnych przekrojów dolinowych ograniczonych tzw. obwiednią; przetworzone metodą interpolacji między przekrojami pozwalają wygenerować numeryczne modele powierzchni wody dla poszczególnych wód prawdopodobnych. Powstały w ten sposób model jest krzywoliniową powierzchnią zwierciadła wód powodziowych w dolinie rzeki; model ten na całej swojej powierzchni dysponuje informacją o rzędnej wody [m n.p.m.]. W zależności od potrzeb możliwe jest utworzenie NMPW zarówno jako siatki TIN (siatka nieregularnych trójkątów), jak również w formie GRID (format rastrowy w postaci siatki kwadratów). W ramach omawianych prac posłużono się GRID-ami, które w prostszy sposób



Rys. 10. Weryfikacja zasięgu strefy zalewowej (eliminacja zbędnych elementów strefy – czerwone poligony)

można przetwarzać, a także przeprowadzać na nich analizy.

Porównanie NMPW i NMT wymaga jednolitego formatu danych, co jest poddyktowane zarówno wymaganiami narzędziowymi oprogramowania ESRI ArcGIS, jak również szczegółowością finalnego produktu w postaci zasięgu stref zalewowych. Niezbędna zatem była konwersja NMT do formatu GRID, a następnie za pomocą narzędzia 3D Analyst firmy ESRI odjęcie od siebie obu modeli (rys. 8).

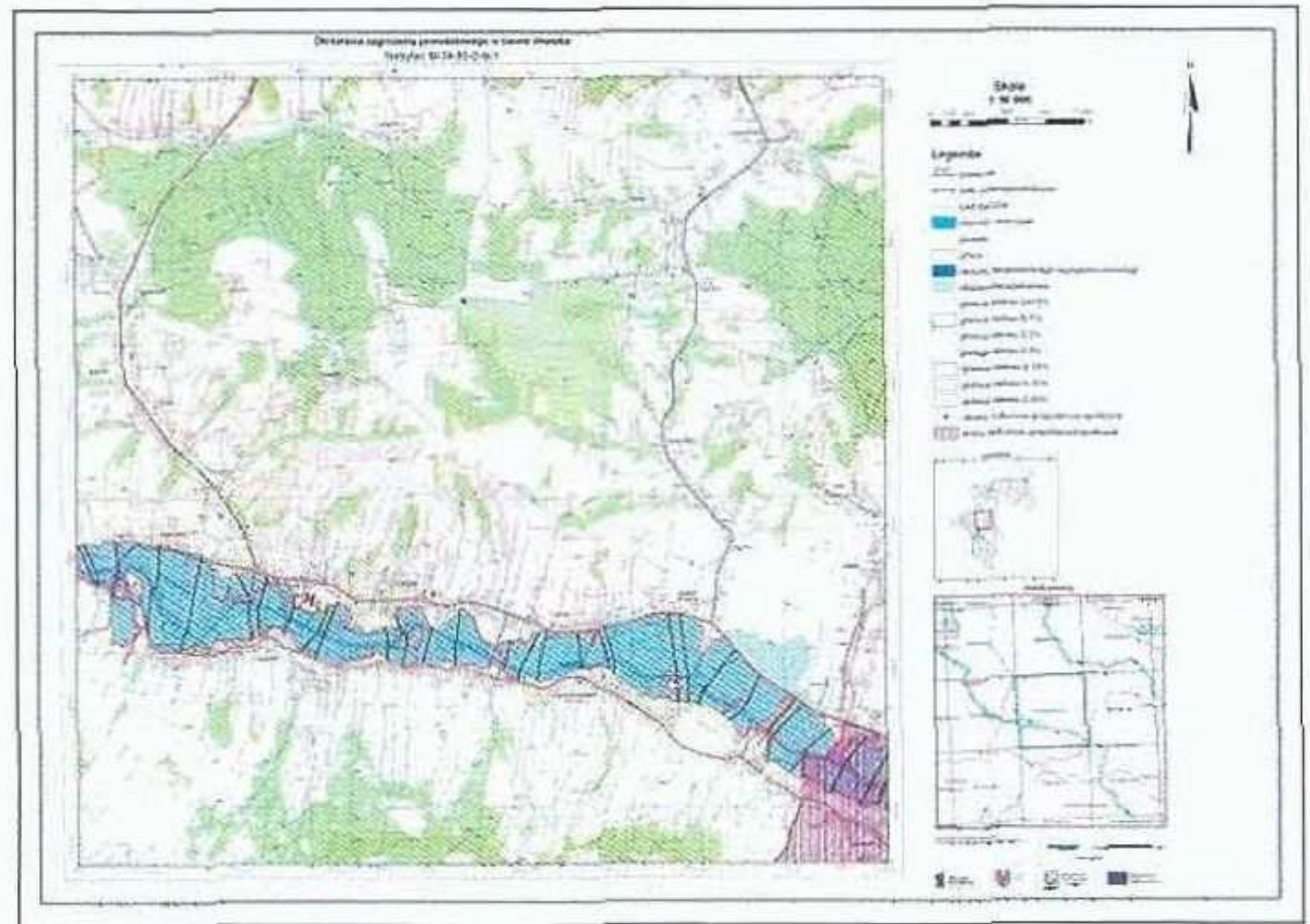
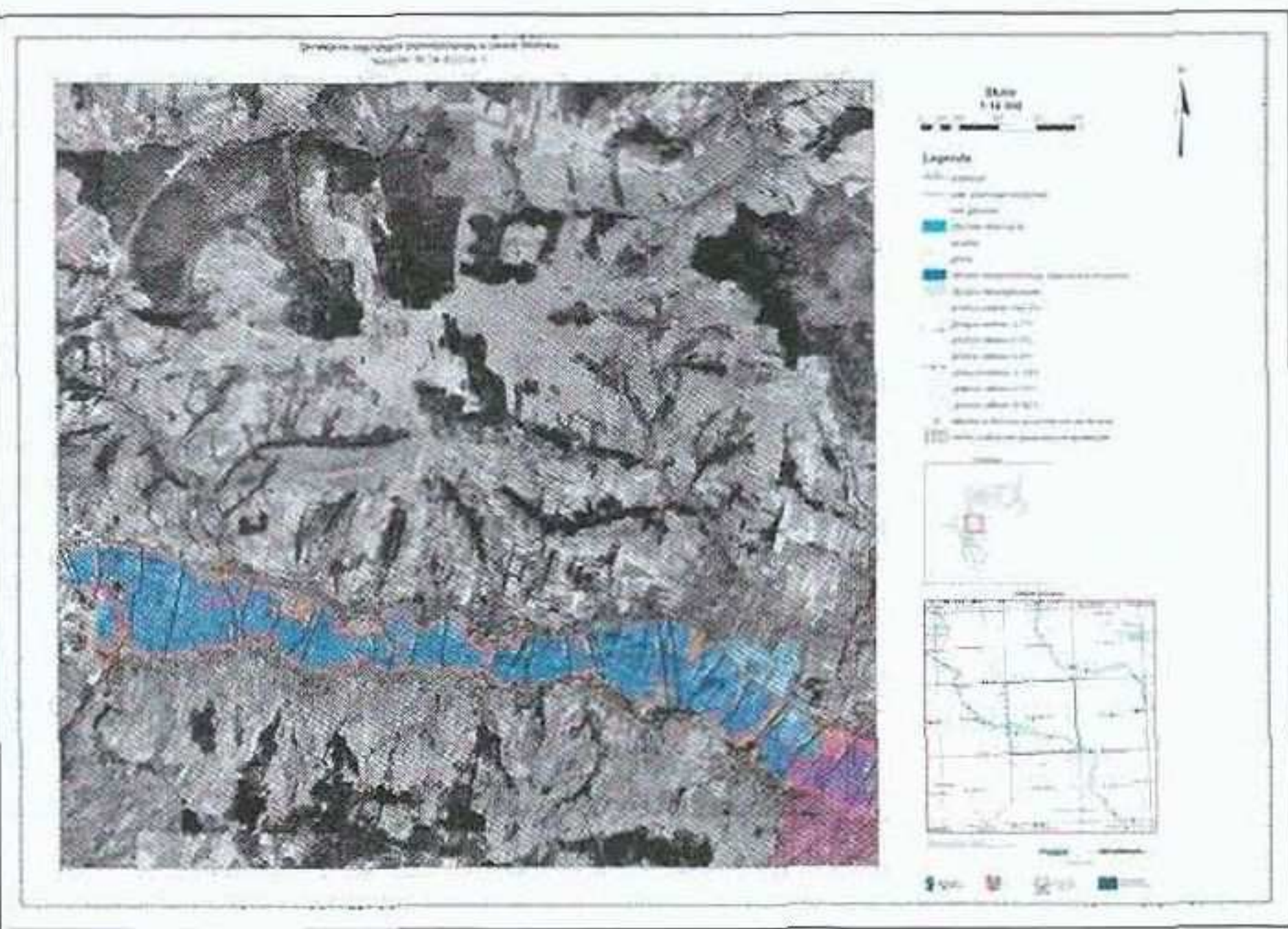
W wyniku przecięcia otrzymano „surowy” zasięg stref zalewowych (rys. 9), który oprócz informacji przestrzennej ma również niezwykle cenne atrybuty głębokościowe. Jest to o tyle istotne, iż dane te są niezbędne do opracowania map zagrożenia powodziowego i ryzyka powodziowego.

Zasięg strefy będący wynikiem przecięcia NMT i NMPW jest jedynie wstępną, tzw. surową daną, której geometrię szczegółowo weryfikowano na podstawie ortofotomapy oraz map topograficznych. Weryfikacja obejmowała przede wszystkim eliminację drobnych elementów zalewów niebędących obszarami bezodpływowymi (rys. 10), analizę połączeń stref koryt rzecznych i teras zalewowych, jak również połączeń ze zbiornikami wodnymi. Dokonano również sprawdzenia ciągłości zasięgu stref na odcinkach ujściowych rzek z uwzględnieniem „cofek” oraz zachowaniem zgodności wyznaczonych zalewów z wynikami modelowania hydraulicznego.

Zweryfikowane strefy zalewowe w formie warstw wektorowych wygładzono z zachowaniem zgodności topologicznej oraz wyeliminowano ich zbędne fragmenty. Finalnie posłużyły one do wykonania map przedstawiających zagrożenie powodziowe w podziale arkuszowym układu PUWG 1992 w skali 1:10 000 zarówno na podkładach map topograficznych, jak i ortofotomap (rys. 11). Oprócz 7 stref zalewowych, wraz z obszarami bezodpływowymi, mapy przedstawiają również zasięg obszarów bezpośredniego zagrożenia powodzią wyznaczonych zgodnie z zapisami obowiązującej ustawy Prawo wodne, jak również obiekty i obszary wymagające szczególnej ochrony przed powodzią z uwagi na ich zagospodarowanie, wartość gospodarczą lub kulturową oraz szczególne znaczenie społeczne.

### ■ Zagadnienia problemowe związane z wykorzystaniem GIS do wyznaczania zasięgu stref zalewowych

Wykorzystanie danych z różnych źródeł, o różnej dokładności, powoduje powstanie licznych problemów w procesie



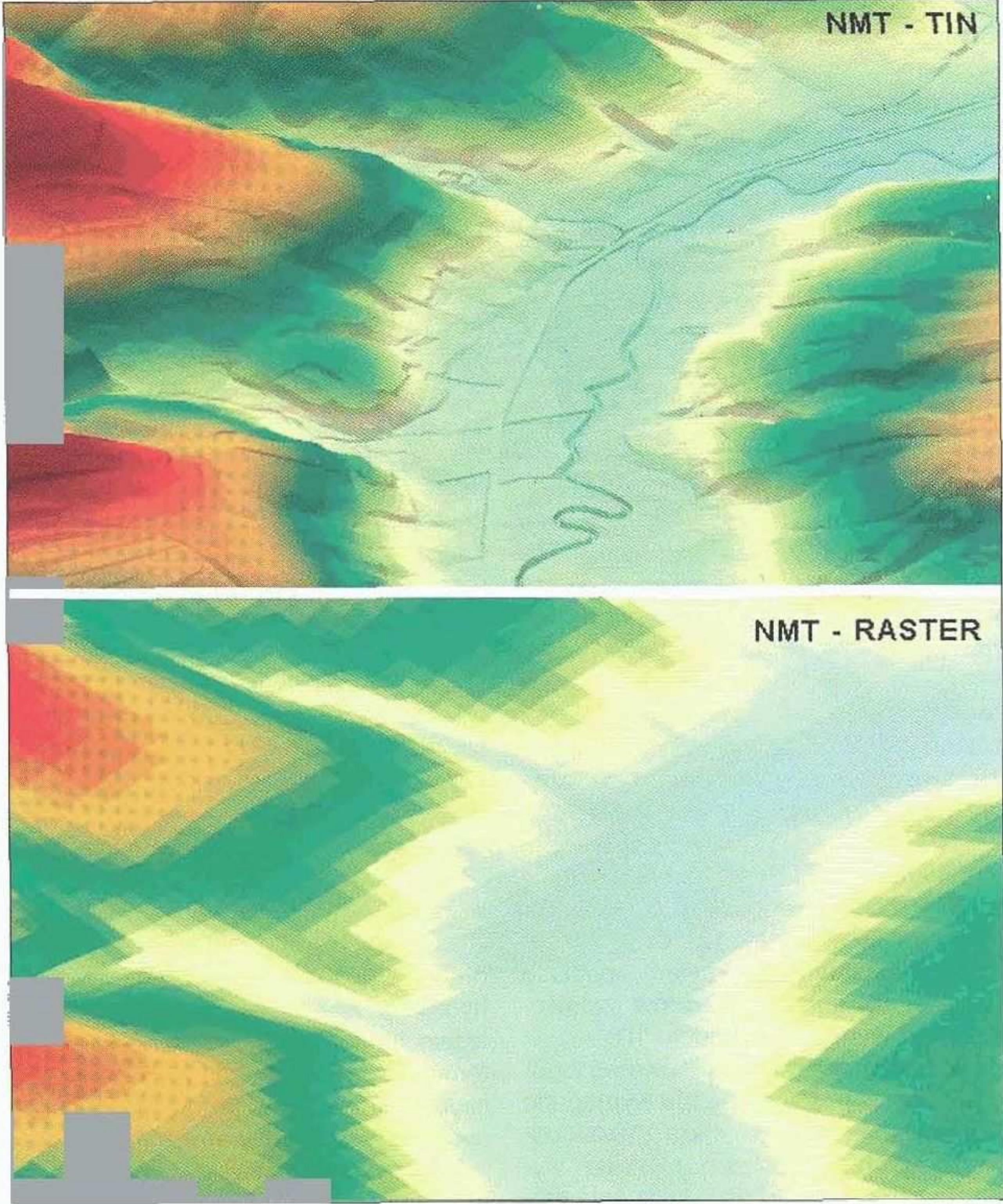
Rys. 11. Mapy przedstawiające zagrożenie powodziowe

wyznaczania zasięgu stref zalewowych. Jednym z takich zagadnień jest różnica pomiędzy rzędnymi pochodzącymi z pomiarów geodezyjnych i NMT. Użyte NMT charakteryzują się błędami „powierzchniowymi” uzależnionymi od wielkości średniego błędu wysokości (Gotlib i in. 2006). Średni błąd NMT, wyznaczony na podstawie zdjęć lotniczych w skali 1:13 000, wynosi 0,6 m. Dlatego też często na połączeniu przekroju korytowego (z pomiarów geodezyjnych) z przekrojem terasowym (pochodzącym z NMT) występują zmiany wysokości rzędnej terenu. Różnice te są istotne, ponieważ w niektórych wypadkach mogą decydować o tym czy woda płynie jeszcze w korycie, czy już wylewa się na terasę zalewową.

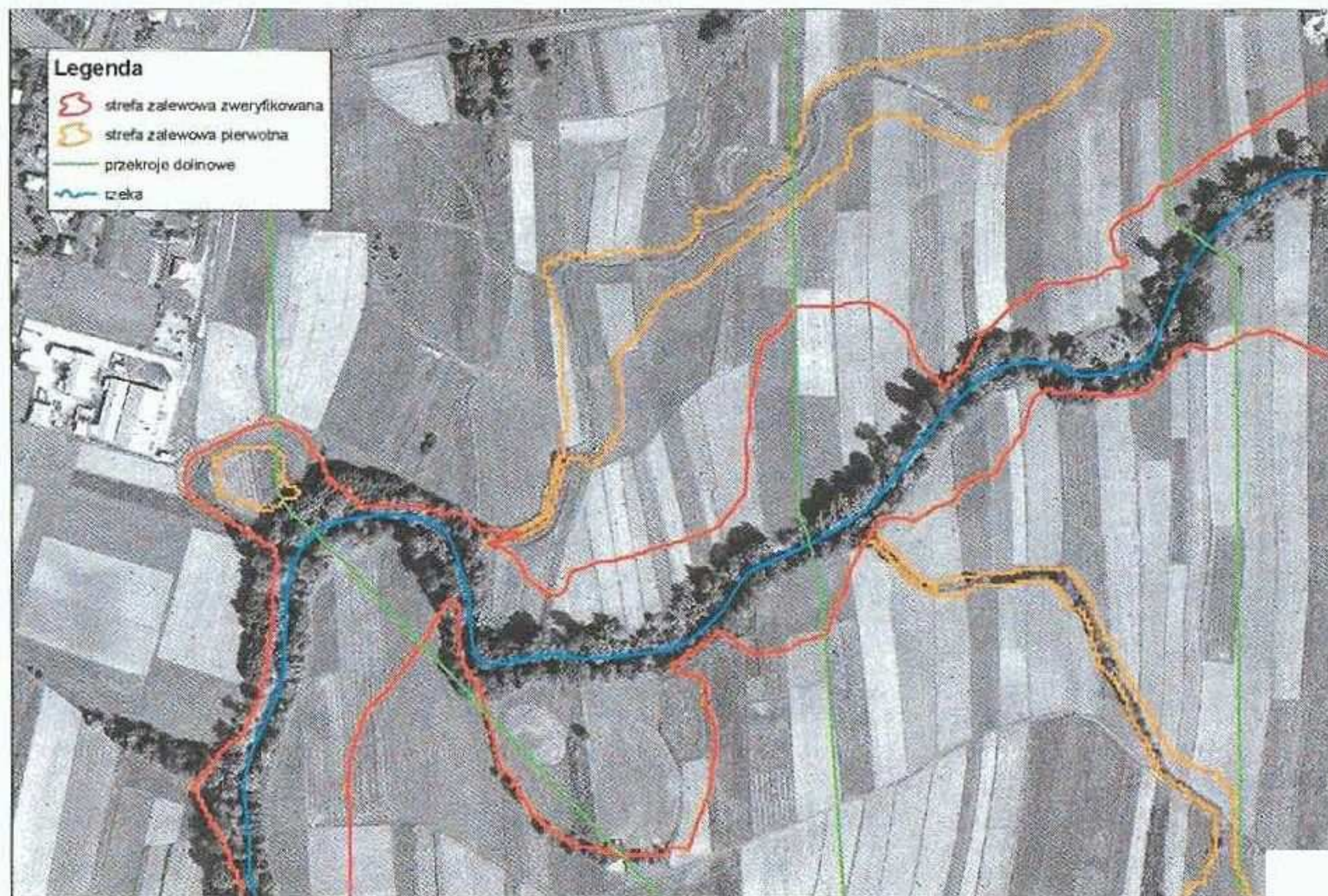
W przedmiotowym opracowaniu do wyznaczania zasięgu stref zalewowych użyto NMT przekonwertowanych z formatu TIN do formatu rastrowego – GRID. W formacie rastrowym powierzchnia Ziemi reprezentowana jest przez siatkę komórek o równych rozmiarach zwanych pikselami. Poszczególne piksel przechowuje próbkę przestrzenną danego obszaru o określonej powierzchni. Ma on przypisaną wartość liczbowa, która może określać dowolne atrybuty takie, jak: położenie geograficzne, wysokość wyrażoną w metrach, typ roślinności itd. Format rastrowy jest bardzo przydatny do reprezentowania danych o charakterze ciągłym takich, jak: wysokość, wielkość opadu atmosferycznego czy temperatury powietrza, które nie mają dokładnie wyznaczonej granicy i na ogół stopniowo zmieniają się na danym obszarze. Do wad formatu rastrowego można natomiast zaliczyć generalizację reprezentowanej powierzchni czy utratę unikatowości obiektów – obiekty liniowe (takie jak sieć rzeczna) stają się zbiorami pikseli. Mimo znaczącej

objętości (w porównaniu z modelem TIN) modele danych rastrowych są powszechnie wykorzystywane do analiz przestrzennych i modelowania.

Dobór wielkości piksela w formacie rastrowym ma decydujący wpływ na dokładność przeprowadzonych analiz. Im mniejszy jest piksel, tym powierzch-



Rys. 12. Porównanie reprezentacji tego samego wycinka powierzchni w formacie TIN i obrazu rastrowego (na powyższych obrazach można zaobserwować stopień generalizacji szczytów rzeźby terenu w formacie danych rastrowych)



Rys. 13. Granica strefy zalewowej przed i po weryfikacji

nia odwzorowana jest wierniej, jednakże wielkość pliku oraz czas przeprowadzania analiz przestrzennych znacznie wzrastają (rys. 12).

Wysokość zwierciadła wody uzyskana z wyników modelowania jednowymiarowego często nie jest jednakowa na całej długości przekroju dolinowego. Wynika to z faktu, iż poziom wody w korycie często różni się od poziomu wody na terasie zalewowej. Różnicę tę należy uwzględnić podczas generowania NMPW, weryfikując przebieg granicy strefy zalewowej na terasach zalewowych.

Modelowanie hydrauliczne jednowymiarowe zakłada, że woda płynie w kierunku zdefiniowanym przez koryto ciek lub kanału. Założenie to sprawdza się w terenach z dobrze wykształconą doliną, gdzie woda płynie w jednym kierunku – w dół doliny równoległe do koryta ciek. W dolinach rzecznych z płaskimi i rozległymi terasami zalewowymi tego typu uproszczenie nie jest zasadne (Alkema 2007). Z tych względów należy zwrócić szczególną uwagę podczas wyznaczania stref zalewowych na bazie NMPW. Interpolowane rzędne wody z przekrojów dolinowych przy przecięciu z NMT mogą powodować „cofanie się” strefy zalewowej (rys. 13), co w konsekwencji skutkuje uzyskaniem znacznie bardziej rozległych obszarów zalewowych niż wynika to z modelu 1D.

Na obszarach o skomplikowanej topografii oraz w miejscach gdzie wymagana jest dokładniejsza symulacja zjawisk powodziowych (np. obszary miejskie) wykorzystuje się możliwości, jakie daje modelowanie hydrauliczne dwuwymiarowe (Alkema 2007). Ten rodzaj modelowania pozwala na określenie głębokości oraz

kierunku i prędkości przepływu wody. Obliczenia hydrauliczne w modelu 2D opartym na siatce kwadratów dokonywane są w 4 kierunkach. Dlatego też przygotowując NMT do modelu 2D należy zwrócić szczególną uwagę na ciągłość wałów przeciwpowodziowych i dróg. Zagadnienie to jest istotne zwłaszcza na obwałowanych terenach miejskich o gęstej sieci dróg (nasypów), gdzie brak ciągłości powyższych form może skutkować powstaniem znacznie rozleglejszej strefy zalewowej niż w rzeczywistości.

## Wnioski

W procesie generowania danych wejściowych używanych do modelowania hydraulicznego jedno- i dwuwymiarowego istotną rolę odgrywają narzędzia GIS. Dzięki ich zastosowaniu w łatwy i szybki sposób wytypowano lokalizacje przekrojów korytowych dla geodetów, co w znaczący sposób usprawniło prace pomiarowe. Dodatkowo – wykorzystując narzędzia GIS – procesy generowania punktów przekrojów terasowych z NMT oraz tworzenia przekrojów dolinowych udało się w 90% zautomatyzować. Wykonano również niezbędne obliczenia charakterystyk środowiska geograficznego na potrzeby opracowania danych hydrologicznych, wykorzystując podstawowe narzędzia GIS. Uzyskano dzięki temu dokładniejsze dane w znacznie szybszym czasie w porównaniu do tradycyjnie wykorzystywanych metod.

Wyznaczanie zasięgu powodzi na podstawie przecięcia numerycznego modelu terenu z numerycznym modelem powierzchni wody sprawia, iż wynik uzależniony jest głównie od sposo-

bu przeprowadzenia przekrojów dolinowych, a finalny kształt stref jest jedynie nieznacznie modyfikowany. Takie podejście pozwala także znacznie zautomatyzować proces generowania stref w stosunku do tradycyjnej metody, polegającej na rysowaniu granicy zalewu na podstawie warstw z mapy topograficznej.

Użyte w ramach modelowania hydraulicznego dwuwymiarowego oprogramowanie MIKE FLOOD pozwala na uzyskanie funkcjonalności obu modeli (1D i 2D), przy jednoczesnym zminimalizowaniu ograniczeń, wynikających z użycia każdego modelu z osobna. Procesy przepływu wody w korycie symulowane są przez model 1D, natomiast na terasach zalewowych dokonywane są obliczenia w modelu 2D. Takie podejście pozwala znacznie ograniczyć koszty oraz czas przeprowadzanych analiz.

Wykorzystanie narzędzi GIS do wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego pozwala na znaczną oszczędność czasu zarówno podczas procesu przygotowywania danych, na etapie interpretacji wyniku modelowania hydraulicznego, jak i podczas opracowywania finalnego produktu w postaci map przedstawiających zagrożenie powodziowe. Dzięki temu specjaliści odpowiedzialni za modelowanie hydrauliczne mogą skupić się na rozwiązywaniu rzeczywistych problemów związanych z przepływem wody w modelu, nie tracąc czasu na przygotowanie danych wejściowych.

Systemy informacji geograficznej ułatwiają pracę na dużych zbiorach danych pochodzących z różnych źródeł. Cecha ta jest bardzo ważna w procesie wyznaczania stref zalewowych, gdzie niezbędna jest integracja ogromnych zbiorów danych geodezyjnych, hydrologicznych i tych o charakterze przestrzennym.

## LITERATURA

1. D. ALKEMA, 2007, Simulating floods: on the application of a 2D-hydraulic model for flood hazard and risk assessment, Enschede, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
2. DHI, 2009, MIKE FLOOD, 1D-2D Modelling, User Manual.
3. Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim.
4. ESRI Polska, 2009, ArcGIS Spatial Analyst. Wykłady i ćwiczenia, ESRI Polska, Warszawa.
5. D. GOTLIB, A. IWANIAK, R. OLSZEWSKI, 2006, Budowa krajowej infrastruktury danych przestrzennych w Polsce. Harmonizacja baz danych referencyjnych, Katedra Geodezji i Fotogrametrii, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Wrocław.
6. U. M. SHAMSI, 2005, GIS applications for water, wastewater, and stormwater systems, Taylor and Francis, Boca Raton, London, New York, Singapore.
7. Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (DzU Nr 239, poz. 2019 z późn. zm.)