

STANISŁAW KOSTECKI*

Zakład Budownictwa Wodnego Politechniki Wrocławskiej

MAREK ŚCISŁY

Zakład Kartografii Uniwersytetu Wrocławskiego

Opracowywanie map potencjalnych stref zalewowych na podstawie numerycznego modelu terenu

Zarys treści. Potencjalne strefy zalewowe mogą być wyznaczane z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu opracowanego na podstawie map topograficznych i uzupełnionego przekrojami poprzecznymi pomierzonymi bezpośrednio w terenie. Właściwa interpretacja rzeźby z mapy topograficznej jest – szczególnie w opracowaniach lokalnych – najefektywniejszym sposobem przewidywania zakresu potencjalnych powodzi.

1. Wstęp

Po katastrofalnej powodzi w lipcu 1997 r. rząd Polski podpisał w grudniu 1997 r. umowę z Bankiem Światowym na sfinansowanie projektu likwidacji skutków powodzi. Jedną ze składowych tego projektu (komponent B) stanowi *Ostona przeciwpowodziowa i ograniczenie zagrożenia powodziowego*, której celem jest ograniczenie ryzyka ewentualnych przyszłych powodzi.

Komponent B składa się z czterech elementów, z których ostatni (komponent B.4. *Prewencja i ograniczenie zagrożenia powodziowego*) poświęcony jest roli niestrukturalnych środków ograniczania skutków powodzi i szeroko rozumianej prewencji, takich jak organizacja, informacja, edukacja społeczeństwa, zagospodarowanie przestrzenne. Zagadnienie to jest obecnie realizowane w formie pilotażu dla wybranych jednostek samorządowych – gmin i powiatów, które opracowują własne, lokalne plany ochrony przeciwpowodziowej przy pomocy konsultantów zatrudnionych przez Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego we Wrocławiu oraz dwóch

swoich jednostek organizacyjnych – Biur Lokalnej Ochrony Przeciwpowodziowej w Krakowie i we Wrocławiu. W ramach tego projektu przewidywane jest wsparcie finansowe w celu wdrożenia najlepszych programów pilotażowych.

Lokalne plany ochrony przed powodzią wykorzystują mapy stref zalewowych. Strefy te, zwane także strefami zagrożenia powodziowego, wyznaczane są zwykle na mapach topograficznych i określają przestrzenny zasięg powodzi historycznych oraz teoretycznych, o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia (okresie powtarzalności w latach). Celem ogólnym wyznaczenia stref, według metodyki będącej przedmiotem opracowania wspomnianego wyżej komponentu B.4, jest zmiana zasad użytkowania terenu na obszarach zalewowych (S. KostECKI 2000, E. Nachlik 2000). W szczególności dla różnych stref ryzyka powodziowego wprowadza się zmiany w lokalnych planach zagospodarowania terenu, bardziej rygorystyczne przepisy posadowienia budowli oraz odpowiedni system ubezpieczeń.

Strefy zagrożenia powodzią można określać na istniejących mapach sytuacyjno-wysokościowych nanosząc granice obszaru zalewowego wyznaczonego przez rzędne zwierciadła wody oraz uwzględniając przebieg poziomicy. Praca ta jest jednak bardzo czasochłonna, szczególnie kiedy należy wykonać kilka symulacji położenia zwierciadła wody na danym obszarze. Dlatego znacznie korzystniejsze jest posłużenie się metodami komputerowymi z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu i mapy numerycznej.

Należy zauważyć, że mimo iż numeryczne modele terenu są znane i wykorzystywane w Polsce

* Autor jest konsultantem Banku Światowego w zakresie identyfikacji zagrożeń oraz opracowania map terenów zalewowych.

od kilku lat jako elementy systemów informacji przestrzennej, to zastosowanie ich do wyznaczenia zasięgu wezbrań powodziowych nie zostało jeszcze szczególnie opisane w literaturze, w której pojawiło się jak do tej pory zaledwie kilka opracowań przedstawiających ten problem, np. jako opracowanie wielkoobszarowe doliny Wisły koło Płocka (A. Magnuszewski 1999) i lokalne doliny Dunajca (E. Nachlik 2000).

Metodyka wyznaczania stref zalewowych z wykorzystaniem metod komputerowych znajduje się w stadium kształtowania, stąd jednym z celów autorów niniejszego artykułu jest zaproponowanie jasnych i przejrzystych zasad postępowania.

Do wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego metodą numeryczną niezbędne jest opracowanie i połączenie trzech zasadniczych elementów, tj. wysokości zwierciadła wody powodziowej obliczonej za pomocą modelu hydraulicznego, numerycznego modelu terenu (NMT) oraz numerycznych map topograficznych. Dokładność otrzymanego zasięgu zalania i jego głębokości w istotny sposób zależy od źródeł danych wykorzystanych do budowy NMT.

W dalszej części omówione zostaną doświadczenia autorów z zastosowaniem numerycznego modelu terenu do wyznaczania stref zagrożenia powodziowego na potrzeby wdrożenia pilotażowego wspomnianego wcześniej projektu Banku Światowego, obejmującego w fazie I cztery obiekty: miasto Kłodzko, gminę Kamieniec Żąbkowicki, gminę Brzesko oraz Kraków (obszar objęty oddziaływaniem Wisły w km 75,0–76,8 – lewobrzeżny obszar miasta).

2. Źródła danych dla NMT

Najdokładniejszą metodą pozyskiwania danych do budowy NMT, ale także najkosztowniejszą, są pomiary bezpośrednie stosowane wówczas, gdy potrzebna jest wysoka precyzja odwzorowania rzeczywistego kształtu powierzchni terenu. W większości przypadków jako źródła opracowania można wykorzystywać istniejące zdjęcia lotnicze wykonane w ramach programu PHARE lub obrazy satelitarne (m.in. z programu IKONOS). Dzięki aerotriangulacji cyfrowej na podstawie powyższych źródeł możliwe jest wykonanie NMT w skali 1:10 000–1:25 000. Inną metodą, stosowaną od niedawna w krajach zachodnich, jest metoda skaningu laserowego. W przypadku, gdy zastosowanie jednego z powyższych sposobów jest niemożliwe lub zbyt kosztowne, najlepszym źródłem danych są opracowania kartograficzne.

2.1. Fotogrametria

Fotogrametryczny pomiar zdjęć lotniczych wydaje się być najlepszym sposobem pozyskiwania informacji niezbędnych do generowania NMT (Z. Kurczyński 1998).

Pomiar na autografii obejmuje punkty w miarę regularnie pokrywające obszar oraz punkty reprezentujące formy terenowe (linie szkieletowe, linie nieciągłości). Szacuje się, że przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych w skali 1:26 000 (pochodzących z programu PHARE), na autografii analitycznym można uzyskać odwzorowanie wysokości z dokładnością 0,60 m, natomiast dokładność wykonanego NMT wahać się może w granicach 0,67–1,76 m (Z. Kurczyński 1998). Barwne zdjęcia programu PHARE uniemożliwiają osiągnięcie wyższej dokładności, gdyż wykonane były przy braku sygnalizowanych fotopunktów. Na autografii cyfrowym przy pomiarze całkowicie automatycznym dokładność uzyskanego NMT jest porównywalna lub wyższa (P. Krzystek 1998, R. Kaczyński, J. Ziobro 1998). Słabość tej metody widać jedynie w przypadku terenów zalesionych i zabudowanych.

Budując NMT należy rozważyć również wykorzystanie obrazów satelitarnych. Wykorzystywane są dziś obrazy pochodzące ze skanerów elektrooptycznych obrazujących powierzchnię Ziemi w trybie stereo. Ocenia się, że dokładność pomiaru wysokości z dostępnych obrazów satelitarnych wynosi (Z. Kurczyński 1998):

- dla obrazów MOMS-02 (piksel 13,5m) $m_z = 5\text{--}14$ m,
- dla obrazów SPOT-P (piksel 10m) $m_z = 4\text{--}11$ m,
- dla obrazów IKONOS-2 (piksel 1m) $m_z = 3$ m (W. Sujkowska, R. Kaczyński 1999).

2.2. Skaningu laserowego

Skaner laserowy jest szybko działającym dalmierzem laserowym, który „przeczesuje” teren poprzecznie do kierunku lotu samolotu (lub helikoptera) i krótkimi impulsami lasera „próbuje” teren mierząc odległość. Wzdłuż trajektorii lotu otrzymuje się quasi-ciągły model powierzchni pasa terenu. Błąd wyznaczenia wysokości dla komercyjnych systemów wynosi: $m_z < 1,0$ m (M. Flood, B. Gutelius 1997), a precyzyjniej $m_z = 0,15\text{--}0,25$ m (Z. Kurczyński 1999, P. Frieß, C. Werner 1998). Wadą tego systemu jest konieczność „odfiltrowania”, na etapie obróbki wyników pomiarów, odbici od budynków, drzew, samochodów itp., w celu uzyskania właściwej wysokości terenu.

2.3. Metoda kartograficzna

W przypadku, gdy dany teren nie ma pokrycia

zdjęciami lotniczymi i nie jest możliwe lub nie ma ekonomicznego uzasadnienia przeprowadzenie pomiarów fotogrametrycznych, stosunkowo najdokładniejszym źródłem danych dla numerycznego modelu terenu – oprócz bezpośredniego pomiaru w terenie – jest mapa topograficzna. Z tego powodu w omawianym projekcie pilotażowym, za podstawę opracowania modelu przyjęto mapy topograficzne w skali 1:10 000 w układach odniesienia „1965” i „1992”.

Każda mapa jest obciążona pewnym typem i zakresem błędów. Ich źródłem są pomiary geodezyjne i topograficzne, procesy interpolacji i generalizacji, rysowanie mapy, zniekształcenia nośnika ozalidowego oraz kolejne reprodukcje mapy. Deformacje nośnika mapy analogowej można zminimalizować w procesie kalibracji (rejestracji) jej obrazu rastrowego. Pozostałe niedokładności będą przeniesione na NMT.

Położenie punktów wysokościowych na mapie topograficznej wyznaczone jest z dokładnością 10 m w poziomie (druga grupa dokładnościowa, *Instrukcja techniczna K-2* 1989), powszechnie zaś uważa się, że wysokość przedstawiana jest z dokładnością $\frac{1}{3}$ wartości zastosowanego cięcia poziomicy.

Zgodność numerycznego modelu terenu z powierzchnią rzeczywistą można wyrazić za pomocą średniego błędu modelu (J. Gaździcki 1990). Ocenia się, że średni błąd określenia wysokości w NMT skonstruowanym z materiałów kartograficznych o cięciu poziomicy 5 m wynosi 1,67 m przy nachyleniu terenu poniżej 2% i 3,33 m dla nachylenia powyżej 2% (J. Przywara 2000). W przypadku budowy modelu na podstawie map w skali 1:10000 i wprowadzenia wszystkich poziomicy co 1,25 m oraz linii szkieletowych należy oczekiwać znacznie większych niż podane wyżej dokładności.

Przydatność map topograficznych do budowy NMT można oceniać, dokonując analizy dokładności wykonanego modelu. Najprostszym i najlepszym sposobem weryfikacji NMT jest odczytanie wysokości w wybranych punktach modelu i porównanie ich z wysokością rzeczywistą otrzymaną z pomiarów bezpośrednich.

W przypadku omawianego projektu pilotażowego, weryfikację dokładności numerycznych modeli terenu oraz obliczeń hydraulicznych przeprowadzono przez porównanie wygenerowanych stref zalewowych z zasięgiem zalewu i jego wysokością, określonymi na podstawie pomiarów geodezyjnych w terenie po powodzi 1997 roku.

3. Metodyka wykonania NMT do wyznaczania stref zalewowych

3.1. Zastosowany typ NMT

Pośród różnych rodzajów NMT najbardziej znany i rozpowszechniony jest model TIN (ang. *Triangular Irregular Network*) oparty na siatce trójkątnej oraz model GRID, którego podstawą jest regularna siatka, z reguły prostokątna. Jeśli dane źródłowe do budowy modelu stanowią zbiór nieregularnie położonych punktów wysokościowych, to najlepszą aproksymację rzeczywistej powierzchni terenu uzyskuje się z modelu TIN. W przypadku rozpatrywanych czterech obiektów pilotażowych dane dla NMT stanowił zbiór punktów wysokościowych rozmieszczonych nieregularnie. Zgodnie z definicją Z. Adamczewskiego (1998), model taki należy do grupy modeli numerycznych TIN.

3.2. Przekroje dolinowe jako osnowa modelu

Znajomość poprzecznych przekrojów dolinowych jest niezbędna do poprawnego opracowania stref zalewowych. Przekroje są przede wszystkim podstawą obliczeń hydraulicznych, umożliwiających wyznaczenie poziomów wody. Ponadto ich wprowadzenie do NMT uzupełnia informację o morfologii doliny rzeki i kształcie koryta, którego nie można odczytać bezpośrednio z mapy topograficznej.

Uwzględnienie przekrojów w modelu może odbywać się dwoma sposobami:

- wprowadzone przed zbudowaniem NMT dla doliny rzeki stają się swoistą osnową kształtującą ten element,
- wprowadzone po zbudowaniu NMT dla doliny są elementem kontrolnym i podstawą do modyfikacji modelu.

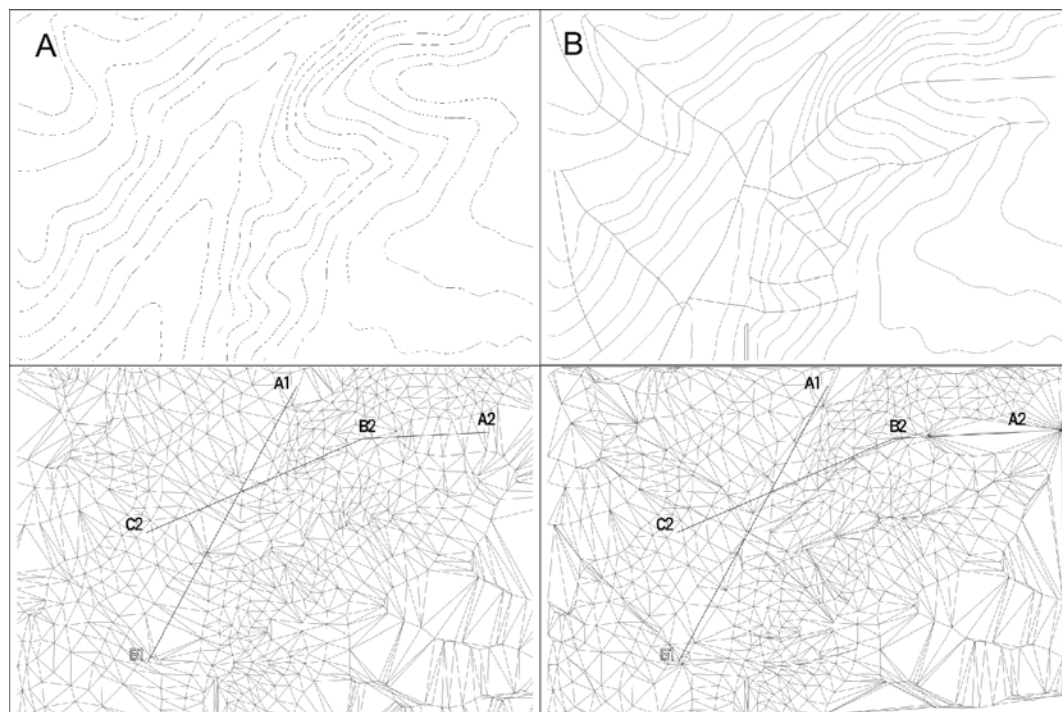
Drugi z wymienionych sposobów podejścia jest bardziej racjonalny z uwagi na konieczność modyfikacji już wykonanych elementów.

Przekroje poprzeczne dolin rzecznych najczęściej przybierają postać łamanej, której parametry wyznaczone są przez długość przekroju, bezwzględną wysokość każdego węzła przekroju (m n.p.m.) oraz kilometrąż cieku (względem ujścia), na którym umiejscowiony jest przekrój.

W przypadku trzech rozpatrywanych obiektów pilotażowych, pomierzone przekroje poprzeczne dolin i koryt rzecznych wykorzystano bezpośrednio do budowy NMT. W przypadku gminy Brzesko przekroje zostały wykonane w terminie późniejszym i postanowiono wykorzystać je do weryfikacji skonstruowanego wcześniej NMT. Różnice wysokości punktów przekroju i odpowiadających im punktów modelu osiągały nawet 6 m i dotyczyły najbardziej zmiennych elementów koryta rzeczного i słabo scharakteryzowanych

pod względem przedstawiania wysokości: linii brzegowej i krawędzi terasy zalewowej. Stąd przekroje okazały się niezbędnym uzupełnieniem mapy w miejscach o niedostatecznej lub niejed-

się za pomocą zestawu programów: MicroStation (Bentley Systems), IrasB, InRoads, Igeovec (wszystkie w systemie Intergraph) i objął etapy:



Ryc. 1. Numeryczny model terenu bez użycia linii szkieletowych (a) oraz z liniami szkieletowymi (b) – południowy skłon Wysoczyzny Ziębickiej

Fig. 1. Digital terrain model with (a) and without (b) skeleton lines. Southern slope of Wysoczyzna Ziębicka

noznacznej informacji wysokościowej, a w pozostałych zwiększyły znaczenie dokładność NMT.

3.3. Interpretacja treści mapy

Dostępne mapy topograficzne obiektów pilotażowych wykonane były w różnych układach odwzorowawczych i według odmiennych wzorów znaków. Ponadto mapy te różniły się również nieznacznie stopniem generalizacji oraz – co miało szczególny wpływ na opracowany NMT – odmienną interpolacją poziomicy.

Do NMT zostały wprowadzone następujące elementy: punkty wysokościowe, poziomice i skarpy (linie nieciągłości) – odczytane bezpośrednio z mapy oraz linie szkieletowe (linie grzbietowe, linie dolinowe) – zinterpretowane na podstawie przebiegu poziomicy i cieków.

Proces wprowadzania danych do NMT odbywał

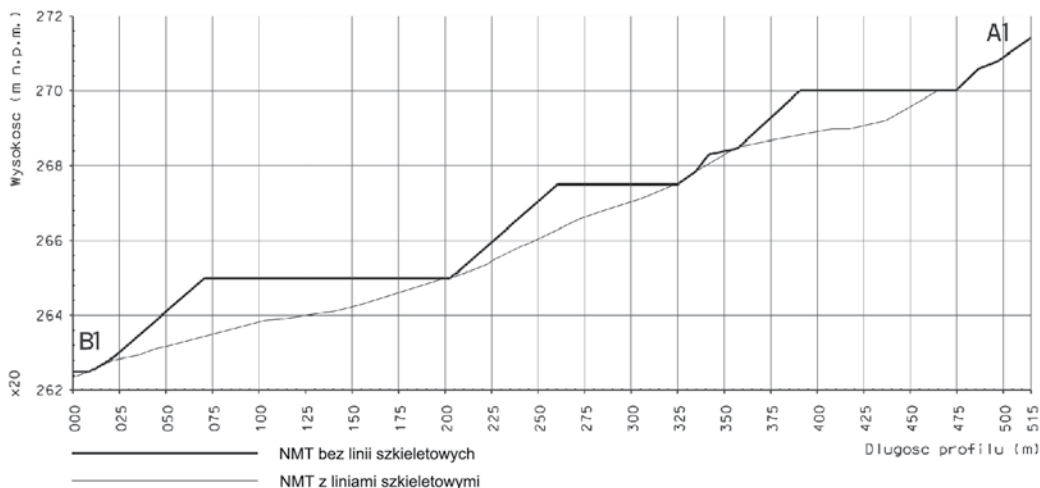
- skanowania map analogowych,
- kalibracji (rejestracji) obrazów rastrowych map,
- wektoryzacji obrazów rastrowych,
- triangulacji danych wektorowych.

Do poprawnego odczytania elementów rzeźby terenu z mapy analogowej wystarczający był proces skanowania z rozdzielczością 400 dpi, w wyniku którego uzyskano obrazy 1-bitowe w formacie .cit. Skanowaniu podlegały odbitki z diapozytywów wydawniczych map topograficznych. Tam gdzie było to możliwe, pozyskano oddzielnie obrazy sytuacji i rzeźby terenu celem oddzielnej półautomatycznej wektoryzacji w programie Igeovec.

Kalibrację (rejestrację) obrazów rastrowych wykonano metodą afiniczną, wybierając jako punkty charakterystyczne węzły siatki kilometrowej. Miarą dokładności procesu kalibracji

było nieprzekroczenie 0,1 mm różnicy między wyliczoną siatką kilometrową a jej obrazem na skalibrowanym rastrze mapy analogowej. W przypadku rastrowych obrazów rzeźby, na których nie

Żyszkowska 1993). W niniejszym opracowaniu do NMT wprowadzono poziomicę o cięciu 5 m i 1,25 m oraz elementy dodatkowe, które przedstawiały wszelkie formy terenowe (np. wąwozy, przełę-



Ryc. 2. Porównanie przekrojów podłużnych doliny ujętej w modelu skonstruowanym z wykorzystaniem linii szkieletowych i modelu bez linii szkieletowych

Fig. 2. Comparison of oblong sections of a valley presented with the use of two models – with and without skeleton lines

są rysowane linie siatki kilometrowej, kalibrację przeprowadzano na podstawie narożników mapy, krzyży paserskich i nielicznych punktów, które udało się jednoznacznie zidentyfikować z nakładką sytuacji.

Proces wektoryzacji elementów rzeźby polegał na zapisaniu tych elementów w postaci trzech współrzędnych wraz z zapisem topologicznym, dzięki czemu możliwe było wprowadzenie do NMT takich elementów jak poziomicę, skarpy i linie szkieletowe. Do takiego zapisu wykorzystano manualną wektoryzację ekranową. W procesie automatycznej wektoryzacji poziomicy programem Igeovec współrzędna wysokości ($z = \text{const.}$) została zapisana w postaci atrybutu (etykiety).

Najdokładniejszym elementem wprowadzonym do modelu są pikietki wysokościowe, a w mniejszym stopniu poziomicę – ze względu na błędy interpolacji oraz z powodu niekiedy niejednoznacznej identyfikacji ich wartości, szczególnie na obszarach gęsto zabudowanych. Umiejętność właściwego wybierania punktów do budowy modelu wymaga znajomości cech rzeźby, a także pewnego doświadczenia w pracy z programami służącymi do jego opracowania (D. Kładoczný, W.

cze, doliny itp.), uzupełnione ponadto liniami szkieletowymi (ryc.1). Miało to na celu uniknięcie zniekształcenia tych form w wyniku procesu triangulacji. Bez wprowadzenia poprawnych linii szkieletowych istnieje duże prawdopodobieństwo powstania w modelu spłaszczeń form terenowych, objawiające się kaskadowym kształtem wąskich dolin, nienaturalnym spłaszczeniem ich dna oraz ściętością – części wierzchołkowych (A. Carrara, G. Bitelli, R. Carla 1997). Problem ten przedstawiony został na rycinie 2.

Jeżeli przeliczenie układu „1965” na przyjęty jednolity układ „1992” było jednoznaczne, podobnie jak identyfikacja starych znaków i zakodowanie ich wzorami nowej instrukcji z 1999 r., to interpretacja wartości, jakie kryły się pod tymi znakami na różnych mapach, napotykała na pewne trudności, szczególnie w przypadku wysokości skarp zaprezentowanych symbolem. Skarpy – wprowadzane do numerycznego modelu terenu jako linie nieciągłości – miały podstawowe znaczenie dla wiarygodności modelu, szczególnie tam, gdzie stanowiły realną barierę dla wody. Tablica 1 pokazuje różny sposób oznaczania skarp w zależności od różnych wzorów znaków, stosowanych na mapach użytych w omawianym

projekcie.

Do modelu wprowadzano skarpy i wały:

- których rzeczywista szerokość i wysokość odpowiada znakom wyznaczającym rzeczywisty

zasięg strefy zalewu, modyfikowano jej wysokość, jednakże tylko w granicach wysokości określonych instrukcją.

Osobnym i bardzo istotnym problemem, który

Tablica 1. Porównanie symboli zastosowanych do przedstawienia rzeźby terenu

Wzory znaków	Wysokość skarp (m)	Wysokość wałów i grobli (m)
Zasady redakcji Mapy Topograficznej w skali 1:10 000, Wzory znaków, Instrukcja techniczna (1999)	<ul style="list-style-type: none"> • skarpy o wysokości od 1 do 2 m przedstawia się bez opisu wysokości, • skarpy wyższe od 2 m opisuje się z dokładnością 0,5 m. Szerokość skarpy (jej rzutu) jeżeli jest mniejsza niż 7 m (0,7 mm na mapie) rysuje się symbolem o długości kresek 0,5 mm. Skarpy szersze (w rzucie) niż 7 m rysuje się kreskami, których długość odpowiada szerokości skarpy. 	<p>Rysuje się wały i groble o wysokości powyżej 1 m wały mogą być rysowane również poniżej 1 m wysokości, jeżeli stanowią kontynuację wałów o wysokości powyżej 1 m. Wały wyższe od 2 m opisuje się z dokładnością 0,5 m i rysuje symbolem wg zasad dla skarp. Szerokość korony wału rysuje się:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bez przedstawiania szerokości korony wału dla wałów nie przekraczających 3 m w koronie, • symbolem korony o szerokości 0,5 m dla wałów o rzeczywistej szerokości korony 35 m, • w skali dla wałów powyżej 5 m szerokości korony
Zasady redakcji Mapy Topograficznej w skali 1:10 000 Wzory znaków (1994)	<ul style="list-style-type: none"> • skarpy o wysokości od 1 do 2 m przedstawia się bez opisu wysokości, • skarpy wyższe od 2 m opisuje się z dokładnością 0,5 m. Szerokość skarpy (jej rzutu) jeżeli jest mniejsza niż 7 m (0,7 mm na mapie) rysuje się symbolem o długości kresek 0,5 mm. Skarpy szersze (w rzucie) niż 7 m rysuje się kreskami, których długość odpowiada szerokości skarpy 	<p>Rysuje się tylko i wyłącznie wały i groble o wysokości powyżej 1 m. Wały wyższe od 2 m opisuje się z dokładnością 0,5 m i rysuje się symbolem wg zasad dla skarp. Szerokość korony wału rysuje się:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bez przedstawiania szerokości korony wału dla wałów nie przekraczających 2 m w koronie, • symbolem korony o szerokości 0,3 m dla wałów o rzeczywistej szerokości korony 25 m, w skali dla wałów powyżej 5 m szerokości korony.
Wzory i objaśnienia znaków umownych i napisów stosowanych na mapach topograficznych w skalach 1:5000 i 1:10 000 (1989)	<ul style="list-style-type: none"> • skarpy powyżej 1 m opisane są z dokładnością 0,1 m, • skarpy wyższe od 5 m opisane są z dokładnością 0,5 m. Szerokość skarpy (jej rzutu) wyznaczana jest długością kresek – gdy jest to niemożliwe, stosuje się symbol skarpy o długości kreski 0,5 mm 	<p>Rysuje się wszystkie wały. Wysokość wału opisuje się z dokładnością 0,1 m, a szerokość wału z dokładnością 1 m. Szerokość korony wału rysuje się:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bez przedstawiania szerokości korony wału dla wałów nie przekraczających 2 m w koronie, • symbolem korony o szerokości 0,5 m dla wałów o rzeczywistej szerokości korony powyżej 2 m.

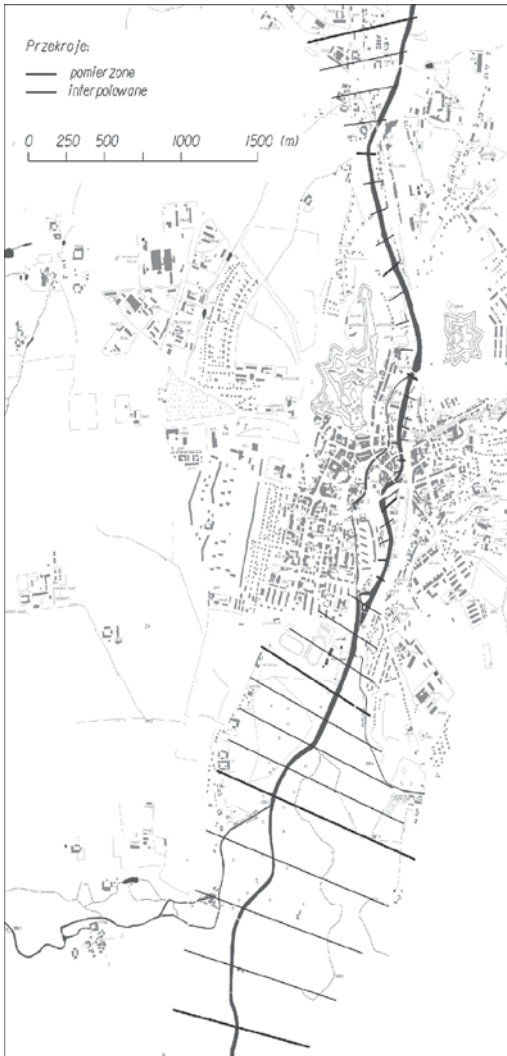
zakres z przypisaną wysokością względną,

- które oznaczone są znakiem symbolicznym – przypisano im średnią wysokość (z przedziału wymienionego w tablicy 1); w przypadku, kiedy tak zinterpretowana skarpa powodowała niewłaściwy (weryfikowany powodzią historyczną)

rozwiązywano w ramach omawianego projektu, było skonstruowanie modelu dla terenów zabudowanych. Wobec braku na tych obszarach nierzadko jakiejkolwiek informacji o rzeźbie terenu i jego bezwzględnej wysokości, okazało się niezbędne wykorzystanie dodatkowych źródeł w postaci map

zasadniczych i pozyskania z nich do modelu jak najwięcej punktów wysokościowych.

Konstruowanie NMT odbyło się za pomocą programu InRoads, w którym dokonano procesu



Ryc. 3. Przekroje poprzeczne na Nysie Kłodzkiej (125.350 – 132.730 km) w Kłodzku

Fig. 3. Profiles of the Nysa Kłodzka river (125.350–132.730 km) on location in Kłodzko

triangulacji. Zastosowano standardową procedurę wykonywania nieregularnego modelu, zwaną metodą Dealunay'a. Metoda ta polega na wyznaczeniu sieci trójkątów, takich by okręgi opisane na tych trójkątach nie zawierały wierzchołka innego

trójkąta (R. Weibel, M. Heller 1991). Trójkąty te wg tego warunku są w przybliżeniu równokątne.

4. Delimitacja stref zalewowych

Niezbędnym elementem wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego jest wykonanie obliczeń na modelu hydraulicznym lub hydrodynamicznym, w zależności od rozpatrywanego zjawiska powodzi. W fazie wstępnej zakres obliczeń hydraulicznych obejmuje wyznaczenie profilu zwierciadła wody dla przepływów o prawdopodobieństwie przewyższenia 10% i 1% (woda 10- i 100-letnia) dla powodzi w rzekach lub zasięgu spływu powierzchniowego dla potoków oraz stoków o dużych spadkach, dla których wyznacza się przepływ miarodajny zgodnie z obowiązującymi przepisami. W fazie rozwiniętych analiz dokonuje się również wyznaczania pozostałych stref zagrożenia zgodnie z proponowaną metodologią (E. Nachlik 2000).

Dla rzek obwałowanych i zabezpieczonych przed wodami o wspomnianym prawdopodobieństwie, celowe jest symulowanie prawdopodobnych awarii wałów przeciwpowodziowych i obliczanie rzędnych zwierciadła wody na zawale, posługując się odpowiednim modelem hydraulicznym lub hydrodynamicznym.

Wyniki obliczeń hydraulicznych dla modeli liniowych otrzymuje się na profilu podłużnym rzeki w punktach odpowiadających niwelacyjnym przekrojom poprzecznym oraz wyinterpolowanym przez program (ryc. 3). Dla modeli dwuwymiarowych otrzymuje się rzędne zwierciadła wody w postaci zbioru punktów o współrzędnych x , y , z na obszarze zalewowym.

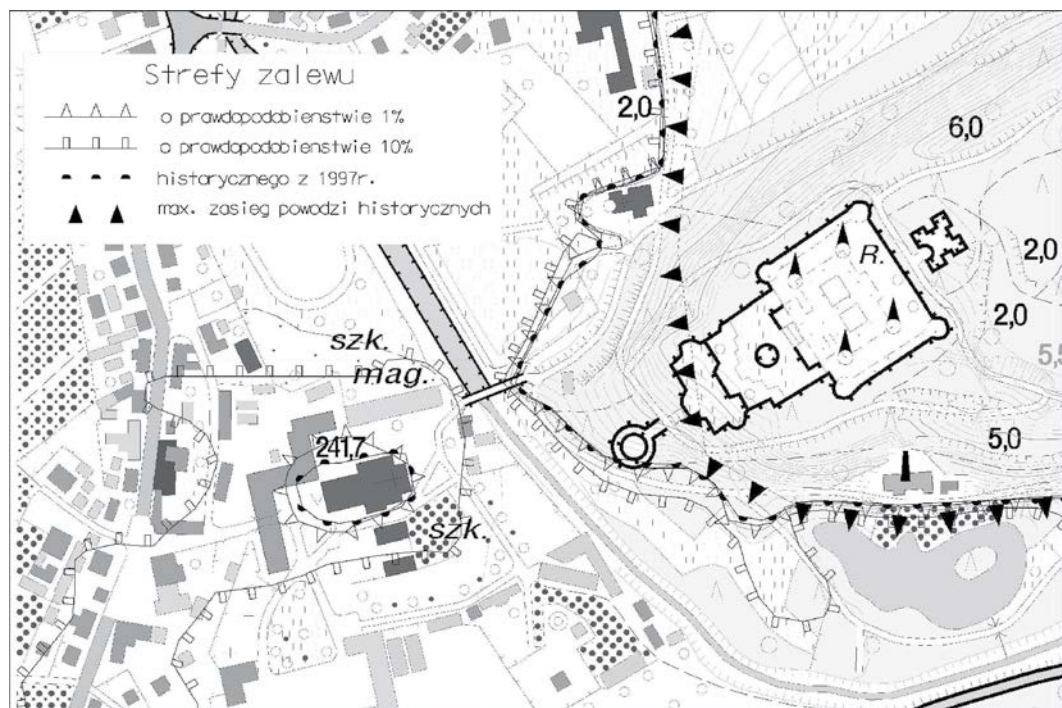
Wyznaczenie stref zalewowych polega na wprowadzeniu na NMT rzędnych zwierciadła wody uzyskanych z modelu hydraulicznego i utworzeniu na tej podstawie numerycznego modelu powierzchni wody (NMPW). Proces ten przebiega następująco:

- dla liniowego modelu hydraulicznego, w którym rzędne zwierciadła przypisane są do kilometrażu rzeki, należy odtworzyć w NMT położenie przekrojów poprzecznych – zamierzonych i interpolowanych oraz nanieść w ich osiach, na odpowiedniej wysokości, linie zwierciadła wody. Wysokości zwierciadła wody traktowane jako izolinie poddawane są triangulacji i tworzą numeryczny model powierzchni wody (NMPW)

- dla modelu dwuwymiarowego należy odtworzyć na NMT położenie punktów zwierciadła wody o współrzędnych x , y , z . Numeryczny model powierzchni wody w postaci TIN rozpięty może być bezpośrednio na tych punktach. Iloczyn logiczny

obu modeli – NMPW i NMT – daje w efekcie linię przecięcia powierzchni terenu z powierzchnią zwierciadła wody, która jest poszukiwaną granicą strefy zalewu.

Analizując zasięg strefy zalewowej należy ponadto zwrócić uwagę na obszary, które stanowią naturalne lokalne obniżenia lub są oddzielone od rzeki przez konstrukcje inżynierskie, a które



Ryc. 4. Strefy zalewowe w Kamieńcu Ząbkowickim: powodzi z 1997 r. (obliczona dla wody odpowiadającej powodzi 1997 r. – maksymalny przepływ $Q = 693 \text{ m}^3/\text{s}$), przepływów teoretycznych (woda 1% – $Q = 1362 \text{ m}^3/\text{s}$ i woda 10% – $Q = 679 \text{ m}^3/\text{s}$) oraz powodzi historycznych opracowanych na podstawie archiwalnych materiałów kartograficznych (wyznaczona w sposób przybliżony np. na podstawie śladów popowodziowych)

Fig. 4. Backwater zones in Kamieniec Ząbkowicki; calculated for the 1997 flood (max. flow $Q = 693 \text{ m}^3/\text{s}$), theoretical flows (1% water – $Q = 1362 \text{ m}^3/\text{s}$ and 10% water – $Q = 679 \text{ m}^3/\text{s}$) as well as for historic floods (based on archival cartographic sources – approximate zones)

Obszar strefy zalewowej jest ograniczony zasięgiem niwelowanych przekrojów poprzecznych. W praktyce, przy wyznaczaniu modelu TIN dla zwierciadła wody lepiej jest posłużyć się danymi o zasięgu zalewu historycznego. Obszar należy powiększyć w przypadku, gdy obliczone z modelu hydraulicznego wysokości zwierciadła wody są wyższe niż znaki świadczące o zalewie historycznym (ryc. 4), zwracając uwagę na możliwość występowania miejsc potencjalnie zagrożonych, które zostały ochronione przez budowę tymczasowych grobli (np. wykonanych z worków z piaskiem).

model wskaże również jako tereny zalane. Należy wówczas dokonać wyboru i pozostawić oznaczone obszary rzeczywiście zagrożone awarią budowli inżynierskiej albo podtapianiem przez przepusty lub kanalizację.

Dodatkową korzyścią wynikającą z zastosowania NMT i NMPW do wyznaczania stref zalewowych jest możliwość automatowego otrzymania izobat. Są one bardzo przydatne do wszelkiego rodzaju analiz ryzyka i szkód powodziowych, a w szczególności znajdują zastosowanie do określania granicy stref średniego i wysokiego zagrożenia powodziowego.

5. Uwagi końcowe i wnioski

Przy opracowywaniu numerycznych modeli terenu, wykorzystujących jako podkład mapy topograficzne istnieje w literaturze opinia, że w celu otrzymania odpowiedniej dokładności modelu wskazane jest, aby do wektoryzacji danych przedstawiających rzeźbę terenu wykorzystywać raster mapy w skali dwa razy większej (K. Pyka, Z. Sitek 1993).

Na podstawie przeprowadzonych prac nad wyznaczeniem stref zalewowych o określonym prawdopodobieństwie występowania, zdaniem autorów w zupełności wystarczające jest wykorzystanie do budowy NMT map w tej samej skali, jednakże pod warunkiem wykonania modelu zgodnie z podaną w niniejszym opracowaniu metodyką. Składają się na nią:

- odpowiednia interpretacja wysokości szkarp, obwałowań i innych elementów topograficznych w zależności od układu i odwzorowania,
- poprawne wniesienie linii szkieletowych (czyli elementów, które nie są oznaczone na mapie),
- wykorzystanie niwelowanych przekrojów poprzecznych do budowy modelu koryta i doliny rzeki,
- wykorzystanie dla terenów zabudowanych

dodatkowych danych wysokościowych pochodzących z map zasadniczych,

- weryfikacja opracowanego numerycznego modelu terenu.

Jednym z dostępnych i wystarczających sposobów weryfikacji NMT oraz obliczonych zasięgów stref zagrożeń powodziowych może być ich porównanie z wynikami pomiarów geodezyjnych wykonanych w terenie po powodzi.

Przedstawione na rycinie 4 przykładowe porównanie zasięgu powodzi z 1997 r. w Kamieńcu Żąbkowickim z obliczonym zasięgiem wielkiej wody o prawdopodobieństwie 1% wykazało dużą zbieżność wyników, potwierdzającą właściwy wybór metody.

Literatura

- Adamczewski Z., 1998, *Wprowadzenie do numerycznego modelowania terenu*. W: VIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Informacji Przestrzennej”. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, Warszawa, tom 1, s. 45–50.
- Carrara A., Bitelli G., Carla R., 1997, *Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines*. „Intern. J. of Geogr. Inform. Science” Vol. 11, no. 5, s. 451–473.
- Flood M., Gutelius B., 1997, *Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar*. „Photogrammetric Engineering & Remote Sensing” Vol. 63, no. 4, s. 327–366.
- Frieß P., Werner C., 1998, *Automatische Relieferfassung mittels Laserscannermessung*. 12. Informationsveranstaltung der Bayerischen Vermessungsverwaltung, Steinfurt.
- Gaździcki J., 1990, *Systemy informacji przestrzennej*. Warszawa: PPWK.
- Hake G., Grünreich D., 1994, *Kartographie*. Berlin: Walter de Gruyter. 1994, s. 267.
- Instrukcja techniczna K-2. Mapy topograficzne dla celów gospodarczych*. 1981. Warszawa: GUGiK.
- Kaczyński R., Ziobro J., 1998, *Aerotriangulacja cyfrowa*. „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji” Vol. 8, Kraków, s. 8–5–8–7.
- Kładoczny D., Żyszkowska W., 1993, *Struktura numerycznych modeli terenu a ich obraz poziomicowy*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 27, nr 4, s. 177–190.
- Kostecki S., 2000, *Zastosowanie numerycznego modelu terenu do określania zasięgu stref zagrożenia powodziowego*. W: Konferencja: Metodyka określania rodzajów i wyznaczania stref zagrożeń powodziowych, prewencja i ograniczenie ryzyka powodzi – Projekt Banku Światowego, Komponent B.4, Kraków, 19 maja 2000.
- Krätzschmar E., Hellmann M., 1999, *Kartierung des aktuellen Zustandes von Relief, Situation und thematischen Informationen mittels Radar*. W: 4. Dresdner Sommerschule für Kartographie, 27–28 September 1999, Dresden.
- Krzystek P., Wild D., 1998, *Generation of Digital Elevation Models*. W: Third Course in Digital Photogrammetry, 9–13 February 1998, Bonn.
- Kurczyński Z., 1998, *Technologiczne uwarunkowania budowy numerycznego modelu rzeźby terenu*. W: VIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Informacji Przestrzennej” Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, Warszawa, s. 59–67.
- Kurczyński Z., 1999, *DTM inaczej*. „Geodeta” nr 2 (45), s. 5–10.
- Kurczyński Z., 2000, *Nowa era geoinformatyki*. „Geodeta” nr 8 (63), s. 5–9.
- Magnuszewski A., 1999, *GIS w geografii fizycznej*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 141–148.
- Nachlik E., 2000, *Metodyka określania rodzajów i wyznaczania stref zagrożeń powodziowych*. W: Konferencja: Metodyka określania rodzajów i wyznaczania stref zagrożeń powodziowych, Prewencja i ograniczenie ryzyka powodzi – Projekt Banku Światowego,

- Komponent B.4, Kraków, 19 maja 2000.
- Przywara J., 2000, *Wyboista droga do TBD*. „Geodeta” nr 4 (59), s. 36–39.
- Pyka K., Sitek Z., 1993, *Remarks on DTM generation for GIS needs*. W: Conference on Geographical Information Systems in environmental studies, GIS for Environment, Kraków, Geographical Information Systems Laboratory, Institute of Geography, Jagiellonian University, s. 197–204.
- Sujkowska W., Kaczyński R., 1999, *Technika a polityka*. „Geodeta” nr 12 (55), s. 19–21.
- Weibel R., Heller M., 1991, *Digital Terrain Modeling, Geographical Information Systems. Principles and applications*. New York: Longman Scientific and Technical, s. 269–297.
- Wolf P. R., 1983, *Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing*. New York: McGraw – Hill Book Company.
- Wzory i objaśnienia znaków umownych i napisów stosowanych na mapach topograficznych w skalach 1:5000 i 1:10 000*, 1989. Ministerstwo Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa, Warszawa.
- Zasady redakcji mapy topograficznej w skali 1:10 000, Wzory znaków, Instrukcja techniczna*, 1999. Główny Geodeta Kraju, Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Zasady redakcji mapy topograficznej w skali 1:10 000. Wzory znaków*. 1994. Ministerstwo Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa, Główny Geodeta Kraju, Warszawa.

Recenzował dr Artur Magnuszewski

Preparation of a DTM-based potential backwater zone map

Summary

The Digital Terrain Model DTM-based potential backwater zone map pilot project ordered by the World Bank resulted in the preparation of maps of the town of Kłodzko, the communes of Kamieniec Ząbkowicki and Brzesko and the city of Kraków – the area influenced by the Wisła river.

Terrain survey is the most detailed (and also the most expensive) method of obtaining DTM data. It is used whenever very high accuracy of the terrain representation is necessary. However, for most purposes the already existing data in the form of either the PHARE Project aerial imagery or satellite imagery (such as IKONOS) can successfully supplement the original survey. Thanks to the digital aerotriangulation it is possible to prepare DTMs at the scales of 1:10,000 and 1:25,000 using those sources. The other method, much less common in Poland, consists in the use of the fly-spot scanning technique. If it is impossible (or too expensive) to use either of the above described methods, the best possible source are topographic maps. In our project the 1:10,000-scale topographic maps were used.

A Digital Terrain Model based on 1:10,000-scale

topographic maps is considered to be the adequate source to prepare a backwater zone map at the same scale providing that the following conditions are met: the height of escarpments, embankments and other topographic elements are correctly represented; the elevation of skeleton lines (which are not represented on a map) is not distorted, the surveyed cross-sections are used to construct a model of the river bed and valley; additional sources (such as base maps) are used to represent settlements and eventually, the final result has to be verified.

The flood zone line is the line of intersection between a Digital Terrain Model and a Digital Water Surface Model. Thanks to the possibility of generating the depth contours at desired intervals there are numerous possibilities of performing analyses of risks and flood damages and especially the application of these isobaths to map the limit between the zones of medium and high flood risk.

Translated by M. Okonek

Разработка карт потенциальных заливных зон на основе цифровой модели местности

Резюме

Реализуемая по заказу Мирового банка пилотажная разработка карт потенциальных заливных зон на основе цифровой модели местности (ЦММ) принесла плоды в виде созданных карт города Кłodзко, гмины Каменец Зомбковицки, гмины Бжеско и города Кракова (территории охваченной влиянием реки Вислы).

Наиболее точным методом получения данных для создания ЦММ, но также и наиболее дорогостоящим,

являются непосредственные измерения, применяемые тогда когда нужна высокая точность проекции действительной формы поверхности местности. Для большинства случаев можно использовать существующие аэрофотоснимки, выполненные в рамках программы PHARE, или спутниковые изображения (между прочим, из программы IKONOS). Благодаря цифровой аэротриангуляции на основе вышеуказанных источников

возможным является создание ЦММ в масштабе 1:10 000–1:25 000. Менее распространённым, но возможным уже для использования в Польше является метод лазерного сканирования. В случае, когда применение одного из вышеупомянутых способов является невозможным, или слишком дорогостоящим, наилучшим источником данных являются картографические разработки. В рассматриваемой пилотажной работе использованы топографические карты в масштабе 1:10 000.

Разработанные на этой основе ЦММ достаточны для создания карт заливных зон также в масштабе 1:10 000 с условием соблюдения таких условий, как: правильная интерпретация высоты откосов, земляных валов и других топографических элементов, правильное нанесение скелетных линий (т.е. элементов, которые не обозначены на карте),

использование измеренных поперечных профилей для постройки модели корыта и долины реки, использование для застроенных территорий дополнительных источников высотных данных, происходящих из карт-основ, проверка созданной цифровой модели местности.

Обозначенная линия охвата паводковых вод является линией пересечения цифровой модели местности с цифровой моделью поверхности воды. Благодаря возможности автоматического генерирования изобат в произвольном сечении существует широкая гамма анализов паводкового риска и ущерба, а в особенности применения их для определения границы зон средней и высокой паводковой угрозы.

Перевод Р. Толстикова

