

EFEKTYWNE WYKORZYSTANIE DANYCH LIDAR W DWUWYMIAROWYM MODELOWANIU HYDRAULICZNYM

EFFECTIVE APPLICATION OF LIDAR DATA IN TWO-DIMENSIONAL HYDRAULIC MODELLING

Krzysztof Bakula¹

¹ Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie hydrauliczne, lotnicze skanowanie laserowe (ALS), numeryczny model terenu (NMT), redukcja ilościowa danych, numeryczny model szorstkości podłoża

STRESZCZENIE: W niniejszym artykule zaprezentowano aspekty wykorzystania danych z lotniczego skanowania laserowego w dwuwymiarowym modelowaniu hydraulicznym obejmujących tworzenie wysokiej dokładności numerycznych modeli terenu, ich efektywnego przetworzenia będącego kompromisem pomiędzy rozdzielczością danych a ich dokładnością, a także uzyskania informacji o szorstkości pokrycia terenu dającego informacje mogące konkurować z informacjami z baz topograficznych. Prezentowane badania dotyczyły przetwarzania danych NMT w celu ich efektywnego wykorzystania z udziałem metod redukcji ilościowej danych. W wyniku oddzielnego eksperymentu udowodniono, iż dane z lotniczego skanowania laserowego umożliwiają utworzenie w pełni poprawnego dwuwymiarowego modelu hydraulicznego przy założeniu posiadania odpowiednich danych hydraulicznych, a dane z ALS mogą mieć inne zastosowanie niż tylko geometryczna reprezentacja rzeźby terenu.

1. WPROWADZENIE

Przedstawiony temat dotyczący dwuwymiarowego modelowania hydraulicznego i jest istotny w związku z szeroką dyskusją o geozagrożeniach oraz dyrektywą powodziową. Rozwijająca się wciąż technologia lotniczego skanowania laserowego (ALS), zwaną także bardziej ogólnie LIDAR, umożliwia pozyskiwanie danych z coraz większą rozdzielczością przestrzenną. Znajduje ona coraz więcej możliwości zastosowania ze względu na odmienną technikę pozyskiwania danych 3D niż typowa fotogrametria. Warto jednak pamiętać, że to często zagrożenia związane z katastrofą powodzi są bodźcem do realizacji dużych przedsięwzięć związanych z pozyskiwaniem danych z pułapu lotniczego. Nie inaczej stało się w przypadku Informatycznego Systemu Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK). W ramach tego systemu m.in. pozyskano dane techniką lotniczego skanowania laserowego, wygenerowano z nich numeryczne modele terenu (NMT), które posłużyły do generowania map zagrożenia powodziowego, a następnie przy udziale Bazy Danych Obiektów Topograficznych i innych rejestrów map ryzyka powodziowego

i planów zarządzania nim. Ogromną wartością dodaną całego ISOK jest fakt, że z racji wykorzystania tej techniki w Polsce po raz pierwszy na taką skalę, dane te zasiliły zasób CODGIK, obejmując ponad 90% powierzchni kraju. Stwarza to duże możliwości rozwoju gospodarki w wielu dziedzinach. Czy jednak w samym docelowym zadaniu, dla którego dane LIDAR zostały pozyskane, wykorzystane one były w efektywny sposób? Czy wykorzystano wszystkie możliwości wykorzystania informacji dostarczanych przez chmury punktów z ALS? Artykuł ten dotyka tego szerokiego tematu i postara się odpowiedzieć na postawione pytania. Aby jednak można było to zrobić niezbędne jest przybliżenie tematyki modelowania hydraulicznego i udziału danych geoprzestrzennych w jego realizacji.

Modelowanie hydrauliczne opisuje procesy fizyczne związane z mechaniką płynów na przykład zachowaniem się wody w korycie i na terenach zalewowych pozwalając określić rzędne zwierciadła wody, prędkości, głębokości oraz kierunki jej przepływu (wektory prędkości). Pojęcie modelowania hydraulicznego jest pojęciem dosyć ogólnym. Dotyczy generalnie analizy przepływu cieczy i może wiązać się zarówno z analizą przepływu nieustalonego, którego wartość zmienia się z upływem czasu, jak i przepływu ustalonego o stałej wartości, niezminiającej się w czasie. Wykorzystywane są do tego modele matematyczne, które to definiują podstawowy podział modeli hydraulicznych na:

- jednowymiarowe (1D),
- dwuwymiarowych (2D),
- hybrydowe (sprężone) (1D/2D, pseudo-2D),
- trójwymiarowe (3D).

Jednowymiarowy model hydrauliczny (model 1D) oparty jest na przekrojach poprzecznych rzeki. Obejmują one zarówno koryto rzeki jak i tereny potencjalnie zagrożone powodzią. Są one wynikiem interpolacji danych wysokościowych z NMT i danych batymetrycznych. Zbudowany na przekrojach model hydrauliczny analizuje prędkości przepływu wody w korycie, biorąc pod uwagę jej jedną składową prędkości związaną z kierunkiem rzeki. Wynikiem modelowania 1D jest maksymalny poziom zwierciadła wody oraz średnia prędkość przepływu w danym przekroju w kierunku do niego prostopadłym. Uzyskiwany zasięg fali wezbraniowej jest wynikiem przecięcia poziomu wody z numerycznym modelem terenu. Określone strefy zalewowe dla poszczególnych przekrojów umożliwiają stworzenie numerycznego modelu powierzchni wody (NMPW), który to poprzez odjęcie wartości wysokości z NMT daje rozkład przestrzenny głębokości wody wezbraniowej. Podejście takie nie jest skomplikowane z punktu widzenia analiz hydraulicznych, a jego wykonanie gwarantuje wiele (również darmowych) programów w połączeniu z posiadaniem oprogramowania GIS. Jednowymiarowe modele transformacji fali powodziowej mają powszechne zastosowanie. Ich zaletą jest szybkość obliczeń, prostota budowy, obszerna literatura ich dotycząca i duża liczba specjalistów – praktyków mogących takie modele tworzyć. Największą wadą tego typu rozwiązania jest fakt, że wyznaczana jest tu jedynie rzędna zwierciadła wody w osi ciekłu, a prędkość podawana jest jedynie jako wartość średnia w przekroju. Nie ma tu możliwości wyznaczenia rzeczywistych kierunków przepływu wody. Dla większości terenów uproszczenia te są możliwe do zaakceptowania, gdyż to głębokość wody zalewowej jest najistotniejsza, a założenie, iż rzędna zwierciadła wody na obszarze zalewowym jest zbliżona do rzędnej w osi rzeki jest w przypadku nieskomplikowanych cieków dopuszczalne (Radoń i Piórecki, 2012). Sytuacja wygląda jednak inaczej dla

terenów gęsto zaludnionych, w których straty wywołane katastrofą powodzi mają groźniejszy niż tylko finansowy wymiar. Na terenach tych zmiana rzędnej w przekroju, kierunek przepływu oraz prędkości chwilowe wody mają istotne znaczenie dla określania zagrożenia powodziowego. Stąd też w sytuacjach złożonego ukształtowania geometrycznego koryta rzeki i jej doliny, a także w obszarze zurbanizowanym, gdzie modele 1D wymagają zbyt wiele założeń dotyczących kierunków przepływu i tworzenia się stref retencji, stosować się powinno modelowanie dwuwymiarowe (modele 2D) (Erlich, 2008).

Na zastosowanie modelowania dwuwymiarowego w symulacjach dotyczących szczególnie terenów płaskich zwraca uwagę również Sole *et al.* (2008) uzasadniając, iż modele te dają dokładniejsze rezultaty, co jest wynikiem stosowania ciągłej reprezentacji terenu w postaci NMT, wskazując, iż model hydrodynamiczny 2D jest rozwiązaniem lepszym nawet w porównaniu z modelem jednowymiarowym, którego wysokości terenu interpolowane są z wysokorozdzielczych danych wysokościowych. Modelowanie 2D jest właściwym sposobem określenia zasięgu strefy zalewowej, który wykorzystując numeryczny model terenu, w precyzyjny sposób określa zarówno obszar zalewowy, prędkości chwilowe jak i kierunki przepływu wody, przy jednoczesnym bilansie objętości wody, która dopływa i odpływa z obszarów zalewowych (Radoń i Piórecki, 2012). Dwuwymiarowy model hydrauliczny oblicza przepływ wód o swobodnym zwierciadle z uśrednieniem w pionie prędkości przepływu rozwiązując równania zachowania masy i pędu. Wynikiem tego rodzaju modelowania jest zasięg fali wezbraniowej wraz z głębokością wody, ale także wspomniany kierunek, zwrot i wartość wektora prędkości wody w przyjętej siatce obliczeniowej dla praktycznie całości analizowanego obszaru. NMT nie służy tu jedynie do interpolowania wysokości w przyjętych przekrojach, ale, po wykonaniu obliczeń hydraulicznych, do odjęcia od numerycznego modelu powierzchni wody, jak miało to miejsce w modelowaniu jednowymiarowym. W tym przypadku model terenu bierze udział od samego początku do końca w obliczeniach hydraulicznych jako dane wejściowe określające ruch wody.

Pełne dwuwymiarowe modelowanie hydrauliczne z racji ograniczeń czasowych związanych z wdrażaniem Dyrektywy Powodziowej nie znalazło szerokiego zastosowania w tworzeniu map zagrożenia powodziowego w ramach ISOK biorąc pod uwagę powierzchnię obszaru, którego modelowanie to dotyczy. Ogólnie w ramach ISOK wykonano sumarycznie 582 modele hydrauliczne, z czego: modele jednowymiarowe (1D) obejmowały 245 przypadków, modele dwuwymiarowe (2D) obejmowały 147 przypadków, a modele hybrydowe (1D/2D) obejmowały 190 przypadków. Stanowiące kombinacje modelowania jedno i dwuwymiarowego modelowanie hybrydowe (1D/2D) były alternatywą dla modelowania 2D łączącą w sobie cechy modelowania jedno i dwuwymiarowego połączonych ze sobą.

2. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA DANYCH ALS W MODELOWANIU HYDRAULICZNYM

W przypadku opracowywania modelu hydraulicznego wyróżnić należy następujące czynności (Radoń i Piórecki, 2012):

1. Przygotowanie danych wejściowych – dotyczące głównie formatów obsługiwanych przez model;

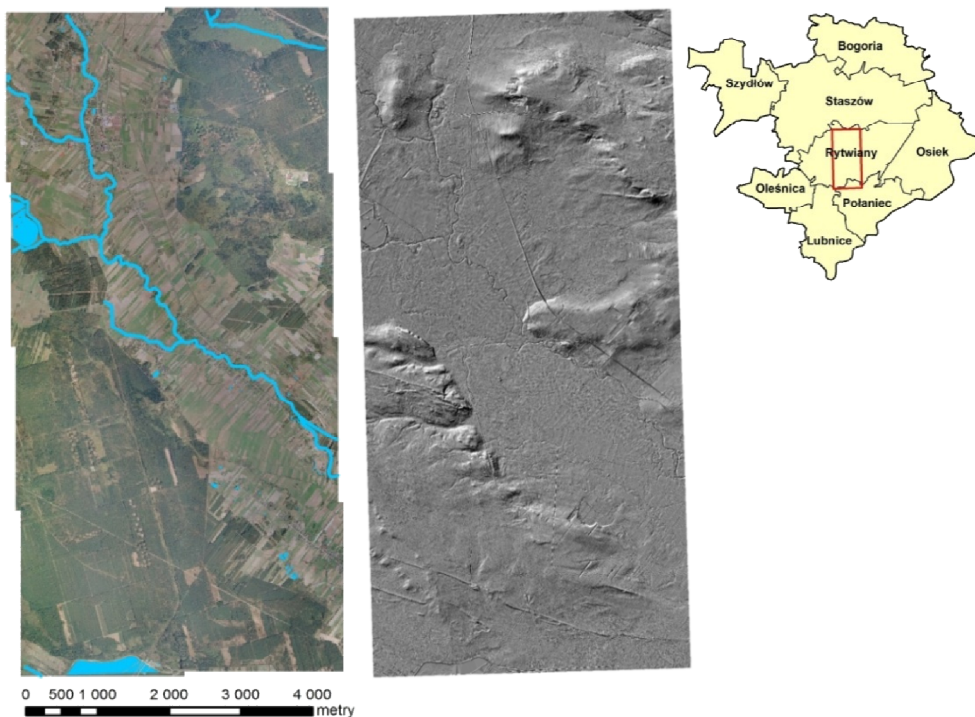
2. Opracowanie przekrojów poprzecznych – właściwe zaimplementowanie przekrojów w modelu 1D i ewentualne ich zagęszczenie poprzez interpolację, gdyż zbyt rzadkie rozmieszczenie może skutkować błędami w obliczaniu zasięgu wezbrania na obszarach zalewowych z wykorzystywaniem modelu 2D;
3. Opracowanie numerycznego modelu terenu – w przypadku niskiej rozdzielczości modelu należy pamiętać o uwzględnieniu linii nieciągłości takich jak obiekty kubaturowe, obwałowania, skarpy czy nasypy, które w istotny sposób mogą wpływać na zasięg terenów zalewowych;
4. Wprowadzenie parametrów obiektów mostowych i hydrotechnicznych – ustalenie elementów istotnych z punktu widzenia modelowania hydraulicznego takich jak współczynniki kontrakcji, wydatku lub strat szczególnie dla obiektów mostowych oraz hydrotechnicznych;
5. Określenie wartości współczynników szorstkości – podstawowy parametr służący kalibracji w modelu hydrodynamicznym;
6. Określenie warunków brzegowych procesu modelowania związanych z hydrogramami stanów wody;
7. Kalibracja modelu – wykonywana jest dla określonego wezbrania powodziowego, dla którego znany jest rozkład czasowy i przestrzenny przepływów oraz stanów wody; polegająca na określeniu parametrów modelu w taki sposób, aby otrzymać zgodny stan z powodziowym wezbraniem historycznym; zgodność ta sprowadza się do uzyskania zbieżnych hydrogramów stanów wody, zarówno pod względem wartości, jak i czasu w punktach kalibracyjnych;
8. Weryfikacja modelu – sprawdzenie dokładności modelu skalibrowanego z wykorzystaniem innych danych wejściowych (stany, przepływy) niż użyte dla celów stworzenia modelu.

Jak można zauważyć w powyższych zadaniach, w wielu czynnościach podczas opracowywania modelu hydraulicznego wykorzystywane są rozmaite dane geoprzestrzenne: dane wysokościowe, bazy danych o obiektach topograficznych, dane o pokryciu terenu, czy archiwalne dane dla weryfikacji poprawności tworzonego modelu. Dane LIDAR mają obecnie zastosowanie jedynie w tworzeniu NMT. Model ten jednak często podlega próbkowaniu w celu zwiększenia możliwości wydajnościowych oprogramowania. Analizując powyższe punkty można znaleźć więcej zastosowań, w których dane z lotniczego skanowania laserowego mogłyby zostać zastosowane. Chmury punktów tworzą dokładne źródło informacji wysokościowej i geometrycznej o obiektach hydrotechnicznych. Integracja z danymi wysokościowymi z innego źródła (np. pomiarami bezpośrednimi) uwidaczniać może ewentualny błąd systematyczny charakterystyczny dla LIDAR. Mając jedno źródło danych, całość analizy jest wolna od tego typu błędów. Sklasyfikowana chmura zaś daje informacje o pokryciu terenu, które z kolei mogą posłużyć określeniu szorstkości podłoża, będącego jednym z kluczowych zagadnień modelowania hydraulicznego.

2.1. Opis przeprowadzonych badań

Badania przedstawione w niniejszym artykule prezentują efektywne wykorzystanie potencjału, jaki zawierają chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego zarówno w wykorzystaniu ich jako danych opisujących geometryczne cechy terenu jak i cech

umożliwiających ich sklasyfikowanie, dające przybliżony opis pokrycia terenu. W badaniach wykorzystano dane z lotniczego skanowania laserowego pozyskane z CODGiK w postaci 32 sklasyfikowanych chmury w formacie LAS, z których każda odpowiadała 1/16 sekcji podziału mapy topograficznej w skali 1:10 000. Średnia gęstość chmur punktów wynosiła 4 pkt./m². Dane pozyskano w 2012 roku skanerem LiteMapper 6800i. W ramach realizacji systemu ISOK.



Rys. 1. Badany obszar testowy przedstawiony w postaci ortofotomapy z nałożoną warstwą wektorową cieków wodnych z BDOT oraz cieniowany numeryczny model terenu

Obszar badawczy znajduje się w gminie Rytwiany, powiat staszowski, województwo świętokrzyskie. Stanowi on obszar dwóch sekcji podziału mapy topograficznej w skali 1:10 000 - M-34-55-A-d-4 i M-34-55-C-b-2 o łącznej powierzchni 44 km². Pierwsza z sekcji to arkusz Rytwiany z terenem częściowo pokrytym lasami w północno – wschodniej części. Różnica wysokości w tej sekcji to blisko 47 m. Druga to miejscowość Kłoda z terenem pokrytym lasami w południowo – zachodniej części. Obserwowane różnice wysokości względnej to blisko 30 m. Całość obszaru nie stanowi zatem bardzo urozmaiconej rzeźby terenu, przez co w ramach ISOK zastosowano tu modelowanie 1D. Przez badany obszar przepływa rzeka Czarna Staszowska. Różnica rzędnej w osi koryta dla obydwu sekcji wynosiła 10.7 m, co dawało średni spadek zwierciadła wody 1.2 m na 1 km.

Model hydrodynamiczny rzeki Czarnej Staszowskiej dla celów niniejszych badań w rejonie miejscowości Rytwiany został opracowany w oprogramowaniu Mike Flood firmy

DHI (Danish Hydraulic Institute). Został on wykonany jako dwa niezależne moduły 1D oraz 2D, połączone ze sobą za pomocą tzw. połączeń lateralnych umożliwiających wymianę wody pomiędzy modulem jedno – i dwu – wymiarowym (1D/2D). Założono, iż w ramach prac analizowano przepływ wody w warunkach powodziowych, a więc takich, w których znaczna część fali powodziowej przemieszcza się poza korytem cieką po terenach, które w normalnych warunkach nie są pokryte wodą i są użytkowane w inny sposób. Model koryta rzeki Czarnej wraz z kanałami lateralnymi oraz obiektami inżynierskimi (mostami i stopniami wodnymi) został wykonany w module Mike11, jako model jednowymiarowy. Przekroje poprzeczne oraz inwentaryzacja obiektów inżynierskich zostały pozyskane z Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Krakowie (RZGW Kraków). Pomiary geodezyjne pozyskane z RZGW Kraków zostały wykonane w 2009 roku przez Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno - Kartograficzne Sp. z o.o. dla potrzeb projektu „Wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego w zlewni rzeki Czarnej Staszowskiej na odcinku od zapory Chańcza do ujścia rzeki Czarna Staszowska do Wisły jako integralny element studium ochrony przeciwpowodziowej”. Model tarasów zalewowych (a więc obszaru objętego modelowaniem poza korytami) wykonano jako model dwuwymiarowy w narzędziu Mike 21 – moduł HD (hydrodynamiczny) w oparciu o numeryczny model terenu pozyskany z danych ALS, które zostały zredukowane ilościowo tak, aby eliminacja nadliczbowej informacji o wysokości terenu nie wpływała na dokładność przetworzonego modelu. W badaniu wykorzystano również dane z ALS w celu przydzielenia empirycznych współczynników szorstkości, co zostało porównane z danymi z BDOT, które to powinno być źródłem dla tego typu prac.

2.2. Tworzenie numerycznych modeli wysokościowych

Według rozporządzenia określającego zasady opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka (Dz. U. z 2013 r. nr 0, 2013) w Polsce, obszary zagrożenia powodziowego wyznacza się w oparciu o numeryczny model terenu o interwale siatki równym 1 m i dokładności wysokościowej przynajmniej 0.15 m dla powierzchni odkrytych, utwardzonych i przynajmniej 0.30 m dla powierzchni zalesionych, wykonany metodą lotniczego skaningu laserowego (ALS), pozyskany z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego. Dokładność taką gwarantuje system ISOK, w ramach którego pozyskiwana jest sklasyfikowana chmura punktów z dokładnością pionową o błędzie poniżej 0.15 m w standardzie I i poniżej 0.10 m w standardzie II odpowiadającym terenom zurbanizowanym (Kurczynski i Bakula, 2013).

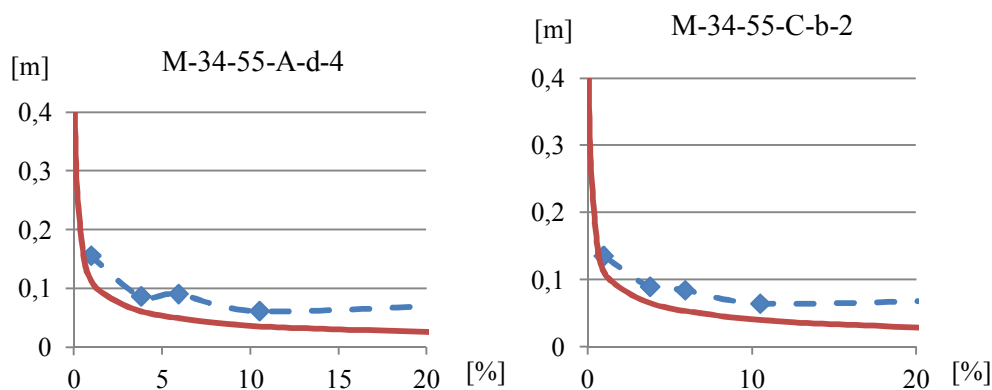
Zastosowanie danych lotniczego skanowania laserowego do tworzenia NMT jest jednym z założeń systemu ISOK. Tworzone modele reprezentują bardzo wysoką rozdzielczość przestrzenną. Jednometrowy interwał siatki wystarcza, aby w bardzo dokładny sposób zaprezentować rzeźbę terenu w przestrzeni 2.5 D. Rozdzielczość ta nie jest jednak wykorzystana w pełni w modelowaniu hydraulicznym w ramach tegoż samego systemu ISOK. W większości wypadków modele te służą do interpolacji przekrojów poprzecznych w modelowaniu 1D. W przypadku modeli 2D siatki te są degradowane za pomocą przepróbowania do mniejszej rozdzielczości - nierzadko nawet do 5-10 metrów. Operacje takie mogą powodować znaczące „wypłaszczenie” terenu związane z działalnością filtrów uśredniających. Postępowanie takie powinno być przeprowadzone

z wykorzystaniem analizy dokładności takiego przetworzenia. Nie w każdym terenie zwykle przeprowadzenie regularnej siatki NMT może mieć miejsce. Warto też zwrócić uwagę, że NMT o rozdzielczości 1 m i dokładności w terenach zurbanizowanych sięgającej pojedynczych centymetrów mogłyby być źródłem linii nieciągłości (*ang. breaklines*) tak istotnych z punktu widzenia modelowania hydraulicznego (np. korony wałów). Istnieje wiele metod automatycznej ekstrakcji linii nieciągłości (Briese *et al.*, 2009; Bakula i Kurczyński, 2013). Dane te mogłyby być również źródłem informacji o obiektach hydrotechnicznych. Zagadnienia te jednak z racji wykorzystywania modelowania 2D na niewielkich powierzchniowo obszarach i stosowania regularnych siatek obliczeniowych dla modelowania hydraulicznego nie ma w Polsce większego zastosowania.

2.3. Przetwarzanie wysokościowych danych ALS

Rozwijająca się wciąż technologia umożliwia pozyskiwanie danych z coraz większą rozdzielczością przestrzenną, co gwarantuje wierne odzwierciedlenie kształtu i wysokości terenu oraz daje wiarygodny opis pokrycia terenu. Rozmiar generowanych plików danych może jednak sprawiać duże kłopoty w ich efektywnym wykorzystaniu w skomplikowanych obliczeniach dwuwymiarowego modelowania hydraulicznego (Mandlbürger *et al.*, 2008; Bakula, 2012). Wysokorozdzielcze modele wysokościowe w złożonych algorytmach związanych z matematyczną definicją modelu ruchu wody, uniemożliwiają lub wydłużają czas trwania obliczeń dla powierzchniowo dużych obszarów, co wiąże się bezpośrednio z kosztami analiz hydraulicznych. Z prawidłowym wykorzystaniem wysokorozdzielczych danych wysokościowych wiąże się pojęcie redukcji ilościowej danych, które powinno być procesem zmniejszającym rozmiar plików, ale zachowującym również dokładność wynikowego produktu przy utrzymaniu struktury danych umożliwiającej nadal ich wykorzystanie w modelowaniu hydraulicznym. Wynika to z faktu, iż oprogramowania do modelowania hydraulicznego są ograniczone przez maksymalną liczebność punktów w pojedynczej analizie lub ograniczeniem tym jest wydajność sprzętu komputerowego czy też czas obliczeń. Zastosowanie jedynie kilku procent danych z nieprzetworzonych zbiorów, wyselekcjonowanych z użyciem algorytmów filtracji i narzędzi analiz przestrzennych, dać może zbliżony wynik modelowania hydraulicznego.

Istnieje wiele algorytmów przetwarzania danych w postaci NMT do różnego typu struktur w lepszy sposób opisujących kształt i wysokość terenu przy jednoczesnej redukcji danych. Według licznych badań najlepsze wyniki osiągać można stosując podejście wykorzystujące struktury siatek hybrydowych i drzewa czwórkowego w zapisie NMT (Mandlbürger *et al.*, 2008). Struktury o nieregularnym rozmieszczeniu punktów sprawdzają się dla terenów o trudniejszej rzeźbie, dla których siatka regularna nie gwarantuje poprawności odzwierciedlenia terenu. Rysunek 2 ukazuje analizę porównawczą spadku dokładności NMT wraz z analizowaną redukcją ilościową danych przy powszechnie wykorzystywanym przeprowadzeniu NMT i przy tworzeniu siatki hybrydowej z ekstrakcją punktów istotnych metodą Z-tolerance. W przypadku nieskomplikowanego terenu, jakimi są omawiane obszary testowe nie istnieje znacząca różnica przy wykorzystaniu obydwu z tych metod. Wykorzystanie jedynie 5% danych w obydwu przypadkach gwarantuje posiadanie przetworzonego NMT o dokładności do 10 cm względem danych wejściowych.



Rys. 2. Zależność wzrostu błędu średniego wysokości NMT od współczynnika redukcji wyrażonego jako procent danych wejściowych NMT dla metody Z-tolerance (linia ciągła) i przepróbkowania do mniejszej rozdzielczości (linia przerywana symulująca trend dla wyników przepróbkowania do mniejszych rozdzielczości tj. 2 m, 3 m, 4 m etc. – punkty na linii)

Przedstawione porównanie dwóch metod redukcji, które w tym przypadku dały zbliżone rezultaty, nie jest zazwyczaj wykonywane w praktyce, a podejście degradowania wielkości oczka siatki pozostaje powszechnie stosowane, na co wpływ ma również ogrom innych czynników i problemów w modelowaniu hydraulicznym związanym jednak z hydrologicznymi metodami obliczeniowymi w mechanice płynów.

2.4. Dane ALS a numeryczny model szorstkości

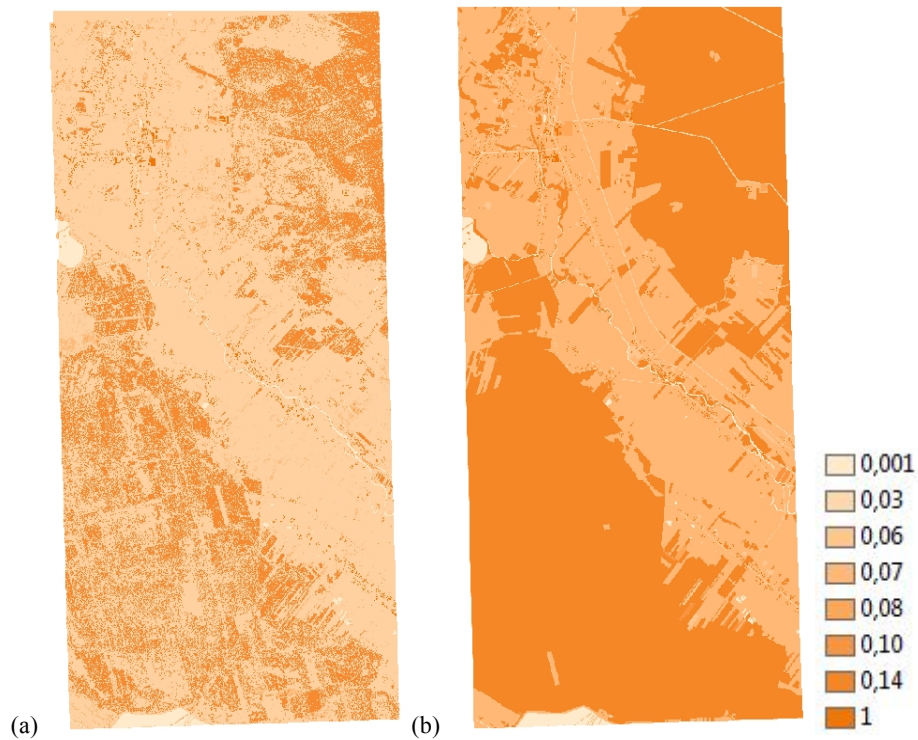
W wykonywanych obliczeniach hydraulicznych do obliczenia prędkości średniej stosuje się wzór Manninga, w którym pojawia się empiryczny współczynnik n określający wpływ roślinności przybrzeżnej na prędkość wody w rzece (Casas *et al.*, 2010; Forzieri *et al.*, 2011). Współczynnik Manninga bierze pod uwagę straty energii wody związane z tarcieniem wywołanym przez elementy pokrycia terenu dna rzecznoego i terenów nadbrzeżnych, a wynikowy rozkład szorstkości terenu jest kluczowym elementem dla modelowania hydraulicznego. Współczynnik ten zależy przede wszystkim od rodzaju pokrycia, ale również od pory roku i stanu wegetacyjnego roślinności. Istnieje wiele możliwości estymacji wielkości współczynnika szorstkości w modelowaniu hydraulicznym, który wpływa na prędkość przepływu wody. Rozkład przestrzenny takiego współczynnika w postaci dyskretnego zazwyczaj rastrowego zapisu nosi nazwę numerycznego modelu szorstkości (*ang. digital roughness model - DRM*). Źródłami jego danych mogą być ortofotomapy utworzone ze zdjęć lotniczych czy zobrażeń satelitarnych, a także produkty czy opracowania z nich powstałe np. dedykowana do tego celu Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT). W oparciu o te źródła danych najczęściej określa się przynależność fragmentu terenu do danej klasy i nadaje empirycznie wartość współczynnika. Często przy okazji pomiarów geodezyjnych wykonuje się również

dokumentację fotograficzną, która jest materiałem pomocniczym w określaniu współczynnika szorstkości dla wybranego terenu.

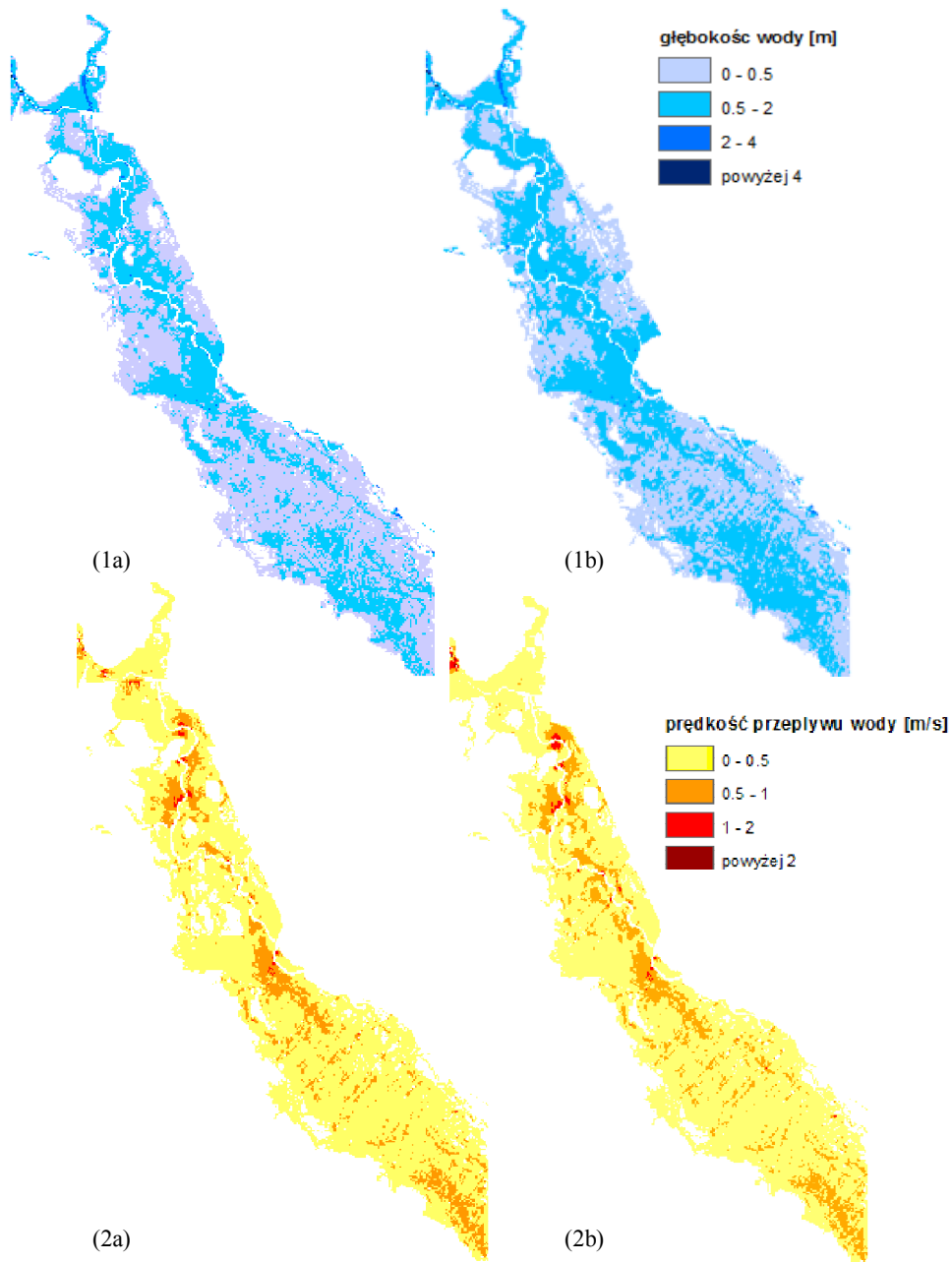
W ramach przeprowadzonego eksperymentu zweryfikowano, czy możliwe jest wykorzystanie sklasyfikowanej chmury punktów ALS. Po stworzeniu rastra zawierającego informacje z atrybutem przeważającej klasy w chmurze punktów na jednostkę powierzchni (rozdzielczość przestrzenna odpowiadająca NMT) kolejnym klasom przypisano empirycznie współczynniki szorstkości Manninga - n zgodnie z tabelą 1.

Tab. 1. Zestawienie klas użytkowania terenu sklasyfikowanej chmury punktów wraz z nadanymi współczynnikami szorstkości Manninga n

| klasa | współczynnik Manninga (n) |
|------------------------|-------------------------------|
| 2 - grunt | 0.05 |
| 3 - niska roślinność | 0.07 |
| 4 - średnia roślinność | 0.10 |
| 5 - wysoka roślinność | 0.14 |
| 6 - budynki | 1.00 |
| 7 - wody | 0.001 |



Rys. 3. Porównanie rozkładu przestrzennego numerycznego modelu szorstkości (współczynniki Manninga n) wyznaczonego ze sklasyfikowanej chmury punktów z ALS (a) i z BDOT



Rys. 4. Porównanie rozkładu przestrzennego maksymalnej głębokości (1) i maksymalnej prędkości fali wezbraniowej (2) w dwuwymiarowym modelowaniu hydraulicznym dla danych wykorzystujących jako źródło informacji o szorstkości chmurę punktów z ALS (a) i BDOT (b)

Rozkład przestrzenny współczynników szorstkości zaprezentowano na rysunku 3, na którym widać znaczące podobieństwo do numerycznego modelu szorstkości podłoża stworzonego na podstawie BDOT. Obszarami, w których widać największą różnicę są bez wątpienia tereny leśne. Na podstawie BDOT całe kompleksy otrzymywały ten sam współczynnik. Wykorzystanie chmury ALS bardzo urozmaicało rozkład przestrzenny współczynników w tych kompleksach. Wpływ ten zniwelowano podnosząc wartość współczynnika Manninga dla terenów roślinności wysokiej uzyskując przez to efekt zbliżonych rezultatów w procesie kalibracji modelu hydraulicznego.

W wyniku dwuwymiarowego modelowania hydraulicznego (prawdopodobieństwo scenariusza 1%) uzyskano rozkład fali wezbraniowej w funkcji czasu symulacji, który następnie przetworzono do rastrów rozkładu przestrzennego maksymalnej głębokości fali wezbraniowej oraz maksymalnej prędkości fali wezbraniowej, które są danymi niezbędnymi do tworzenia map zagrożenia powodziowego. Zastosowane modelowanie hydrauliczne 2D umożliwia lepsze określenie wpływu źródła danych dla przypisania współczynnika szorstkości niż modelowanie 1D, gdyż współczynnik przypisywany jest tu jedynie na przekrojach poprzecznych rozlokowanych co kilkaset metrów. Rysunek 4 prezentuje porównanie wyników modelowania hydraulicznego z wykorzystaniem sklasyfikowanej chmury punktów ALS i danych z BDOT przy określaniu pokrycia terenu i przypisywaniu współczynników szorstkości podłoża

Wizualna analiza pokazuje, że uzyskane wyniki głębokości stref zalewowych i prędkości fali wezbraniowej są dosyć podobne przy zastosowaniu zarówno danych ALS jak i BDOT w celu określenia szorstkości terenu w modelowaniu hydraulicznym. Aby sprawdzić to w analityczny sposób obliczono wskaźnik stanowiący podstawę oceny dokładności poszczególnych metod w odniesieniu do danych referencyjnych. Do porównania wygenerowanych stref zalewowych wykorzystano współczynnik podobieństwa Jaccarda stosowany w wielu publikacjach dotyczących porównywania wyników modelowania hydraulicznego (Sole *et al.*, 2008; Yamazaki *et al.*, 2012). Wskaźnik ten dostarcza informację o tym, jak podobne są do siebie dwa zbiory (w tym wypadku dwa zbiory poligonów) i oblicza się go według poniższego wzoru:

$$J(A_{ALS}, A_{ref}) = \frac{|A_{ALS} \cap A_{ref}|}{|A_{ALS} \cup A_{ref}|} \quad (1)$$

We wzorze tym licznik stanowił część wspólną zbiorów opisujących porównywane powierzchnie zalane (strefę wezbraniową uzyskaną z danych ALS o szorstkości i referencyjną z szorstkością z BDOT), a mianownik - sumy zbiorów opisujących porównywane powierzchnie zalane. Zakres wartości przyjmowanych przez współczynnik Jaccarda zawiera się w podzbiórze zbioru liczb rzeczywistych $\langle 0,1 \rangle$. Jeśli współczynnik Jaccarda przyjmuje wartości bliskie zeru to analizowane zbiory są od siebie skrajnie różne, natomiast jeśli osiąga wartości bliskie 1, zbiory są do siebie podobne. W praktyce wartość rzędu 0.8 świadczy już o bardzo wysokim podobieństwie porównywanych stref (Sole *et al.*, 2008).

W tabeli 2 zestawiono wyniki porównania strefy zalewowej uzyskanej z wykorzystaniem danych ALS. W analizie porównano strefy zalewowe zdefiniowane w rozporządzeniu.

Największe głębokości, jak również największe prędkości fali w porównaniu tym wypadły najłatwiej. Związane to było z małą powierzchnią obszarów spełniających te kryteria, przez wskaźnik ten wykazywał dużą wrażliwość na różnice w zbiorach. W przypadku prędkości przepływu uzyskano gorsze rezultaty analizując poszczególne przedziały głębokości i prędkości, co związane jest z tym, że zmiana szorstkości w większym stopniu ma wpływ na prędkość wody. Porównując całość obszaru testowego uzyskano wyniki powyżej 0.7 współczynnika podobieństwa - jest to wynik bardzo dobry pokrywający się z wizualną interpretacją rysunku 4.

Tab. 2. Zestawienie wartości współczynnika podobieństwa Jaccarda dla zakresów maksymalnej głębokości i maksymalnej prędkości fali wody wezbraniowej w odniesieniu do porównania współczynnika szorstkości pochodzącego z chmury punktów ALS względem podejścia wykorzystującego BDOT.

| współczynnik podobieństwa dla | współczynnik podobieństwa Jaccarda | | | | |
|--|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--|
| maksymalnej głębokości wody wezbraniowej | zakres głębokości wody [m] | | | | dla całości obszaru pokrytego falą wezbraniową |
| | (0 ; 0.5> | (0.5 ; 2> | (2 ; 4 > | Powyżej 4 | |
| | 0.68 | 0.72 | 0.89 | 0.64 | |
| maksymalnej prędkości przepływu wody | zakres prędkości przepływu wody [m/s] | | | | dla całości obszaru pokrytego falą wezbraniową |
| | (0 ; 0.5> | (0.5 ; 1> | (1 ; 2 > | Powyżej 2 | |
| | 0.81 | 0.28 | 0.29 | 0.28 | |

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Znacząca liczba badań i raportów dowodzi, iż dane z lotniczego skanowania laserowego są najdokładniejszym źródłem topograficznych danych wysokościowych potrzebnych do modelowania hydraulicznego. Źródło to obciążone jest jednak wieloma problemami związanymi z m.in. nadliczbowością danych, błędami przy ich przetwarzaniu. Realizacja dyrektywy powodziowej wskazuje, że wiele krajów UE wykonało naloty skanowania laserowego, aby pozyskać dane do modelowania hydraulicznego. Dane w przypadku pozyskania w projektach o zasięgu regionalnym lub krajowym są wykorzystywane w wielu innych zagadnieniach naukowych (np. leśnictwo, archeologia, urbanistyka etc.). Nie sposób jednak zgodzić się ze stwierdzeniem, że w zagadnieniach hydrologicznych ich wykorzystanie zostało do końca wyczerpane bądź wdrożone w różne zastosowania na szeroką skalę. Pełen potencjał NMT o rozdzielczości gwarantowanej przez ISOK nie jest obecnie w pełni wykorzystywany w zakresie modelowania hydraulicznego. Świadczy o tym brak zaleceń dotyczących metod i stopnia redukcji ilościowej danych, a także brak powszechnego pozyskiwania innych informacji z NMT jak choćby linii nieciągłości, które dla wcześniejszych NMT o niższej rozdzielczości (np. modele tworzone w ramach systemu LPIS) były pozyskiwane i udostępniane wraz z modelem.

Jedno z przedstawionych doświadczeń wskazało również na możliwość wykorzystania danych ALS do określenia współczynnika szorstkości, co jest kompletnie odmienną i niestosowaną często formą ich użycia. Rezultaty doświadczenia pokazały podobieństwo wyników modelowania hydraulicznego, gdy źródłem informacji o szorstkości podłoża jest zarówno BDOT jak i dane ALS.

Przedstawione problemy spowodowane mogą być niewielką współpracą środowiska geodetów w specjalnościach związanych z pozyskiwaniem danych z pułapu lotnicza i przetwarzania zbiorów danych w środowisku GIS z hydrologami zajmującymi się modelowaniem hydraulicznym. Współpraca ta ogranicza się często jedynie do tworzenia założeń projektów, w których generuje się produkty wysokościowe czy bazy danych topograficznych, podczas gdy kooperacja tak mogłaby być realizowana zawsze, gdy w grę wchodzi przetwarzanie danych geoprzestrzennych. Sytuację wykorzystania danych z lotniczego skanowania laserowego może jednak zmienić świadomość społeczna związana z możliwościami tej technologii i potencjalnymi jej zastosowaniami, promowanymi chociażby poprzez szkolenia zlecone przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii, które są obecnie realizowane.

PODZIĘKOWANIA

Badania finansowane są w ramach programu VENTURES Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej ze środków Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (PO IG), w ramach osi priorytetowej 1: „Badania i rozwój nowoczesnych technologii”, Działanie 1.2.



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Fundacja na rzecz Nauki Polskiej

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Pragnę również podziękować mgr inż. Radosławowi Radoniowi i Regionalnemu Zarządowi Gospodarki Wodnej w Krakowie za pomoc w realizacji badań i udostępnienie danych hydrologicznych.

4. LITERATURA

Bakula K., 2011. Reduction of DTM obtained from LiDAR data for flood modeling, *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, vol. 22, s. 51-61.

Bakula K., Kurczyński Z., 2013. The role of structural lines extraction from high-resolution digital terrain models in the process of height data reduction, 13th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics And Remote Sensing, *SGEM2013 Conference Proceedings*, vol. 1, s. 579 – 586

Briese C., Mandlbürger G., Ressel C., Brockmann H., 2009. Automatic Break Line Determination for the generation of a DTM along the river Main. ISPRS Workshop Laserscanning, Commission III/2, Paryż.

Casas A., Lane S., Yu D., Benito G., 2010. A method for parametrising roughness and topographic sub-grid scale effects in hydraulic modelling from LiDAR data. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, s. 1567 - 1579.

Dz. U. z 2013 r. nr 0, p. 104., 2013. Rozporządzenie Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dn.21.12.12 w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego.

Erlich M., 2008. Benefit of 2D modelling approach for urban flood management w: Dubicki A., Meteorologia, hydrologia, ochrona środowiska – kierunki badań i problemy, Warszawa, IMGW, s. 105-123.

Forzieri G., Guarnieri L., Vivoni E. R., Castelli F., Preti F., 2011. Spectral-ALS data fusion for different roughness parametrizations of forested floodplains, *River Research and Applications*, vol. 27, s. 826 – 840.

Kurczyński Z., Bakula K., 2013. The Selection of Aerial Laser Scanning Parameters for Countrywide Digital Elevation Model Creation. 13th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics And Remote Sensing, SGEM2013 Conference Proceedings, Vol. 2, s. 695 – 702.

Mandlbürger G., Hauer C., Höfle B., Habersack H., Pfeifer, N., 2008. Optimisation of LiDAR derived terrain models for river flow modelling, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 5, s. 3605-3638.

Radoń R., Piórecki M., 2012. Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego w aglomeracjach miejskich. Ogólnokrajowe Sympozjum - HYDROTECHNIA XIV 2012. Ustroń, RZGW Kraków.

Sole A., Giosa L., Nolè L., Medina V., Bateman A., 2008. Flood risk modelling with LiDAR technology, *Wit Transactions On Ecology And The Environment*, vol. 118, s. 27-36.

Strelkoff T., 1970. Numerical solution of Saint-Venant equations. *Journal of the Hydraulics Division*, 96(1), s. 223-252.

Yamazaki D., Baugh C., Bates P., Kanae S., Alsdorf D., Oki T., 2012.). Adjustment of spaceborne DEM to use in floodplain hydrodynamic modeling, *Journal of Hydrology*, 436-437, s. 81-91.

EFFECTIVE APPLICATION OF LIDAR DATA IN TWO-DIMENSIONAL HYDRAULIC MODELLING

KEY WORDS: hydraulic modelling, airborne laser scanning (ALS), digital terrain model (DTM), data reduction, digital roughness model (DRM)

Summary

This paper presents aspects of ALS data usage in two-dimensional hydraulic modelling including generation of high-precision digital terrain models, their effective processing which is a compromise between the resolution and the accuracy of the processed data, as well as information about the roughness of the land cover providing information that could compete with information from topographic databases and orthophotomaps.

Still evolving ALS technology makes it possible to collect the data with constantly increasing spatial resolution that guarantees correct representation of the terrain shape and height. It also provides a reliable description of the land cover. However, the size of generated files may cause

problems in their effective usage in the 2D hydraulic modeling where Saint-Venant's equations are implemented. High-resolution elevation models make it impossible or prolong the duration of the calculations for large areas in complex algorithms defining a model of the water movement, which is directly related to the cost of the hydraulic analysis.

As far as an effective usage of voluminous datasets is concerned, the data reduction is recommended. Such a process should reduce the size of the data files, maintain their accuracy and keep the appropriate structure to allow their further application in the hydraulic modelling. An application of only a few percent of unprocessed datasets, selected with the use of specified filtering algorithms and spatial analysis tools, can give the same result of the hydraulic modeling obtained in a significantly shorter time than the result of the comparable operation on unprocessed datasets. Such an approach, however, is not commonly used, which means the most reliable hydraulic models are applied only in small areas in the largest cities.

Another application of ALS data is its potential usage in digital roughness model creation for 2D hydraulic models. There are many possibilities of roughness coefficient estimation in hydraulic modelling which has an impact on the velocity of water flow. As a basic and reference source for such analysis topographic databases as well as orthophotomaps from aerial or satellite imagery can be considered.

The presented paper proved that LIDAR data should be effectively applied in cooperation between surveyors and hydrologists. ALS data can be used solely in the creation of a fully correct two-dimensional hydraulic model, assuming that appropriate hydraulic datasets are available. Additionally, application of ALS data should not be limited to geometric representation of the terrain and it can be used as information about roughness of terrain.

The presented paper was financed by the Foundation for Polish Science - research grant no. VENTURES/2012-9/1 from Innovative Economy program of the European Structural Funds.

Dane autora:
Mgr inż. Krzysztof Bakula
e-mail: k.bakula@gik.pw.edu.pl
telefon: +48 22 234 76 94

Przesłano 20.10.2014
Zaakceptowano 20.12.2014