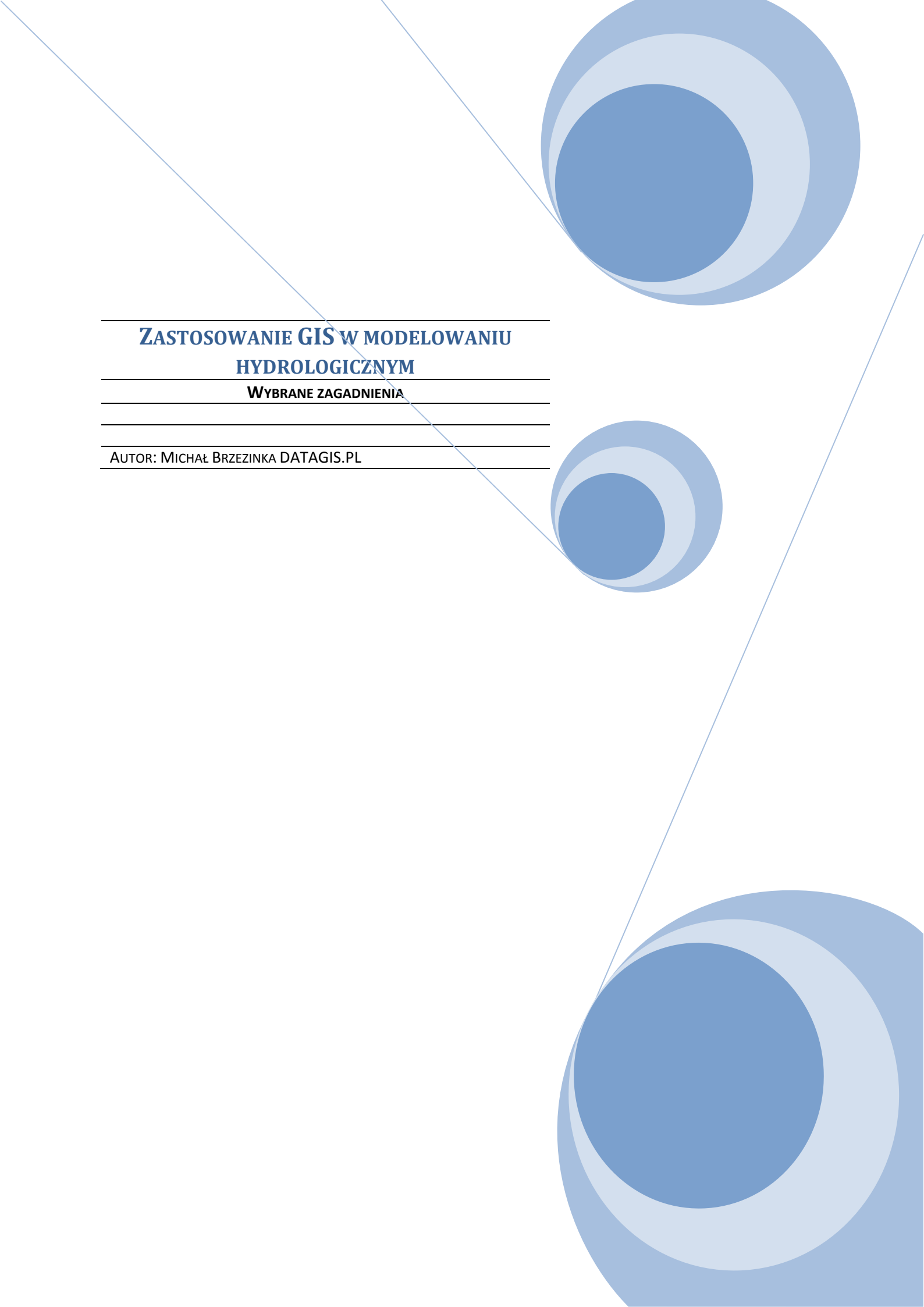


The background features three large, overlapping blue circles of varying shades (dark blue, medium blue, and light blue) and several thin, light blue diagonal lines crossing the page.

ZASTOSOWANIE GIS W MODELOWANIU HYDROLOGICZNYM

WYBRANE ZAGADNIENIA

AUTOR: MICHAŁ BRZEZINKA DATAGIS.PL

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	4
Geomorfometria za pomocą GIS	4
Dane wejściowe	4
Modelowanie hydrologiczne i hydrauliczne	6
Obszar testowy	7
PARAMETRIZACJA RZEŻBY TERENU	8
Parametry topograficzne	8
Wysokość n.p.m.	8
Wysokość względna	9
Nachylenie i ekspozycja terenu	9
Krzywizna	12
Profil poprzeczny terenu	13
Profil podłużny rzeki	14
Głębokość doliny rzecznej	15
Topograficzny indeks pozycji (TPI)	15
Otwartość topograficzna	16
Odległość od sieci rzecznej	17
Generowanie obiektów	17
Zabudowa i roślinność	17
Linie szkieletowe terenu	18
Klastry terenu	18
Sieć drenażu	19
PARAMETRIZACJA STOSUNKÓW WODNYCH	20
Przygotowanie danych do modelowania hydrologicznego i hydraulicznego	20
Filtrowanie danych i usunięcie tzw. dziur	20
Wypalenie sieci rzecznej (opcjonalnie)	20
Wypełnienie zagłębień bezodpływowych	21
Określenie kierunków i akumulacji spływu	21
Wygenerowanie sieci rzecznej (cieków stałych)	22
Segmentacja sieci rzecznej	23
Wyznaczenie obszarów i granic zlewni	23
Symulacja zasięgu fali powodziowej	24
Przygotowanie danych do symulacji	24
Wizualizacja zasięgu fali powodziowej	24
Określenie parametrów zlewni	25
Wskaźniki szorstkości terenu	25
Wskaźniki wilgotności terenu	26
Parametry fizjograficzne	27
Statystyki strefowe	27

Metryki terenu	28
WIZUALIZACJA POWIERZCHNI TERENU	29
Cieniowanie	29
Wizualizacja 2.5 D	29
Drapowanie	30
Mapa poziomicowa	31

WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zagadnień w hydrologii jest interakcja wody i powierzchni ziemi. Niezastąpionym narzędziem jest więc zastosowanie w tej dziedzinie systemów informacji geograficznej jako narzędzia do parametryzacji rzeźby i stosunków wodnych.

GEOMORFOMETRIA ZA POMOCĄ GIS

GEOMORFOMETRIA ZA POMOCĄ GIS jest to ilościowa analiza powierzchni terenu w oparciu o cyfrowe modele wysokościowe. Polega na określaniu parametrów charakteryzujących obiekty na powierzchni ziemi oraz na wydzielaniu tych obiektów z otoczenia za pomocą różnych technik GIS.

Ze względu na coraz większą dostępność i coraz lepszą jakość danych techniki geomorfometryczne zaimplementowane w oprogramowaniu GIS są coraz bardziej wydajne w parametryzacji, analizie i prognozowaniu zjawisk związanych z przepływem wody na powierzchni Ziemi.

DANE WEJŚCIOWE

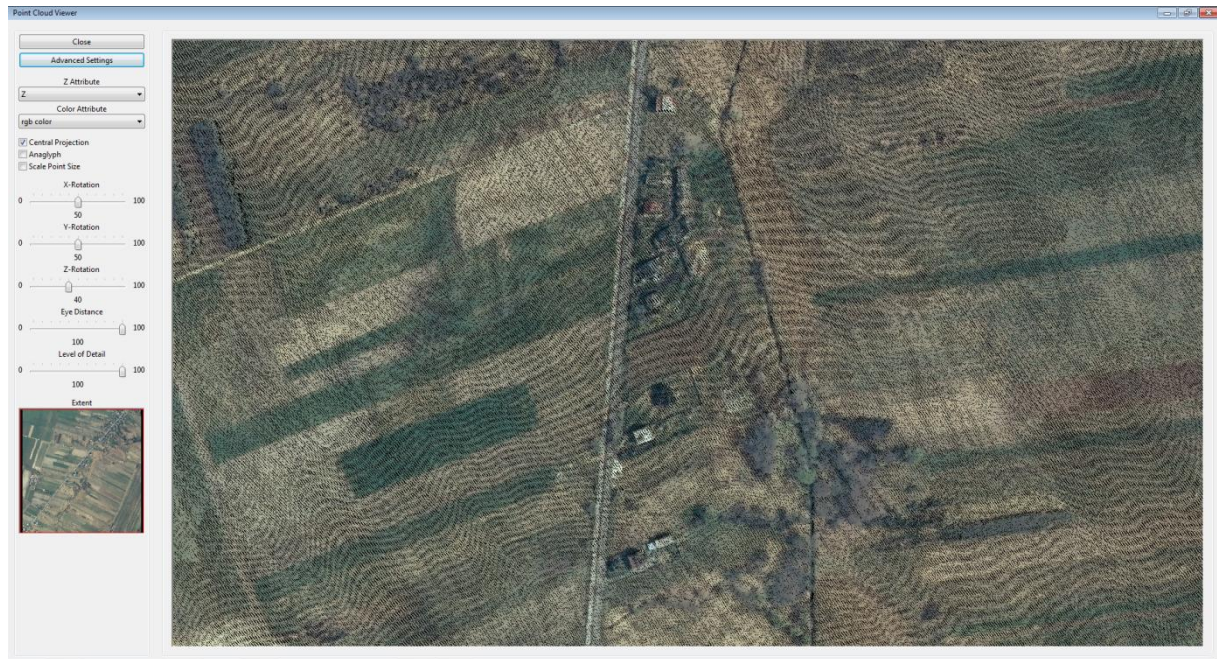
Najbardziej odpowiednimi danymi wejściowymi do parametryzacji rzeźby terenu i parametryzacji stosunków wodnych są **CYFROWE MODELE WYSOKOŚCIOWE (DIGITAL ELEVATION MODEL, DEM)** i ich pochodne czyli **NUMERYCZNE MODELE TERENU**.

CYFROWE MODELE WYSOKOŚCIOWE to odwzorowanie wysokości terenu w postaci np. siatki kwadratów (GRID), w której każdemu oczku siatki (kwadratowi) przyporządkowana jest określona wysokość n. p. m. tego oczka.

NUMERYCZNE MODELE TERENU to wyznaczane na podstawie cyfrowych modeli wysokości podstawowe atrybuty topograficzne, takie jak m. in. nachylenie stoków, kierunek nachylenia (ekspozycja) czy też krzywizna terenu. Jeśli do ww. podstawowych atrybutów topograficznych dodamy również obiekty znajdujące się na powierzchni terenu to wtedy otrzymujemy **NUMERYCZNY MODEL POKRYCIA TERENU**.

Do celów analiz terenu optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie wysokorozdzielczych danych pozyskanych z lotniczego skanowania laserowego (**LIDAR**, Light Detection And Ranging) do przygotowania cyfrowego modelu wysokościowego. Bardzo wysoka jakość i duża rozdzielczość tych danych powoduje, że nie ma już konieczności konstrukcji modeli wysokościowych na podstawie pomiarów geodezyjnych w terenie.

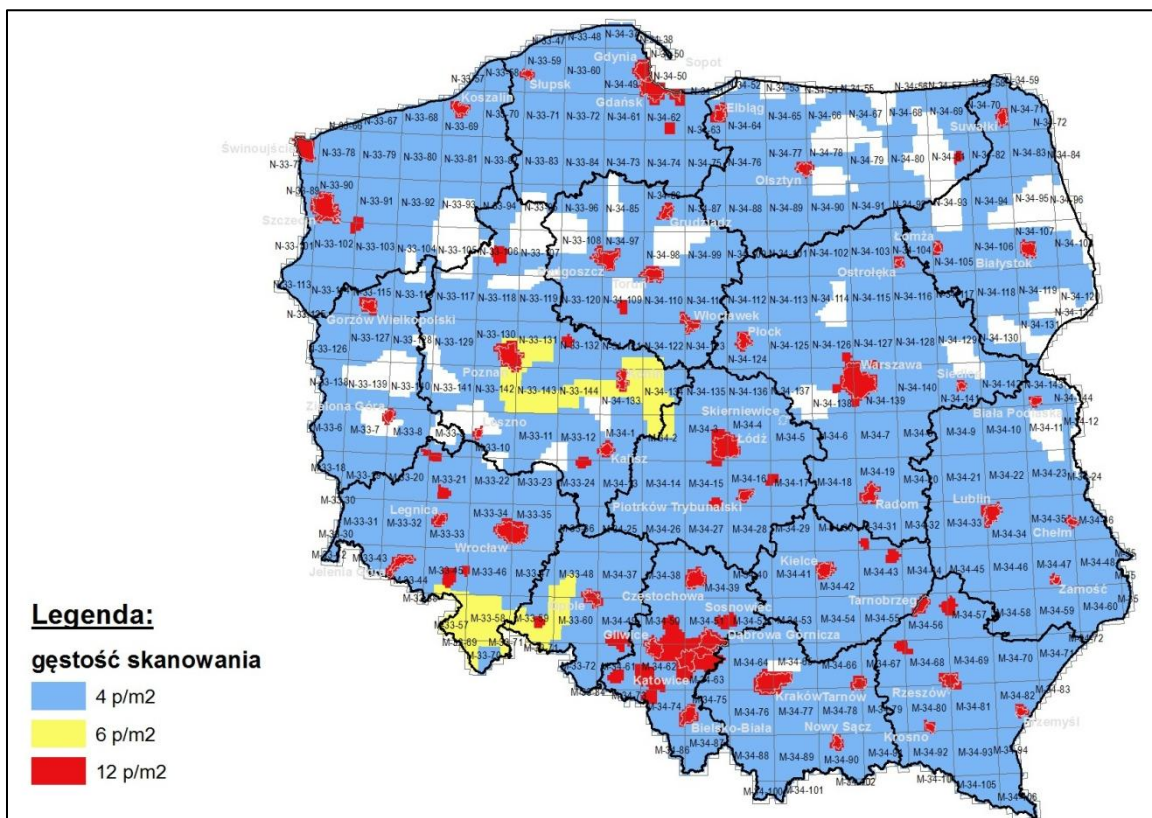
Ryc. 1 Dane LIDAR dla fragmentu obszaru testowego.



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych CODGIK.

Obszar Polski objęty do tej pory skanowaniem laserowym przedstawiono na poniższej rycinie. W obszarach dużych miast średnia gęstość skanowania wynosi 12 pkt/m², natomiast w pozostałych obszarach 4 lub 6 pkt/m².

Ryc. 2 Pokrycie Polski danymi LIDAR (stan na październik 2016 r.).



Źródło: <http://www.codgik.gov.pl>.

Dane LIDAR oprócz współrzędnych zawierają m.in. informacje o klasie danego punktu (w tabeli), dzięki czemu możliwe jest ich zastosowanie m. in. inwentaryzacji terenowej.

Tab. 1 Klasy danych LIDAR opracowanych przez GUGIK.

Nr	Zastosowanie
1	punkty przetwarzane, ale niesklasyfikowane,
2	punkty leżące na gruncie
3	punkty reprezentujące niską roślinność, tj. w zakresie 0-0.40 m
4	punkty reprezentujące średnią roślinność, tj. w zakresie 0.40-2.00 m
5	punkty reprezentujące wysoką roślinność, tj. w zakresie powyżej 2.00 m
6	punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie
7	szum
8	punkty reprezentujące obszary pod wodami

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUGIK.

Dzięki wysoko rozdzielczym danym pozyskanych lotniczego skanowania laserowego obecnie problem sprowadza się do przetworzenia informacji przestrzennej zawartej w tych danych na odpowiednie parametry geometryczne i statystyczne.

MODELOWANIE HYDROLOGICZNE I HYDRAULICZNE

Modelowanie hydrologiczne

Modelowanie hydrologiczne obejmuje modelowanie różnego rodzaju zjawisk hydrologicznych. GIS jest powszechnie stosowany w tych obszarach hydrologii, w których istotny jest element przestrzenny (np. modelowanie spływu wody, określanie dopływu zanieczyszczeń, modelowanie zjawisk powodziowych, analiza przebiegu sieci rzecznej). Wynika to z tego, że kluczowe w tych zagadnieniach jest zastosowanie numerycznego modelu terenu jako jedynego cyfrowego obrazu powierzchni Ziemi.

Istnieją trzy poziomy powiązania modelowania hydrologicznego z GIS:

- **POZIOM PIERWSZY:** następuje wymiana informacji pomiędzy modelem, a oprogramowaniem GIS za pomocą plików - na tym poziomie oprogramowanie GIS jest narzędziem wizualizacji i analizy wyników generowanych przez odrębny model hydrologiczny.
- **POZIOM DRUGI:** oprogramowanie GIS służy jako interfejs graficzny modelu hydrologicznego.
- **POZIOM TRZECI:** model hydrologiczny jest składową oprogramowania GIS.

Modelowanie hydrauliczne

Modelowanie hydrauliczne opisuje procesy fizyczne związane z mechaniką płynów, w tym z zachowaniem się wody w korycie i na terenach zalewowych.

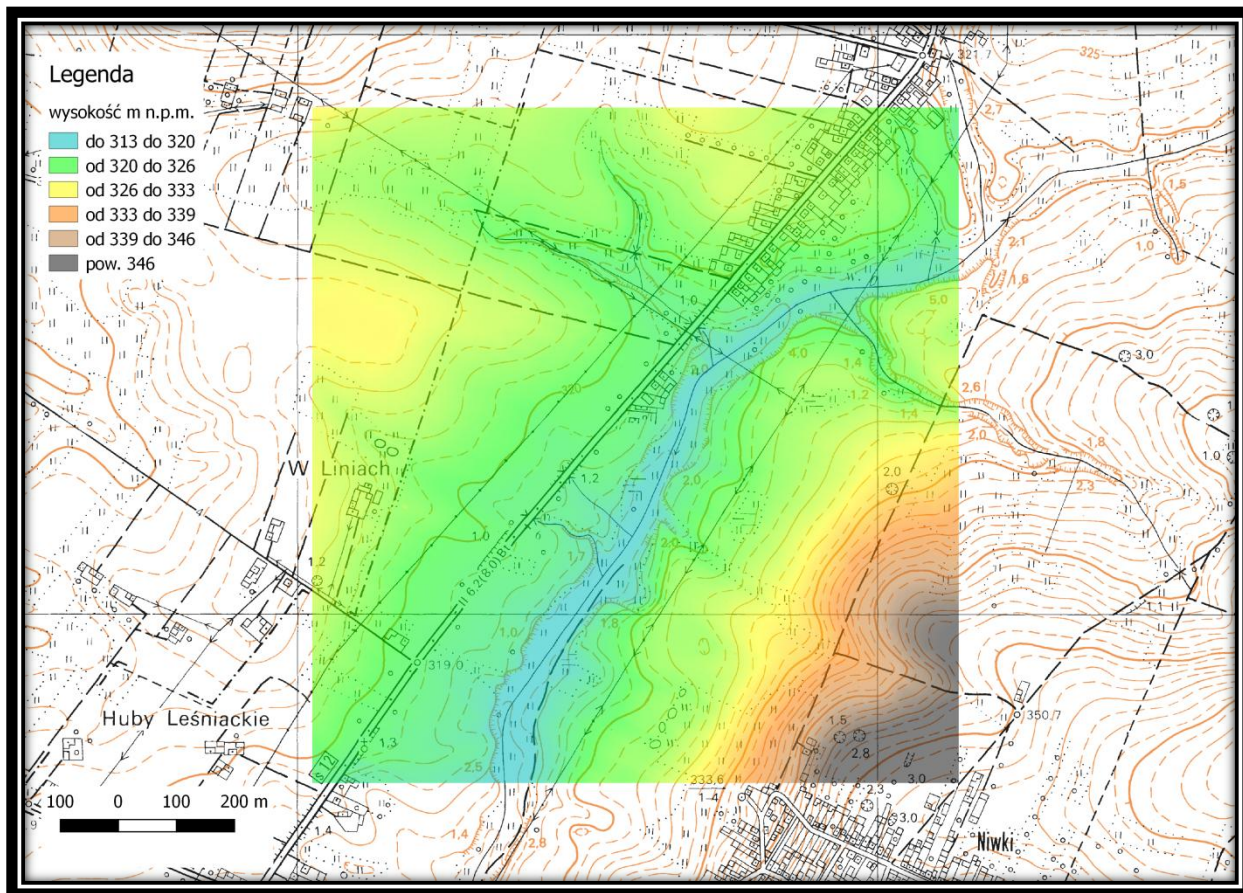
Modelowanie hydrauliczne pozwala określić:

- **RZĘDNE ZWIERCIADŁA WODY**
- **PRĘDKOŚCI I GŁĘBOKOŚCI PRZEPŁYWU WODY**
- **KIERUNKI PRZEPŁYWU WODY (WEKTORY PRĘDKOŚCI)**

OBSZAR TESTOWY

Opracowanie przygotowano zostało na podstawie danych dla obszaru testowego przedstawionego na poniższej mapie.

Ryc. 3 Zasięg obszaru objętego opracowaniem.



Źródło: opracowanie własne na podkładzie mapy topograficznej (GUGIK).

Jest to obszar po powierzchni 1,3 km² i obwodzie 4,562 km.

PARAMETRYZACJA RZEŻBY TERENU

Istota geomorfometrii polega **NA OKREŚLANIU** na podstawie cyfrowych modeli wysokościowych parametrów charakteryzujących obiekty na powierzchni terenu oraz **NA WYDZIELANIU** tych obiektów z otoczenia za pomocą różnych technik GIS.

Parametry topograficzne

Parametry są podstawowymi pojęciami w geomorfometrii i mogą mieć charakter **PIERWOTNY** (np. nachylenie, kierunek nachylenia (ekspozycja)) lub **WTÓRNY** (np. topograficzny wskaźnik pozycji).

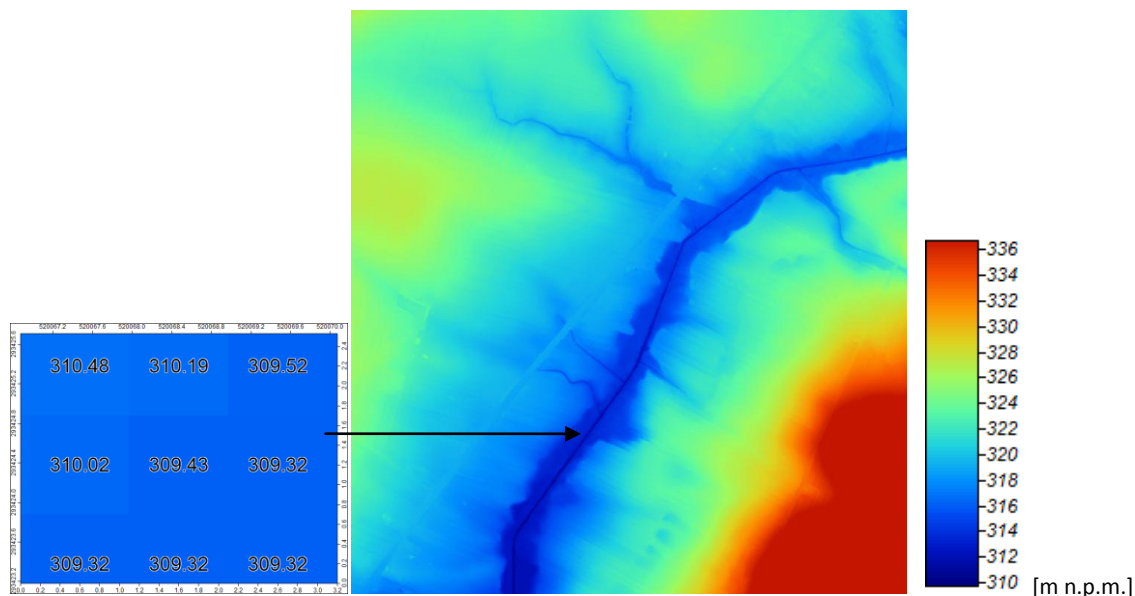
Ponadto parametry mogą być obliczane **LOKALNIE** (dla mniejszego obszaru) lub **REGIONALNIE** (dla większego obszaru).

Podstawowych parametry powierzchni terenu, które są istotne z punktu widzenia hydrologii przedstawiono w dalszej części rozdziału.

WYSOKOŚĆ N.P.M.

Jest to pionowa odległość (wysokość) danego punktu względem przyjętego punktu odniesienia, którym jest średni poziom morza.

Ryc. 4 Wysokość nad poziomem morza [m].

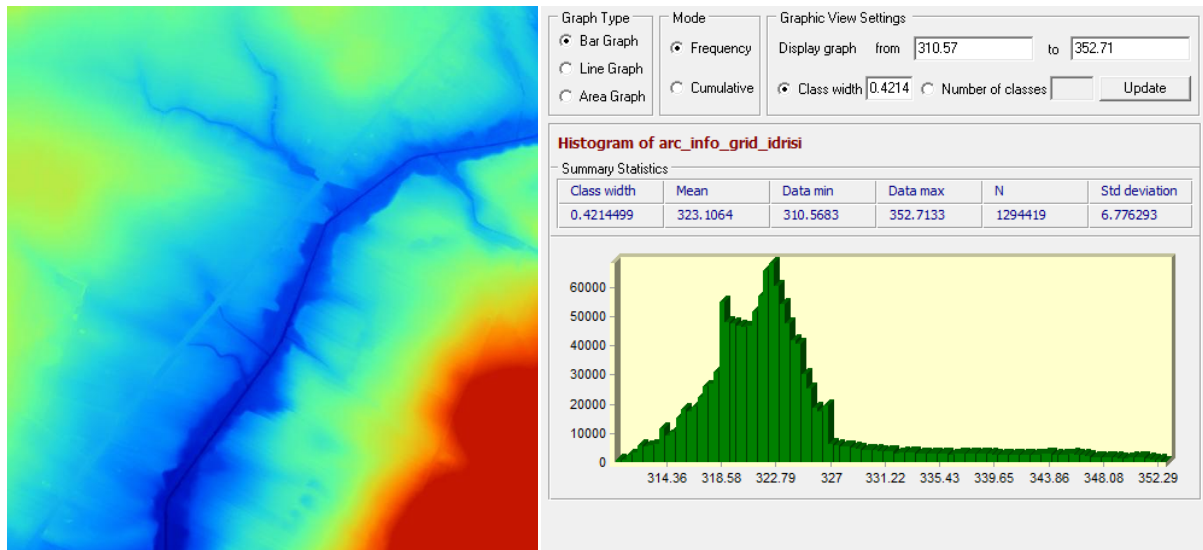


Źródło: opracowanie własne.

W Polsce parametr ten określany jest względem średniego poziomu Morza Bałtyckiego w Zatoce Fińskiej, wyznaczonego dla mareografu w Kronsztadzie koło Sankt Petersburga (Federacja Rosyjska).

Rozkład wysokości n.p.m. w całym obszarze badań określany jest za pomocą **HISTOGRAMU**.

Ryc. 5 Histogram i podstawowe statystyki.



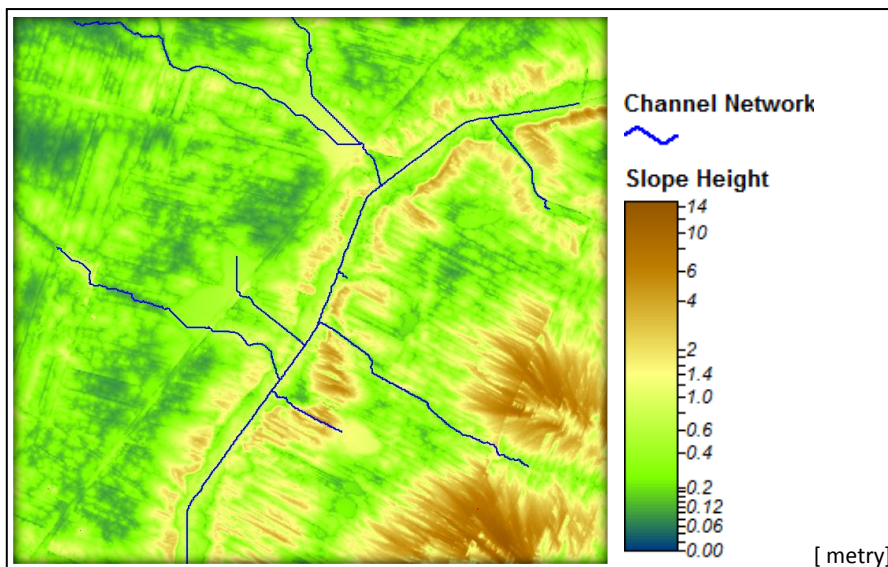
Źródło: opracowanie własne.

HISTOGRAM jest to wykres ilustrujący zależność pomiędzy przedziałami wysokości n.p.m., a liczbą komórek należących do tych przedziałów.

WYSOKOŚĆ WZGLĘDNA

Wysokość względna określona została w tym przypadku jako **WYSOKOŚĆ STOKÓW WZGLĘDEM DEN DOLIN** w obszarze testowym.

Ryc. 6 Wysokość stoków ponad poziom sieci rzecznej [w metrach].



Źródło: opracowanie własne.

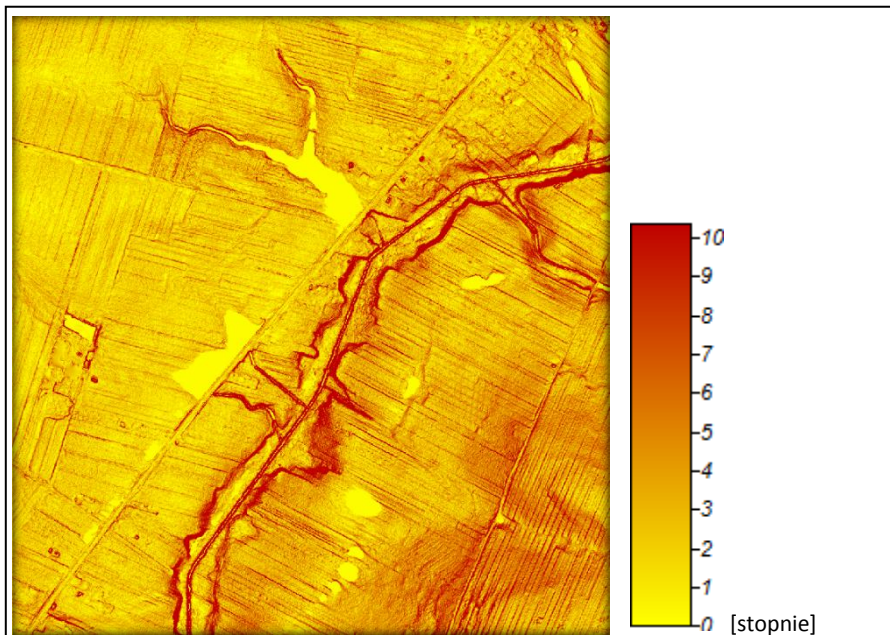
Stanowi podstawę wydzielenia den dolin i stoków.

NACHYLENIE I EKSPozyCJA TERENU

Do podstawowych parametrów powierzchni terenu należą **NACHYLENIE** (ang. slope) i **EKSPozyCJA** (**KIERUNEK NACHYLENIA**) (ang. aspect). Obliczane są z cyfrowego modelu wysokościowego przy użyciu algorytmów zaimplementowanych w oprogramowaniu GIS.

NACHYLENIE (gradient nachylenia) określa zmianę wysokości na jednostkę długości w kierunku największego spadku. Wyrażone może być w stopniach, procentach i radianach.

Ryc. 7 Nachylenie terenu (w stopniach).

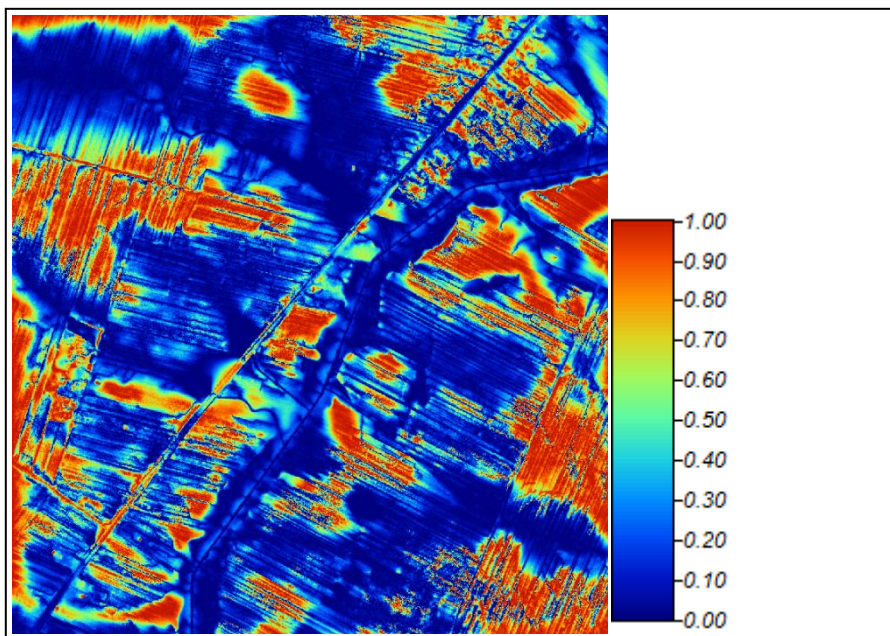


Źródło: opracowanie własne.

ZNACZENIE W HYDROLOGII:

Gradient nachylenia określa szybkość spływu wody po terenie, przez co ma znaczenie w modelowaniu hydrologicznym. Od gradientu nachylenia zależy także zasięg fali powodziowej.

Ryc. 8 Relative slope position.

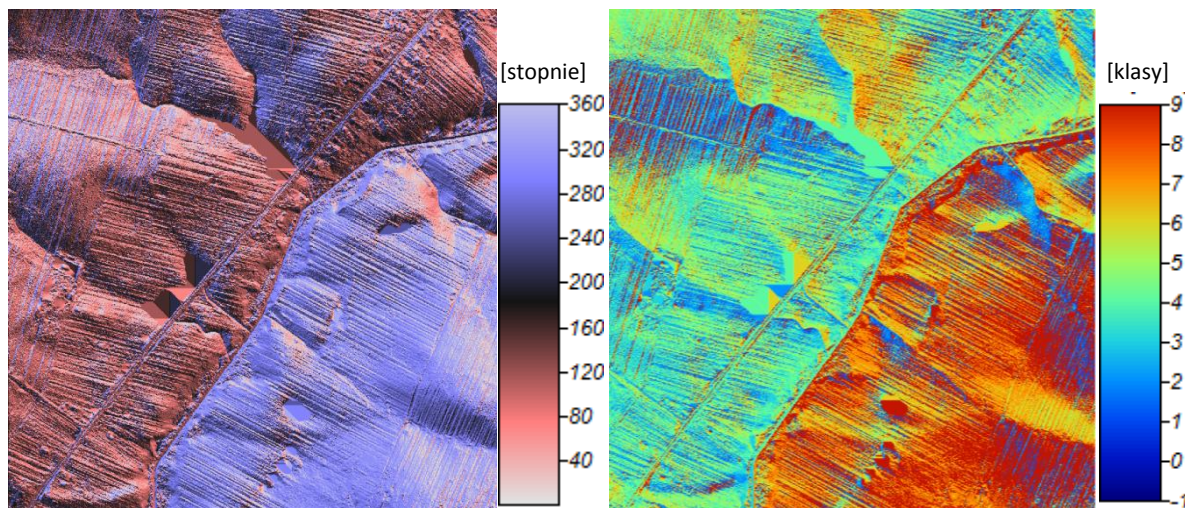


Źródło: opracowanie własne.

EKSPOZYCJA jest to kierunek nachylenia względem stron świata. Jest określana kątem mierzonym zgodnie ze wskazówkami zegara pomiędzy kierunkiem północnym, a kierunkiem maksymalnego nachylenia (czyli azymutem).

Ekspozycja może być wyrażana w stopniach i radianach. Na poniższej rycinie przedstawiona została w stopniach ($0-360^{\circ}$) oraz w podziale na klasy. Podział na klasy powstał w wyniku rekasyfikacji wartości w stopniach, a jego zasada opisana została w tabeli poniżej.

Ryc. 9 Ekspozycja terenu (w stopniach) i w klasach (1-10) po rekasyfikacji.



Klasa ekspozycji	Nazwa ekspozycji	Azymut od	Azymut do
1-	Teren płaski	-1.000000	-1.00000
1	N	0.000000	22.500000
2	N-E	22.500000	67.500000
3	E	67.500000	112.500000
4	S-E	112.500000	157.500000
5	S	157.500000	202.500000
6	S-W	202.500000	247.500000
7	W	247.500000	292.500000
8	N-W	292.500000	337.500000
9	N	337.500000	360.000000

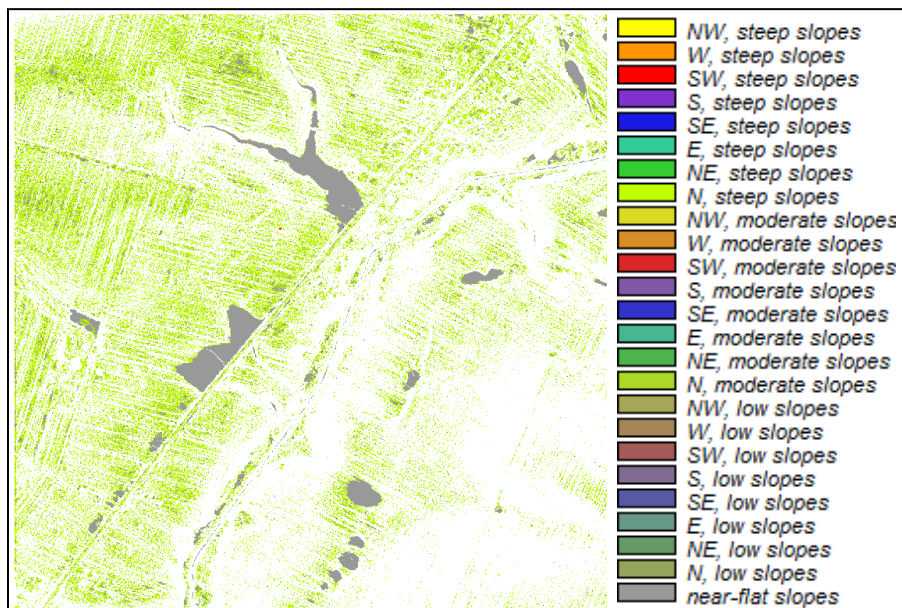
Źródło: opracowanie własne.

ZNACZENIE W HYDROLOGII:

Ekspozycja (kierunek nachylenia) określa kierunek spływu wody po terenie, przez co ma znaczenie w modelowaniu hydrologicznym. Od kierunku nachylenia zależy także ilość docierającego promieniowania słonecznego.

Gradient nachylenia i kierunek nachylenia (ekspozycję) można też przedstawiać razem jak na poniższej rycinie. Generowane wtedy są wspólne klasy tych dwóch parametrów.

Ryc. 10 Nachylenie i ekspozycja razem.



OBJAŚNIENIA DO LEGENDY:

Nazwa ekspozycji/nachylenia	Nachylenie od	Nachylenie do
near-flat slopes	11	20
N, low slopes	20	22
NE, low slopes	22	23
E, low slopes	23	24
SE, low slopes	24	25
S, low slopes	25	26
SW, low slopes	26	27
W, low slopes	27	28
NW, low slopes	28	29
N, moderate slopes	29	32
NE, moderate slopes	32	33
E, moderate slopes	33	34
SE, moderate slopes	34	35
S, moderate slopes	35	36
SW, moderate slopes	36	37
W, moderate slopes	37	38
NW, moderate slopes	38	39
N, steep slopes	39	42
NE, steep slopes	42	43
E, steep slopes	43	44
SE, steep slopes	44	45
S, steep slopes	45	46
SW, steep slopes	46	47
W, steep slopes	47	48
NW, steep slopes	48	49

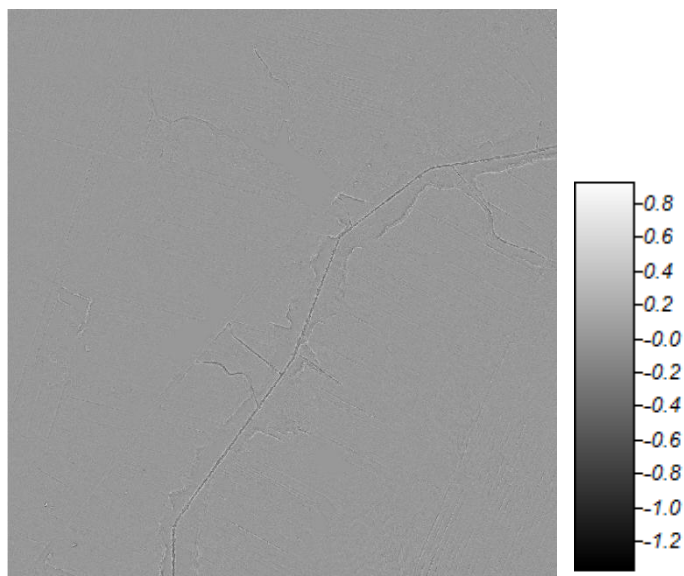
Źródło: opracowanie własne.

KRZYWIZNA

W analizie lokalnych zmienności morfometrycznych pomocne jest obliczanie wklęsłości i wypukłości. Parametr je opisujący nosi nazwę **KRZYWIZNY** (ang. curvature) i umożliwia analizę zmiany tempa nachylenia w określonych płaszczyznach. Dwoma najczęściej używanymi miarami opisującymi krzywiznę są **KRZYWIZNA WERTYKALNA** i **PLANARNA**.

KRZYWIZNA WERTYKALNA (ang. profile lub vertical curvature), opisuje zmianę nachylenia wzdłuż linii spływu wody. Określa w ten sposób kształt stoku, przyjmując wartości dodatnie dla stoków wklęsłych i wartości ujemne dla stoków wypukłych.

Ryc. 11 Krzywizna wertykalna.



Źródło: opracowanie własne.

ZNACZENIE W HYDROLOGII:

Krzywizna wertykalna ma istotne znaczenie przy określaniu zmian prędkości i procesów akumulacyjnych oraz prędkości spływu.

KRZYWIZNA PLANARNA (ang. plan lub contour lub horizontal curvature) opisuje krzywiznę poziomą na poziomej powierzchni, czyli zmianę kierunku nachylenia stoku wzdłuż poziomu.

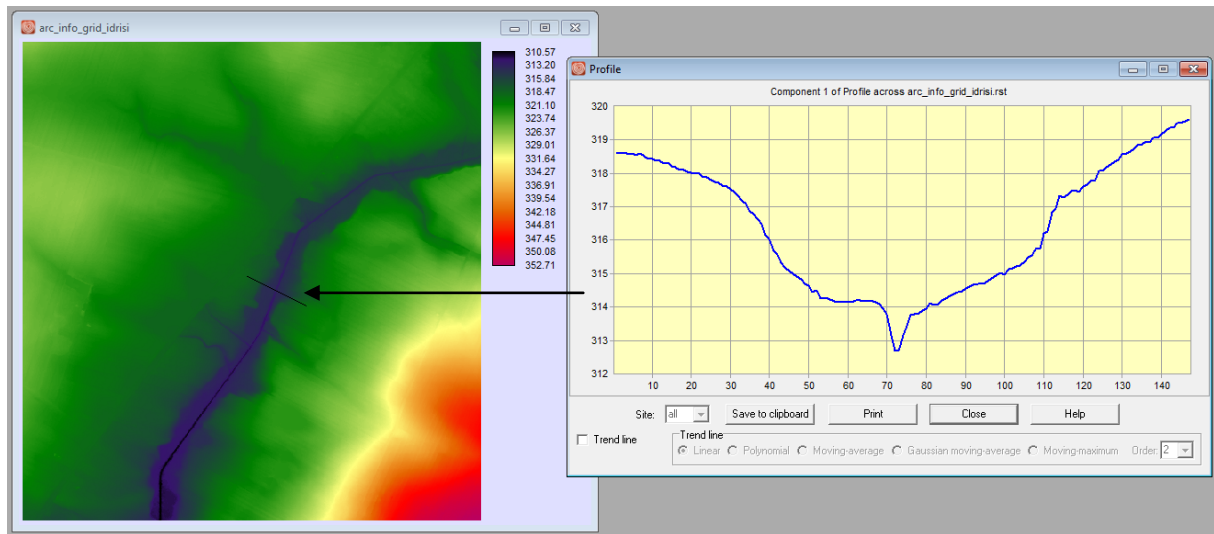
ZNACZENIE W HYDROLOGII:

Krzywizna planarna jest topograficzną miarą skłonności płynącej wody do skupiania się (konwergencji) i rozptywu (dywergencji). Jest także wykorzystywana do klasyfikacji form terenowych (grzbiety, doliny, stoki).

PROFIL POPRZECZNY TERENU

Profil poprzeczny terenu jest to wykres, na którym przedstawiane jest **UKSZTAŁTOWANIE TERENU** wzdłuż wskazanej linii.

Ryc. 12 Profil poprzeczny terenu.



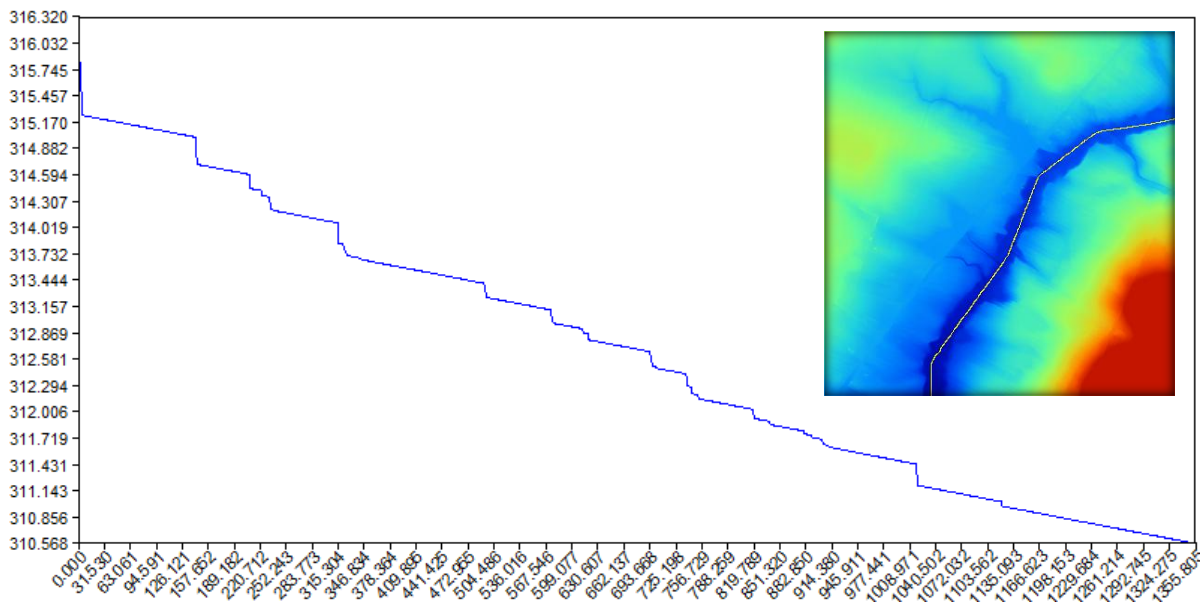
Źródło: opracowanie własne.

Nazywany jest również profilem topograficznym, ponieważ obrazuje przekrój sytuacji topograficznej w danym miejscu.

PROFIL PODŁUŻNY RZEKI

Profil podłużny przedstawia zróżnicowanie spadku koryta rzeki.

Ryc. 13 Profil podłużny rzeki.



Źródło: opracowanie własne.

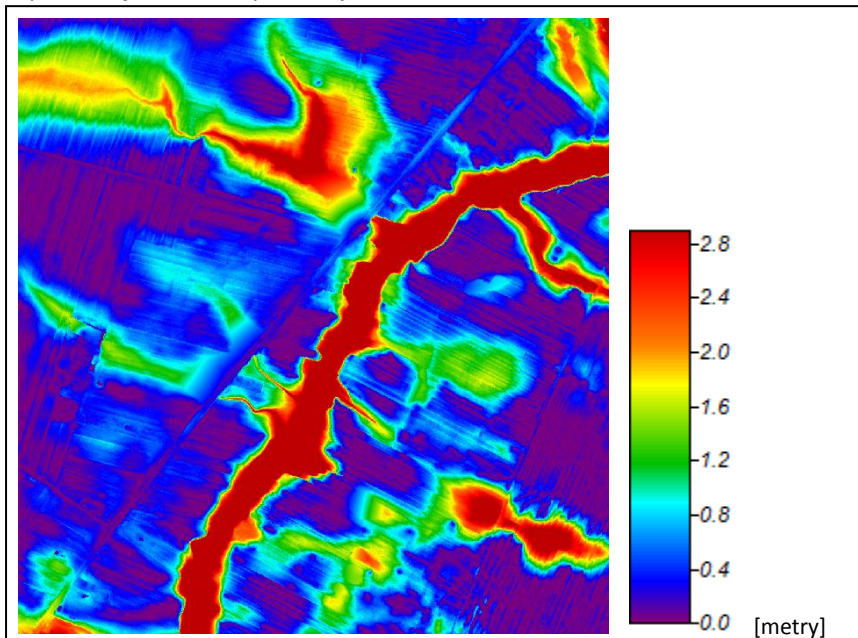
ZNACZENIE W HYDROLOGII:

Najniższy punkt profilu podłużnego rzeki wyznacza bazę erozyjną rzeki, czyli najniższy poziom, do którego w badanym obszarze sięgają procesy erozji rzecznej.

GŁĘBOKOŚĆ DOLINY RZECZNEJ

Parametr ten zdefiniować można jako pionową odległość (ang. *vertical*) z całego obszaru objętego badaniem do poziomu sieci rzecznej (poziomu bazy erozyjnej).

Ryc. 14 Głębokość doliny rzecznej.

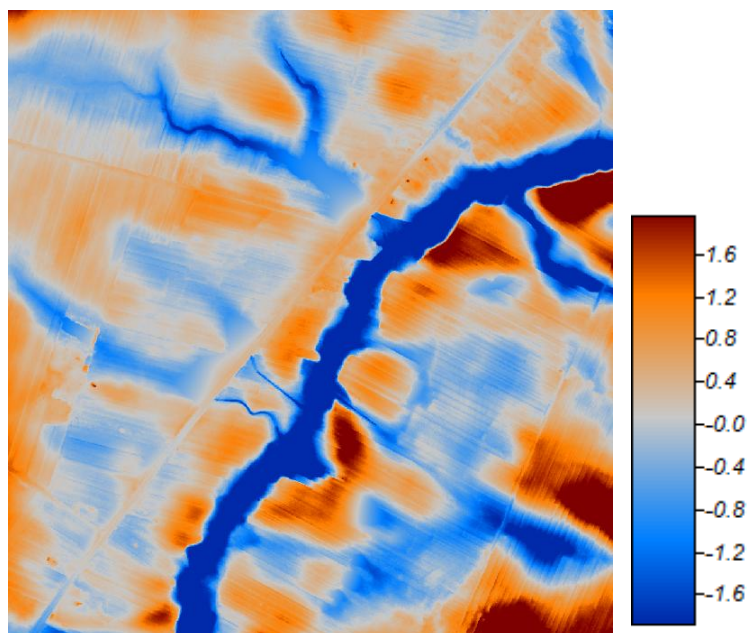


Źródło: opracowanie własne.

TOPOGRAFICZNY INDEKS POZYCJI (TPI)

TOPOGRAFICZNY INDEKS POZYCJI (ang. *Topographic position index*, TPI) jest to wskaźnik obrazujący względne położenie morfologiczne. Informuje o tym, jak wysokość powierzchni terenu w danym punkcie ma się do wysokości uśrednionej.

Ryc. 15 Topograficzny indeks pozycji.



Źródło: opracowanie własne.

Wartość dodatnia wskaźnika sugeruje, że dana komórka położona jest wyżej niż jej otoczenie (np. obszar grzbietów i szczytów górskich), wartość ujemna wskazuje na położenie niższe w stosunku do otoczenia (np. obszar dolin).

OTWARTOŚĆ TOPOGRAFICZNA

OTWARTOŚĆ TOPOGRAFICZNA (ang. *Topographic openness*) można zdefiniować jako maksymalny lub minimalny kąt widoczności ograniczanej topografią terenu.

Parametr ten posiada dwie perspektywy uzależnione od pomiaru azymutu kąta względem zenitu i nadiru. **OPENNESS POSITIVE** odnosi się do pomiarów powyżej zadanej powierzchni, a **OPENNESS NEGATIVE** do pomiarów poniżej zadanej powierzchni.

Ryc. 16 Otwartość topograficzna.

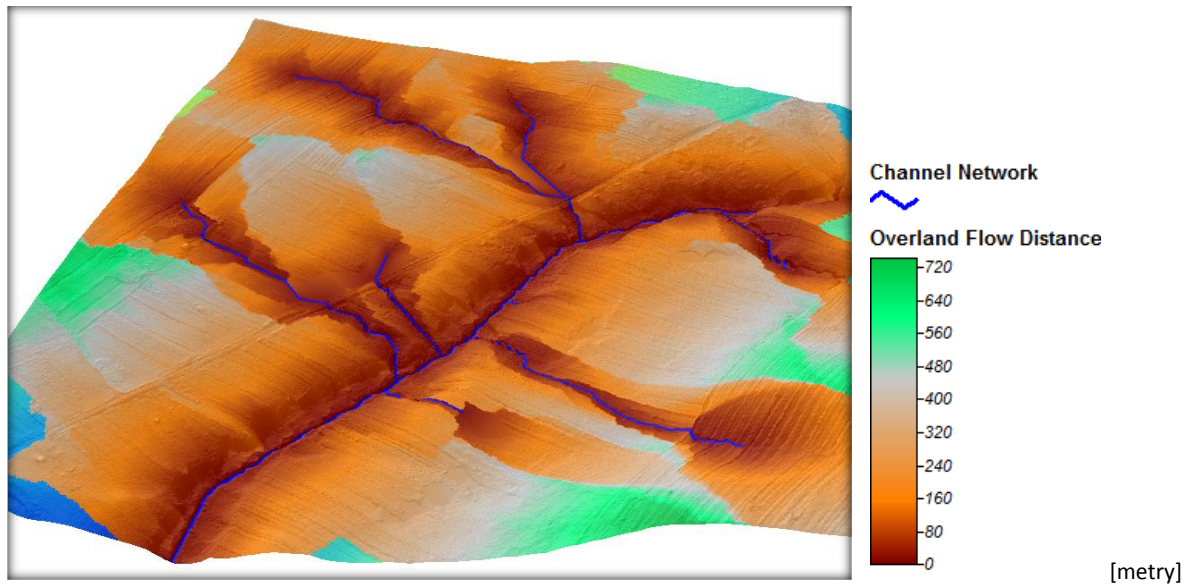


Źródło: opracowanie własne.

Wartości parametru przedstawione zostały na powyższej rycinie w skali szarości. W takim ujęciu openness positive przedstawia grzbiety na białą, a dolinne na czarno, a negative openness odwrotnie.

ODLEGŁOŚĆ OD SIECI RZECZNEJ

Ryc. 17 Odległość od sieci rzecznej.



Źródło: opracowanie własne.

Generowanie obiektów

Istota geomorfometrii polega nie tylko na określaniu parametrów charakteryzujących obiekty geomorfologiczne, ale także na **WYDZIELANIU (GENEROWANIU)** tych obiektów (bezpośrednio z danych LIDAR lub z cyfrowych modeli wysokościowych) za pomocą technik GIS.

Wybrane możliwości wydzielania obiektów przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

ZABUDOWA I ROŚLINNOŚĆ

Zabudowa i roślinność generowane są bezpośrednio z danych LIDAR. Dane te oprócz reprezentacji rzeźby terenu zawierają także klasy odpowiadające zabudowie i roślinności (niskiej, średniej i wysokiej).

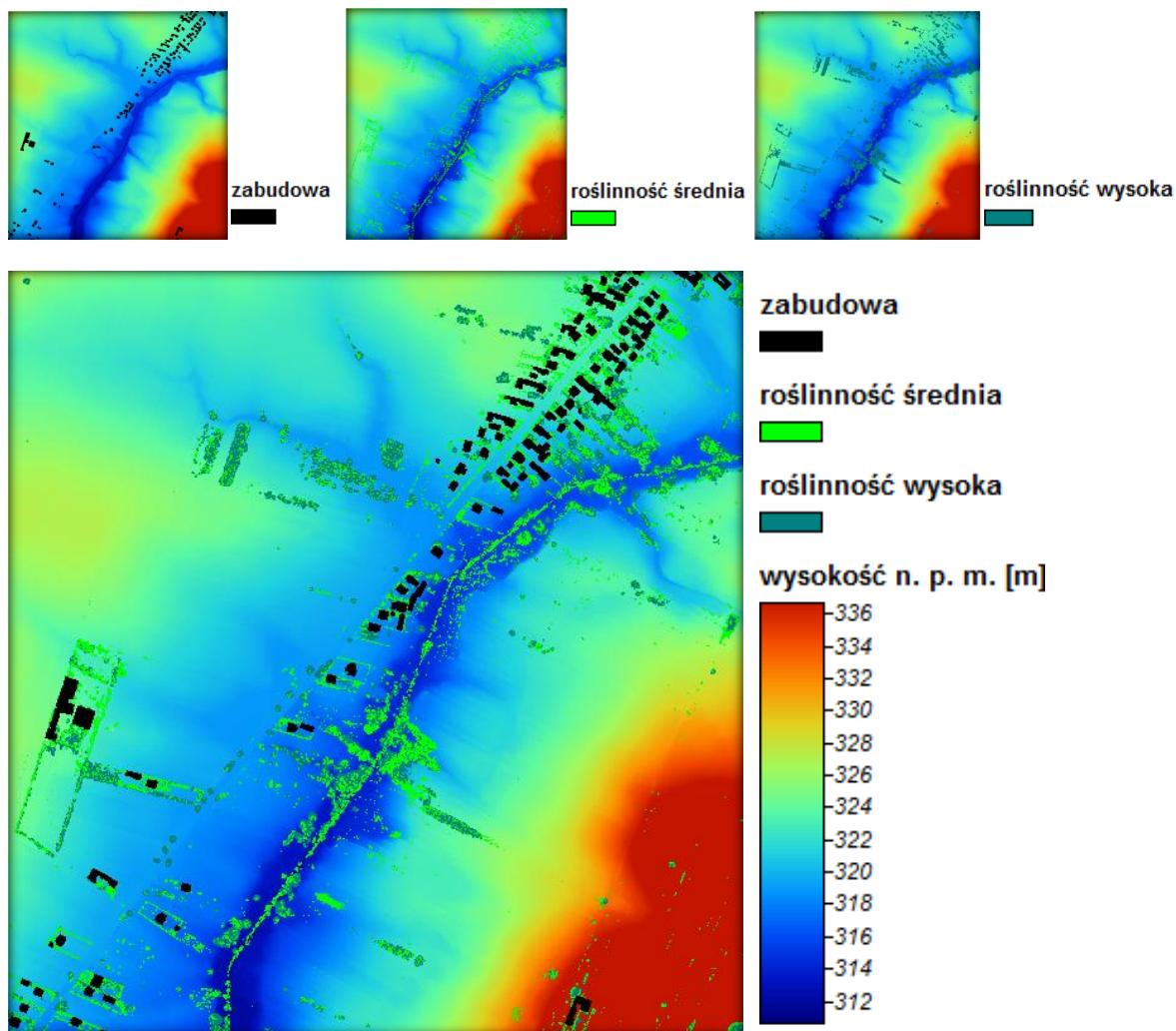
Tab. 2 Klasy danych LIDAR odpowiadające zabudowie i roślinności.

3	punkty reprezentujące niską wegetację, tj. w zakresie 0-0.40 m
4	punkty reprezentujące średnią wegetację, tj. w zakresie 0.40-2.00 m
5	punkty reprezentujące wysoką wegetację, tj. w zakresie powyżej 2.00 m
6	punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUGiK.

Zabudowa i roślinność (średnia i wysoka) przedstawione zostały osobno i razem na poniższej rycinie.

Ryc. 18 Zabudowa oraz roślinność średnia i wysoka.



Źródło: opracowanie własne.

LINIE SZKIELETOWE TERENU

Linie szkieletowe to **OSIE DOLIN** (linie ściekowe lub ciekowe) oraz **GRZBIETY FORM** (linie grzbietowe). Przecinają się z poziomiami prostopadle, w miejscach ich największego wygięcia. Jeżeli wygięcie poziomice skierowane są wypukłością w stronę spadku terenu to przedstawiają grzbiet. Jeżeli w stronę przeciwną do spadku terenu, to przedstawiają dolinę.

Linie grzbietowe są jednocześnie linią działu wodnego, a linie dolinne najczęściej miejscem koncentracji odpływu.

Uwzględnienie linii szkieletowych w numerycznym modelu jest niezbędne, jeśli ma być on wykorzystany w modelowaniu hydrologicznym.

KLASTRY TERENU

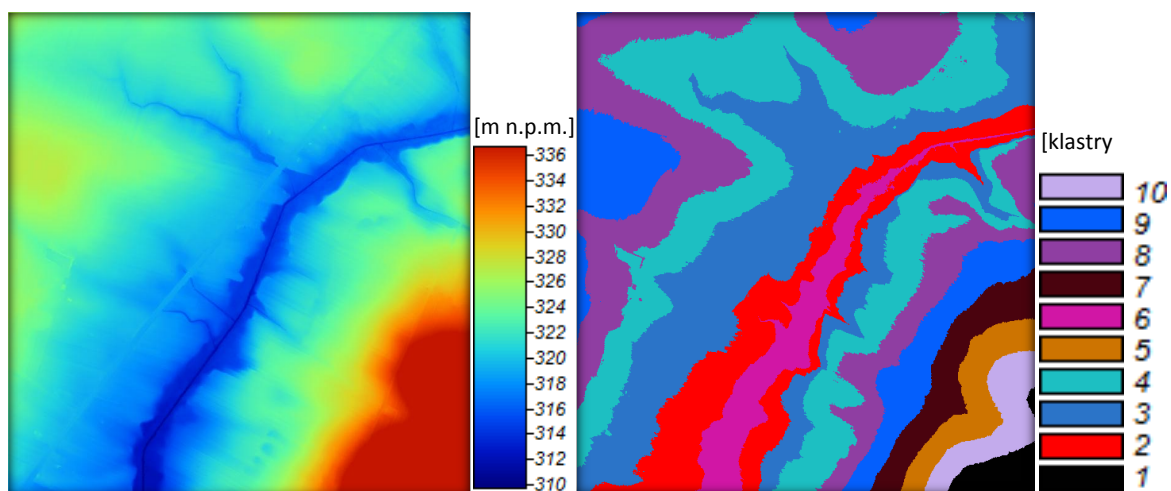
W systemach informacji geograficznej zaimplementowane są różne metody podziału cyfrowych modeli wysokościowych na klastry. **KLASTRY** są to skoncentrowane przestrzennie (geograficznie) zgrupowania komórek. Podstawą łączenia komórek w klastry jest ich podobna wartość oraz położenie w sąsiedztwie. Spełniony jest przy tym warunek, że podobieństwo pomiędzy

komórkami należącymi do tego samego klastra jest większe, niż pomiędzy komórkami należącymi do odrębnych klastrów.

Metody podziału przestrzeni na klastry mają charakter podobny do klasycznej analizy skupień, z tą różnicą że uwzględniają dodatkowo położenie komórek w przestrzeni względem siebie.

Dla celów poniższego badania zastosowano podział cyfrowego modelu wysokościowego na klastry metodą k-średnich (ang. *k-means clustering*).

Ryc. 19 Podział cyfrowego modelu wysokościowego na klastry (metodą k-średnich).

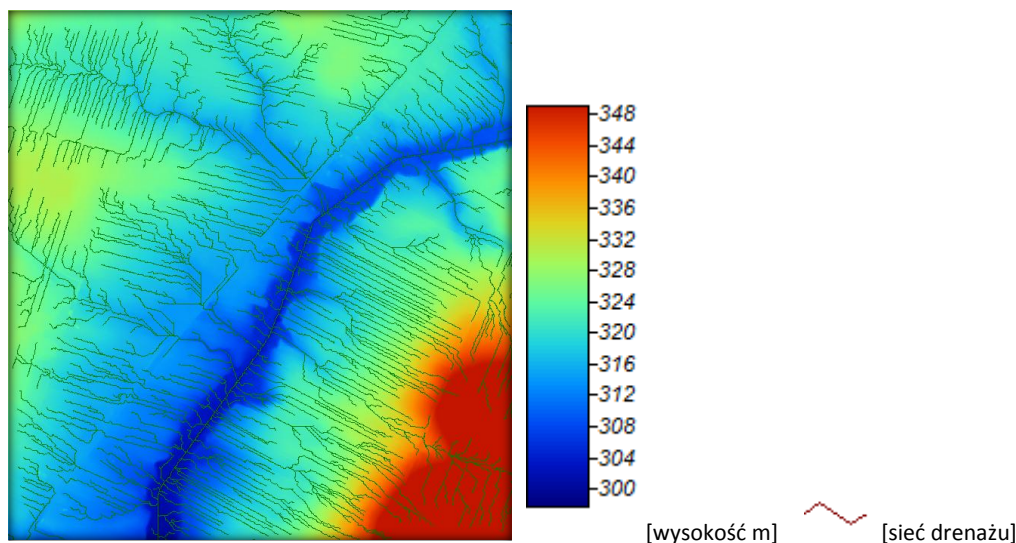


Źródło: opracowanie własne.

SIEĆ DRENAŻU

Sieć drenażu modelowana jest na podstawie map akumulacji spływu. Należy przy tym mieć na uwadze, że nie ma jednej uniwersalnej, powszechnie przyjętej procedury wyznaczania sieci drenażu. Wykorzystywane do tego celu są różne metody. Kluczowym jest dobór **WARTOŚCI PROGOWEJ** tworzącej skumulowany spływ powierzchniowy, oraz dobór metody wydzielenia sieci.

Ryc. 20 Sieć drenażu wygenerowana z numerycznego modelu terenu.



Źródło: opracowanie własne.

Sieć zawarta na powyższej rycinie wygenerowana została przy przyjęciu wartości progowej akumulacji spływu powyżej 500 - to znaczy, że spływ powierzchniowy inicjowany jest tylko z komórek (o rozmiarze 1 m² każda), które zasilane są nie mniej niż z 500 innych komórek.

Sieć drenażu w przedstawionym ujęciu obejmuje nie tylko aktywne stałe ciekł wodne, ale również te zaznaczone w rzeźbie terenu koryta, które obecnie nie posiadają aktywnego przepływu. Pozwala to rozpatrywać sieć drenażu, niezależnie od aktualnych warunków meteorologiczno-hydrologicznych.

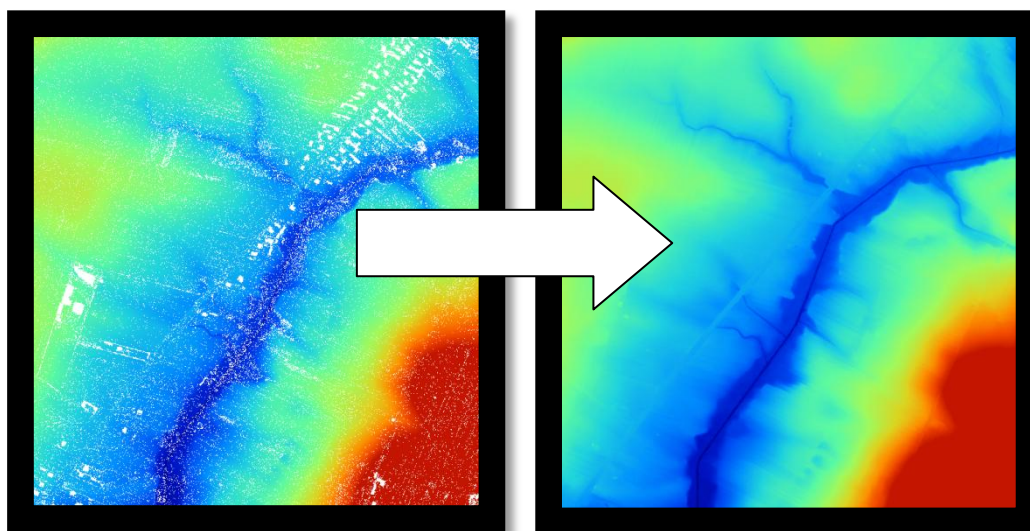
PARAMETRYZACJA STOSUNKÓW WODNYCH

Przygotowanie danych do modelowania hydrologicznego i hydraulicznego

FILTROWANIE DANYCH I USUNIĘCIE TZW. DZIUR

FILTROWANIE polega na usunięciu z pozyskanych danych LIDAR obiektów powierzchniowych oraz tzw. szumu. Obiekty powierzchniowe to wszystkie naturalne i sztuczne obiekty znajdujące się na powierzchni terenu, odwzorowane na etapie pozyskania danych ze skanowania laserowego. Należą do nich budynki i roślinność wysoka, średnia oraz niska. Pod pojęcie "szumu" rozumiemy pojedyncze punkty. Po filtrowaniu zlikwidowane muszą zostać "dziury" powstałe po usuniętych obiektach.

Ryc. 21 Usunięcie tzw. dziur.



Źródło: opracowanie własne.

USUNIĘCIE DZIUR (ang. *close gaps*) z modelu polega na wypełnieniu miejsc po usuniętych obiektach danymi wysokościowymi w procedurze interpolacji przestrzennej.

WYPALENIE SIECI RZECZNEJ (OPCJONALNIE)

W sytuacji kiedy dla analizowanego obszaru posiadamy wiarygodną wektorową warstwę rzek, to może pojawić się problem jej zgodności z modelem DEM. Jeśli występuje ich niezgodność to wtedy dla ujednolicenia tych dwóch rodzajów danych wykonuje się „wypalanie” sieci rzecznej (ang. *burning stream network in DEM*). Polega na modyfikacji cyfrowego modelu

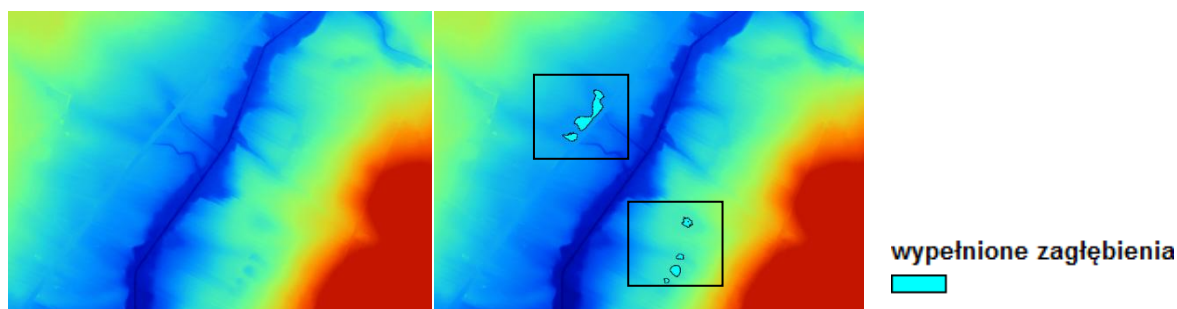
wysokościowego, w taki sposób, żeby najniżej leżące komórki w modelu, pokrywały się z przebiegiem rzek.

Dzięki wypaleniu sieci rzecznej modelowanie hydrologiczne wykonywane na podstawie cyfrowego modelu wysokościowego będzie jednocześnie odnosiło się do posiadanego modelu wektorowego sieci rzecznej. Należy mieć na uwadze, że jeżeli wypalenie rzek jest przeprowadzane, to powinno nastąpić przed wypełnieniem zagłębień bezodpływowych.

WYPEŁNIENIE ZAGŁĘBIEŃ BEZODPŁYWOWYCH

Podstawowym założeniem spływu wody w cyfrowym modelu wysokości jest założenie, że woda przemieszcza się w dół stoku, czyli z komórek leżących wyżej do znajdujących się niżej. W związku z tym, aby model DEM mógł być wykorzystywany do modelowania, należy najpierw usunąć z niego wszelkie zagłębienia bezodpływowe (ang. *fill sinks*), które powstają zarówno w procesie interpolacji, jak i podczas tworzenia DEM z danych LIDAR.

Ryc. 22 Wypełnienie zagłębień bezodpływowych.



Źródło: opracowanie własne.

Usunięcie zagłębień najczęściej polega na zwiększaniu wysokości komórek DEM we wgłębieniach, aż do ich wyrównania z otoczeniem.

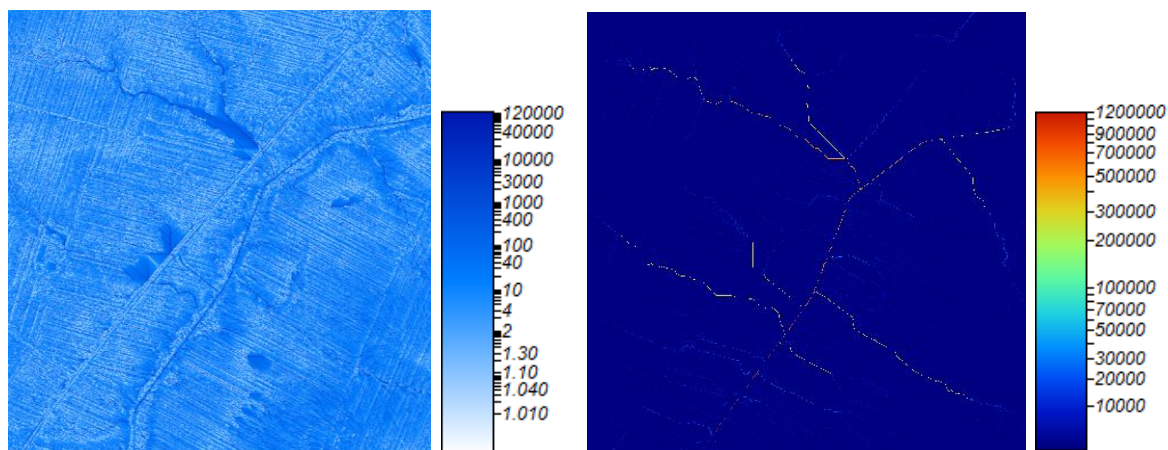
OKREŚLENIE KIERUNKÓW I AKUMULACJI SPŁYWU

Określenie **KIERUNKÓW SPŁYWU** (ang. *flow direction*) polega na przypisaniu komórkom mapy rastrowej identyfikatora odpowiadającego kierunkowi spływu, który jest określany na podstawie wysokości komórek sąsiednich. Podstawową zasadą jest to, że spływ wody następuje z każdej komórki do komórki lub komórek leżących niżej.

Istnieje szereg algorytmów określania kierunku spływu m. in. D8, Rho8, FD8, Dinf, Kinematic Routing Algorithm, DEMON. Wybór algorytmu zależy od rodzaju analizy i charakteru analizowanego obszaru. Trzeba mieć na uwadze, że w zależności którego algorytmu użyjemy wyniki mogą się różnić.

Mapa kierunku spływu umożliwia określenie, jak woda spływa po terenie i wskazuje jak każda kolejna komórka na ścieżce spływu akumuluje wodę z komórek leżących na ścieżce wyżej. W ten sposób każdej komórce przypisana jest liczba komórek, z jakich spływa do niej woda (czyli liczba komórek zasilających), i powstaje w ten sposób mapa **AKUMULACJI SPŁYWU** (ang. *flow accumulation, catchment area*).

Ryc. 23 Akumulacja spływu (wg algorytmu *Digital Elevation Model Network*, DEMON) oraz akumulacja spływu po reklasyfikacji.



[liczba komórek położonych wyżej]

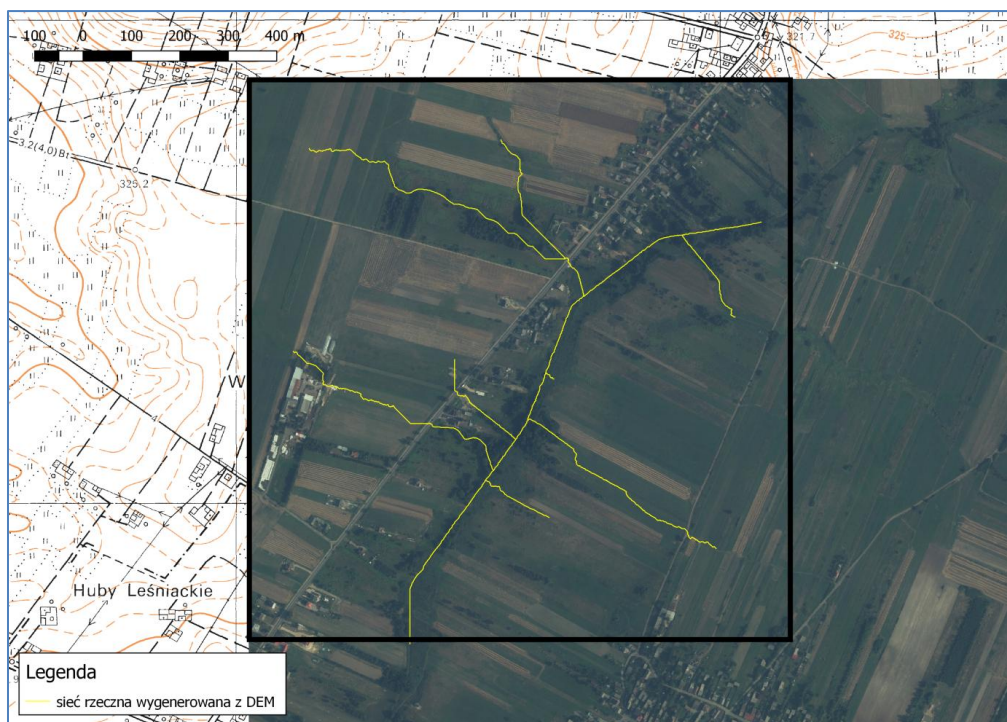
Źródło: opracowanie własne.

Komórki mapy akumulacji spływu (w tym przypadku o rozmiarze 1 m^2 każda) charakteryzują się wartościami proporcjonalnymi do ilości wody przepływającej przez te komórki. Zakładając, że powyżej pewnej ilości wody tworzą się ciekі stałe, można za pomocą reklasyfikacji wyznaczyć je przyjmując określoną wartość progową (w tym przypadku liczbę komórek położonych wyżej).

WYGENEROWANIE SIECI RZECZNEJ (CIEKÓW STAŁYCH)

Zakładając, że powyżej przyjętej wartości progowej akumulacji spływu tworzą się ciekі stałe, można w oparciu o wybraną wartość progową wyznaczyć sieć rzeczną. W związku z tym mapa akumulacji spływu jest podstawą WYGENEROWANIA SIECI RZECZNEJ.

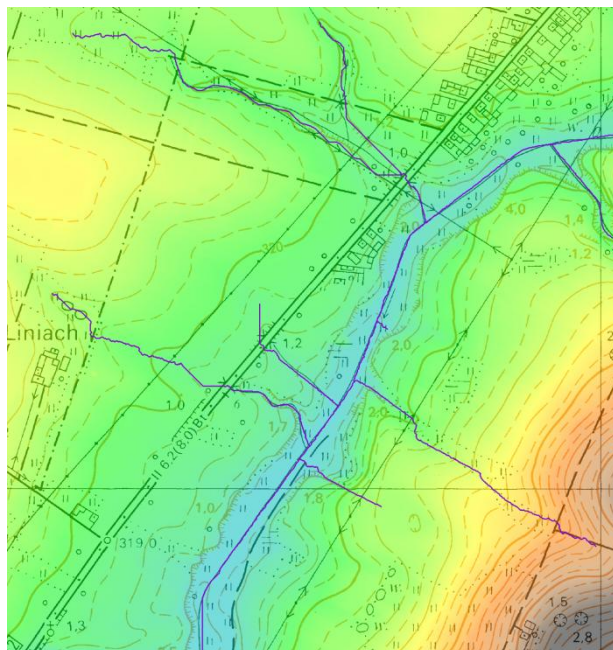
Ryc. 24 Sieć rzeczna o szerokości co najmniej 1 metra zlokalizowana w obszarze badań.



Źródło: opracowanie własne.

Porównanie wygenerowanej sieci rzecznej z siecią rzeczną zawartą na mapie topograficznej zamieszczono na poniższej rycinie.

Ryc. 25 Porównanie wygenerowanej sieci rzecznej z siecią rzeczną zawartą na mapie topograficznej obszaru badań.



Źródło: opracowanie własne.

Porównanie to wskazuje na dużą zgodność tych dwóch źródeł danych tj. sieci rzecznej wygenerowanej z numerycznego modelu terenu i sieci rzecznej zawartej na mapie topograficznej obszaru badań.

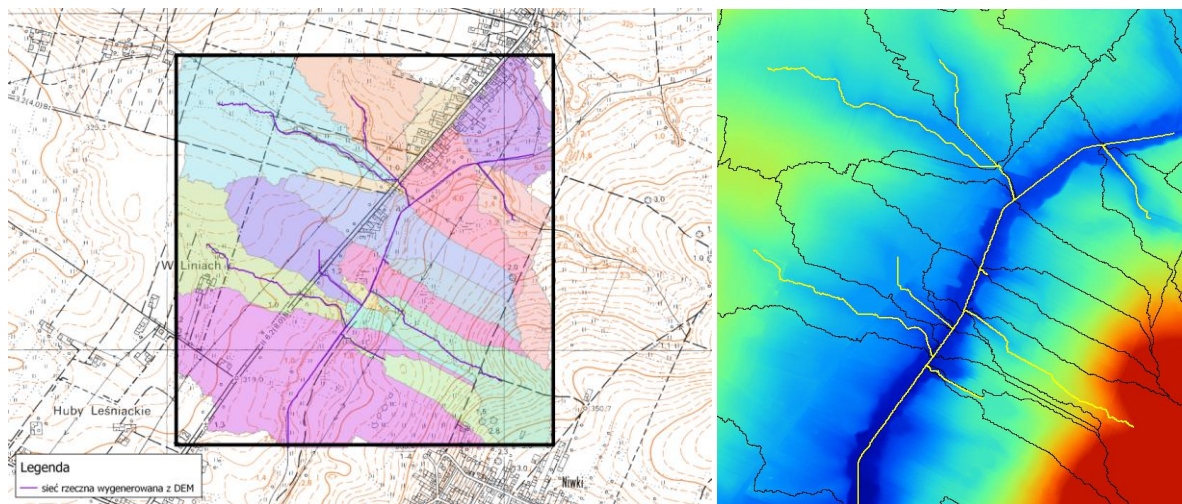
SEGMENTACJA SIECI RZECZNEJ

W wyniku segmentacji sieci rzecznej, następuje przypisanie identyfikatora każdemu segmentowi sieci tj. odcinkowi sieci pomiędzy miejscami połączeń z innymi odcinkami.

WYZNACZENIE OBSZARÓW I GRANIC ZLEWNI

Pod pojęciem **ZLEWNIA** określa się całość obszaru, z którego wody spływają do jednego punktu danej rzeki (jeziora, bagna itp.) lub jej fragmentu. W literaturze anglojęzycznej i oprogramowaniu GIS zlewnia jest nazywana zamiennie *drainage basin*, *watershed* lub *upslope area*.

Ryc. 26 Zlewnie cząstkowe (elementarne).



Źródło: opracowanie własne.

Przedstawione na powyższej rycinie zlewnie cząstkowe (elementarne) są to subzlewnie przyporządkowane do poszczególnych odcinków sieci rzecznej (z uwzględnieniem odcinków od najniższego rzędu).

Symulacja zasięgu fali powodziowej

PRZYGOTOWANIE DANYCH DO SYMULACJI

Przed przystąpieniem do właściwej symulacji w systemie GIS konieczne jest przeprowadzenie na etapie modelowania hydraulicznego operacji takich jak:

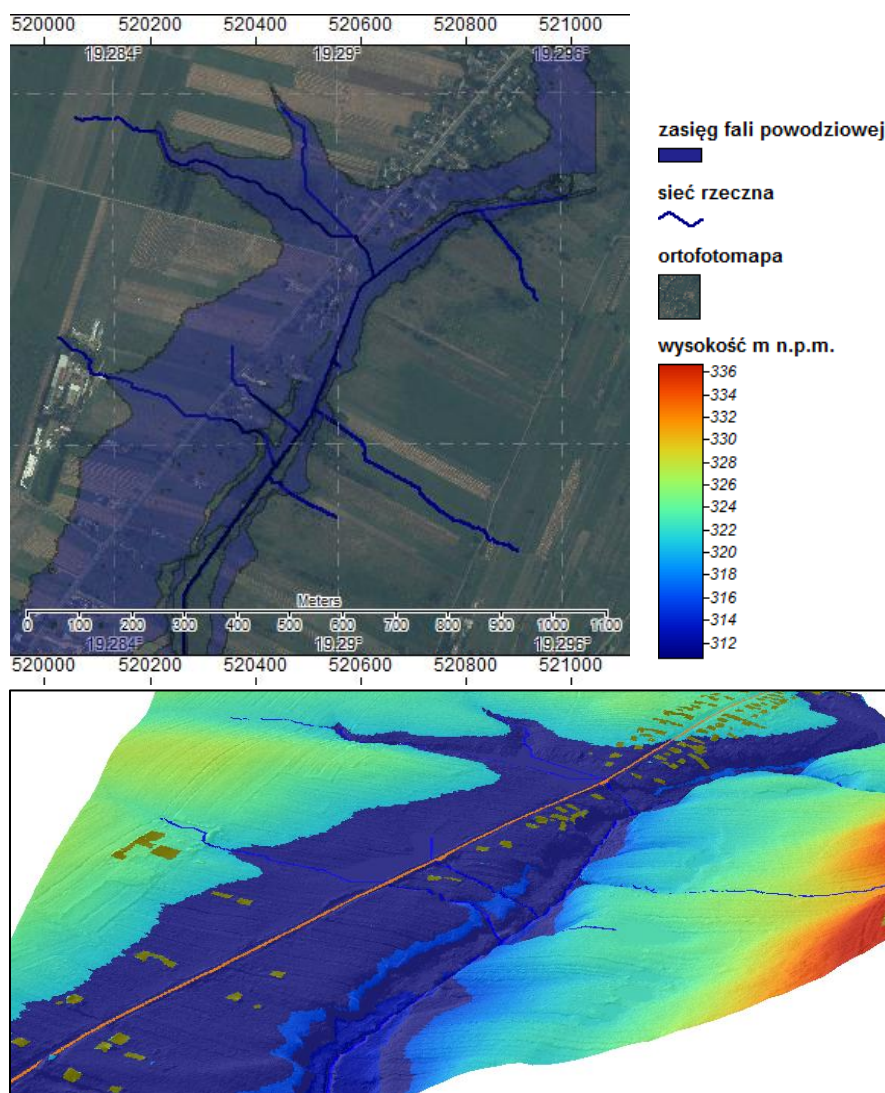
1. Analiza układu sieci rzecznej.
2. Pomiary terenowe obejmujące koryto, jak i budowle inżynierskie.
3. Określenie wartości współczynników szorstkości Manning'a.
4. Obliczenia przepływów w poszczególnych przekrojach analizowanego cieku.

Następnie można przystąpić do właściwej symulacji i wykonać wizualizację wyników.

WIZUALIZACJA ZASIĘGU FALI POWODZIOWEJ

Symulacja powstała przez nałożenie wyników modelowania hydraulicznego na numeryczny model terenu. W procedurze modelowania hydraulicznego przepływy obliczone zostały w poszczególnych przekrojach analizowanego cieku, przy uwzględnieniu lokalizacji budowli inżynierskich. Określone zostały też współczynniki szorstkości.

Ryc. 27 Symulacja zasięgu fali powodziowej.



Źródło: opracowanie własne.

Określenie parametrów zlewni

WSKAŹNIKI SZORSTKOŚĆ TERENU

Ponieważ dane LIDAR oprócz współrzędnych i informacji wysokościowych zawierają również informacje o klasie danego punktu to można na ich podstawie wyznaczyć współczynniki szorstkości. Poprawność klasyfikacji tych punktów jest przy tym nie mniejsza niż 95%¹.

Przykład wartości **WSPÓŁCZYNNIKA SZORSTKOŚCI MANNING'A** dla klas użytkowania terenu wygenerowanych z danych LIDAR (ALS) zamieszczono w poniższej tabeli.

¹ Według informacji producenta tj. GUGIK.

Tab. 3 Współczynnik Manning'a dla klas użytkowania terenu wygenerowanych z danych LIDAR.

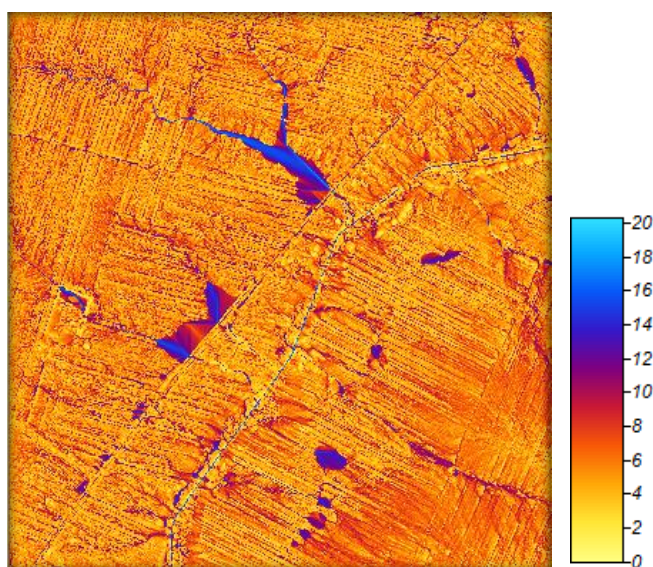
Klasa	Współczynnik szorstkości Manning'a
Grunt	0.05
Niska roślinność	0.07
Średnia roślinność	0.10
Wysoka roślinność	0.14
Budynki	1.00
Wody	0.001

Źródło:

WSKAŹNIKI WILGOTNOŚCI TERENU

TOPOGRAFICZNY WSKAŹNIK WILGOTNOŚCI (ang. *Topographic Wetness Index*, TWI) opisuje wpływ ukształtowania terenu na procesy hydrologiczne i jest jednym z podstawowych parametrów modelowania hydrologicznego.

Ryc. 28 Topograficzny wskaźnik wilgotności (TWI).



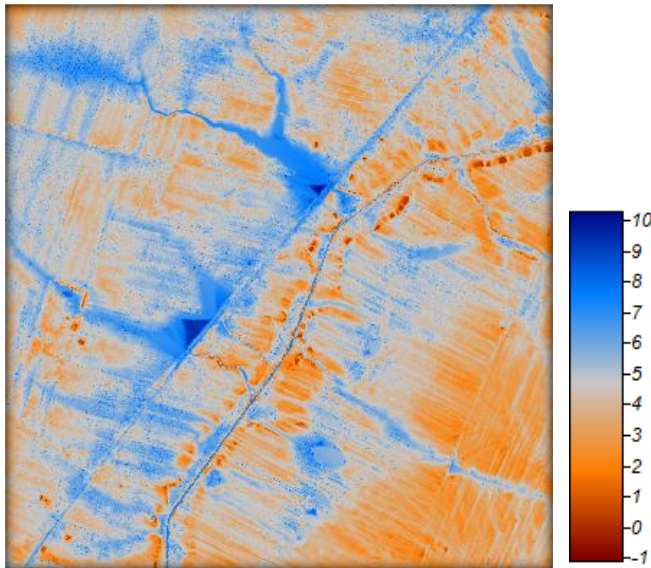
Źródło: opracowanie własne.

Wskaźnik TWI określa zależność między wielkością powierzchni biorącej udział w spływie powierzchniowym a jej nachyleniem. Dzięki temu przedstawia przestrzenny rozkład wilgotności gleby i stopień nasycenia wilgocią powierzchni ziemi

Wskaźnik **SAGA WETNESS INDEX**² jest modyfikacją wskaźnika TWI. Wskaźnik ten dnom dolin położonym w małej odległości od koryt rzecznych przypisuje się większą wartość uwilgotnienia niż wskaźnik TWI.

² jest to wskaźnik zastosowany w programie SAGA GIS.

Ryc. 29 SAGA Wetness Index.



Źródło: opracowanie własne.

Różnica między tymi wskaźnikami wynika z innego sposobu obliczania powierzchni zlewni.

PARAMETRY FIZJOGRAFICZNE

Parametry fizjograficzne zlewni można podzielić na podstawie cechy, które charakteryzują na:

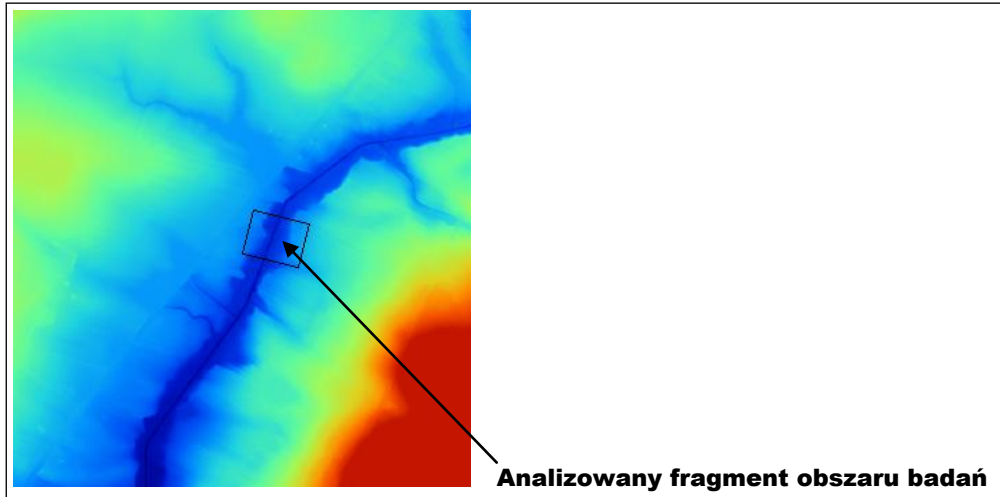
- parametry geometrii zlewni
- parametry rzeźby terenu zlewni
- parametry pokrycia i użytkowania terenu zlewni
- parametry samej sieci rzecznej

Dalszej analizie najczęściej poddawane są ich cechy i właściwości, w tym m. in. parametry geometryczne oraz pozycja i odległość względem innych obiektów i zjawisk.

STATYSTYKI STREFOWE

Statystyki strefowe obliczone zostały dla obszaru zaznaczonego prostokątem, zlokalizowanego w centralnej części obszaru badań.

Ryc. 30 Statystyki strefowe.



Parametr	Wartość
Średnia wysokość n.p.m. [m]	316.4032926
Mediana wysokości n.p.m. [m]	316.519989
Odchylenie standardowe [m]	1.796548405
Wartość minimalna wysokości n.p.m. [m]	312.70047
Wartość maksymalna wysokości n.p.m. [m]	319.7474976
Zakres [m]	7.047027588

Źródło: opracowanie własne.

Autokorelacja przestrzenna wyrażona **WSKAŹNIKIEM GLOBALNYM MORANA** dla całego obszaru badań wyniosła 0,998098.

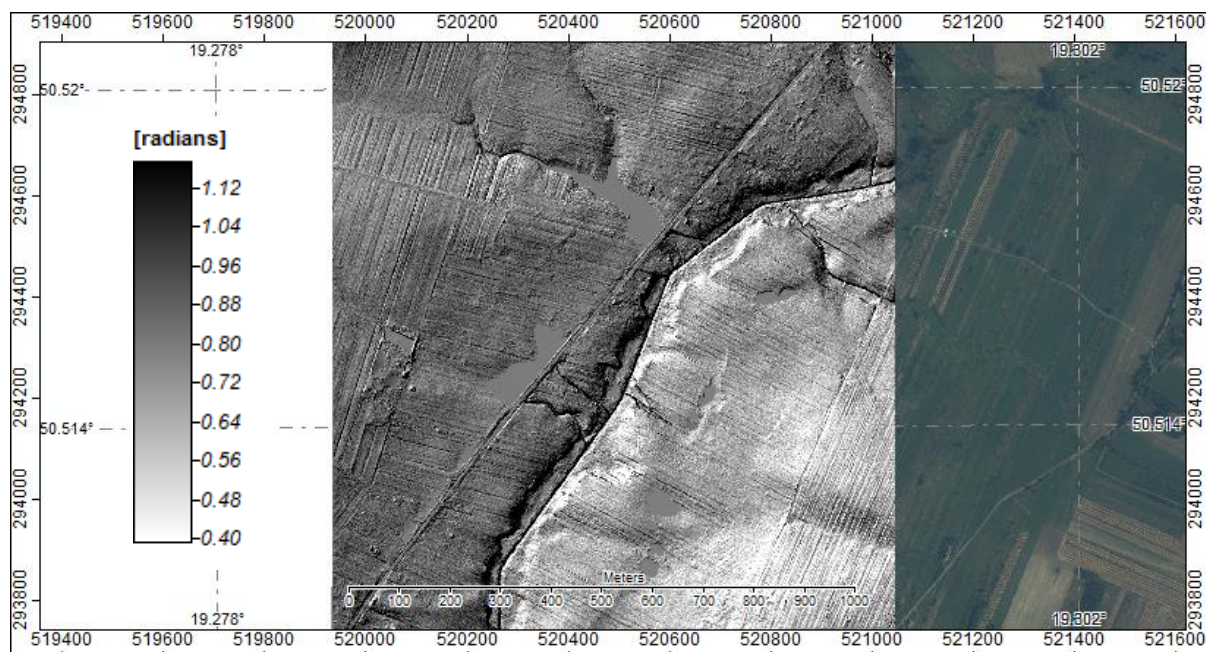
METRYKI TERENU

Metryki terenu obliczone zostały dla zlewni elementarnych wygenerowanych z cyfrowego modelu wysokościowego.

WIZUALIZACJA POWIERZCHNI TERENU

Cieniowanie

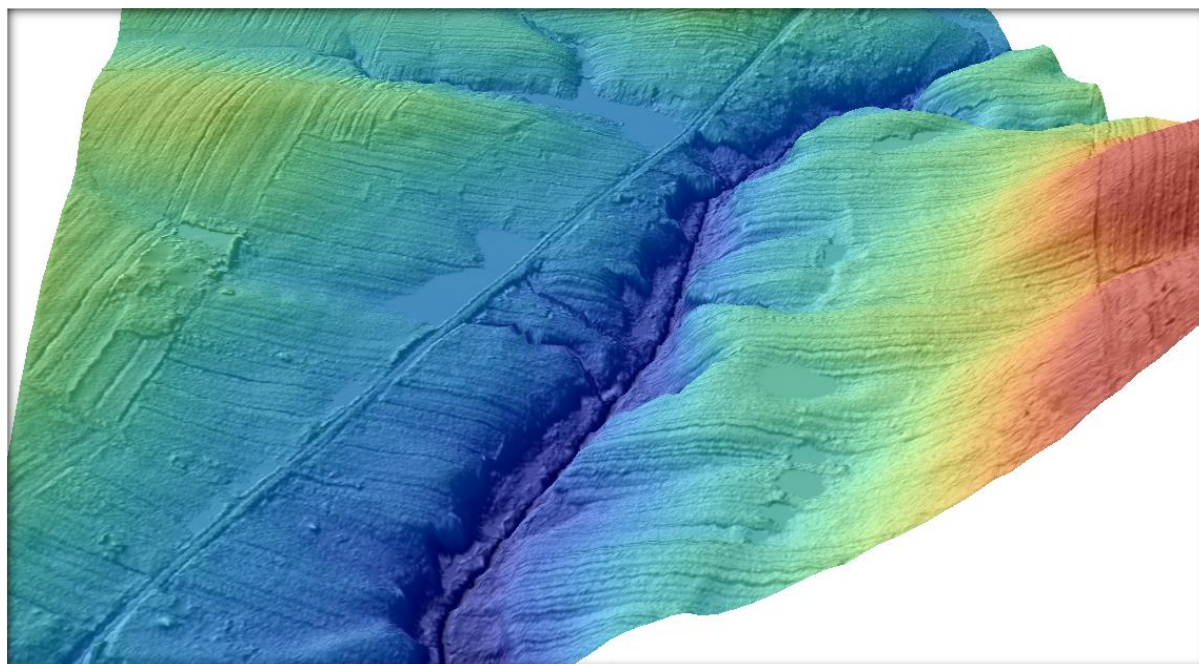
Ryc. 31 Cieniowanie.



Źródło: opracowanie własne.

WIZUALIZACJA 2.5 D

Ryc. 32 Wizualizacja fragmentu doliny rzecznej w 2.5 D.

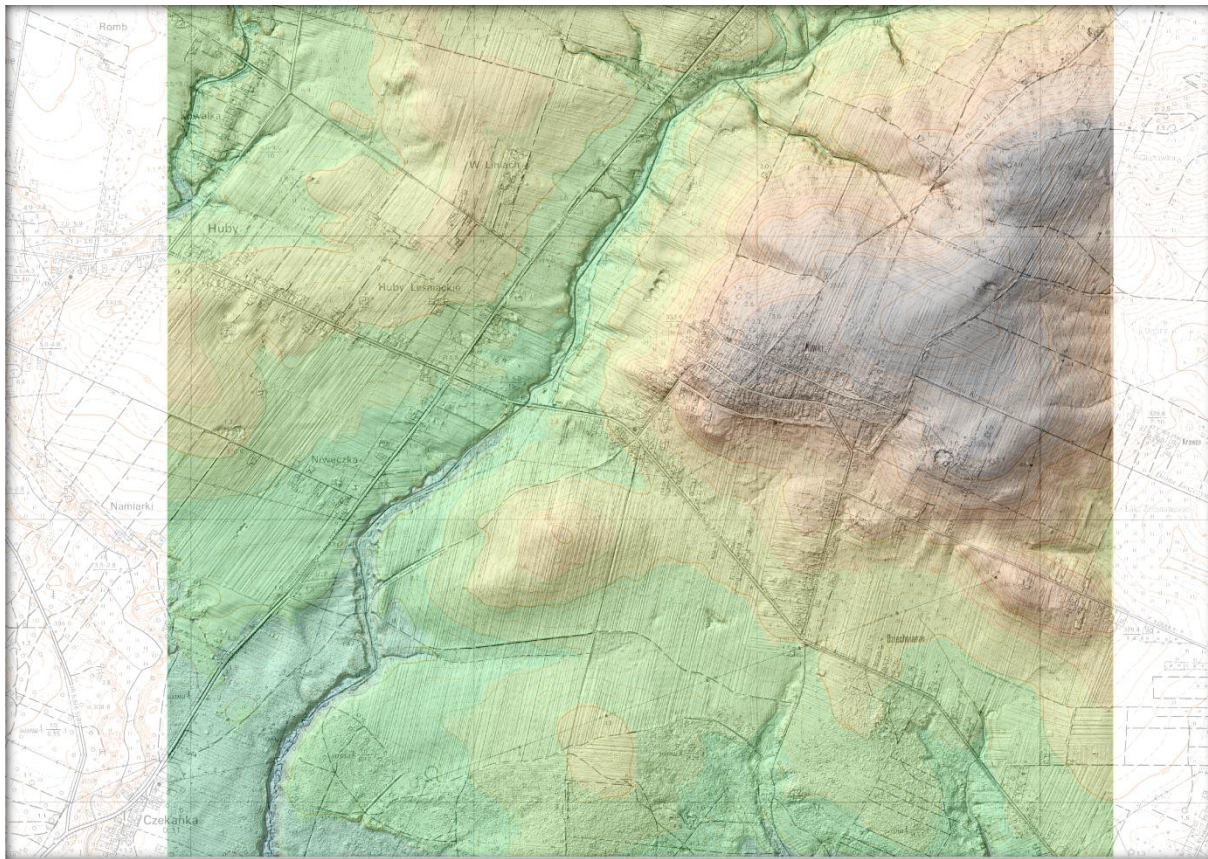


Źródło: opracowanie własne.

DRAPOWANIE

Połączenie gradientu nachylenia z obrazem powierzchni (ortofotomapą lub mapą topograficzną) nazywane jest z **DRAPOWANIEM** (ang. *drapping*).

Ryc. 33 Drapowanie.

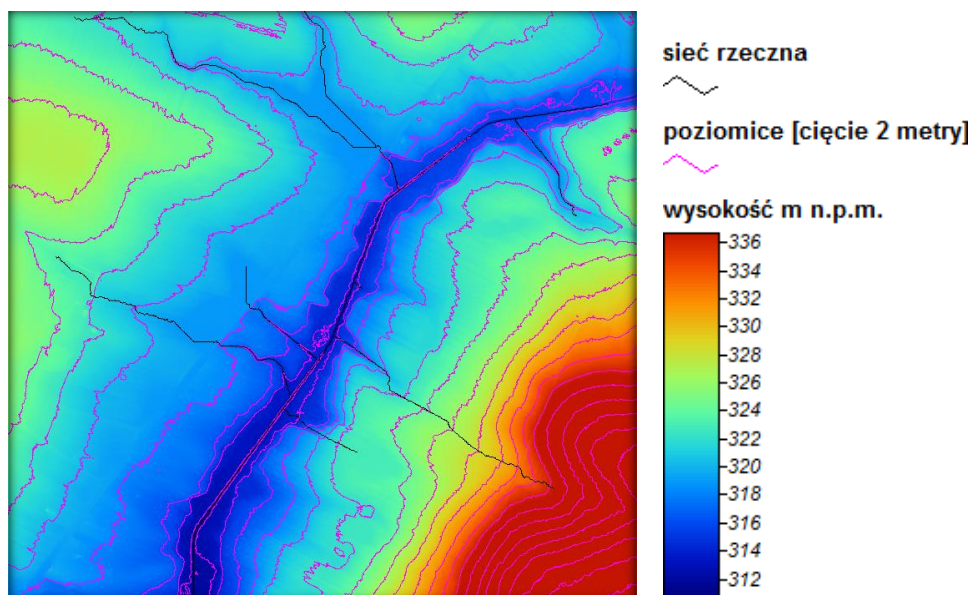


Źródło: opracowanie własne.

Drapowanie jest skutecznym sposobem lepszego zrozumienia informacji zawartych w DEM na podstawie obserwacji wizualnej.

MAPA POZIOMICOWA

Ryc. 34 Poziomice (warstwice) o cięciu poziomicowym wynoszącym 2 metry.



Źródło: opracowanie własne.

SPIS RYCIN

Ryc. 1 Dane LIDAR dla fragmentu obszaru testowego.	5
Ryc. 2 Pokrycie Polski danymi LIDAR (stan na październik 2016 r.).	5
Ryc. 3 Zasięg obszaru objętego opracowaniem.	7
Ryc. 4 Wysokość nad poziomem morza [m].	8
Ryc. 5 Histogram i podstawowe statystyki.	9
Ryc. 6 Wysokość stoków ponad poziom sieci rzecznej [w metrach].	9
Ryc. 7 Nachylenie terenu (w stopniach).	10
Ryc. 8 Relative slope position.	10
Ryc. 9 Ekspozycja terenu (w stopniach) i w klasach (1-10) po reklasyfikacji.	11
Ryc. 10 Nachylenie i ekspozycja razem.	12
Ryc. 11 Krzywizna wertykalna.	13
Ryc. 12 Profil poprzeczny terenu.	14
Ryc. 13 Profil podłużny rzeki.	14
Ryc. 14 Głębokość doliny rzecznej.	15
Ryc. 15 Topograficzny indeks pozycji.	15
Ryc. 16 Otwartość topograficzna.	16
Ryc. 17 Odległość od sieci rzecznej.	17
Ryc. 18 Zabudowa oraz roślinność średnia i wysoka.	18
Ryc. 19 Podział cyfrowego modelu wysokościowego na klastry (metodą k-średnich).	19
Ryc. 20 Sieć drenażu wygenerowana z numerycznego modelu terenu.	19
Ryc. 21 Usunięcie tzw. dziur.	20
Ryc. 22 Wypełnienie zagłębień bezodpływowych.	21
Ryc. 23 Akumulacja spływu (wg algorytmu <i>Digital Elevation Model Network</i> , DEMON) oraz akumulacja spływu po reklasyfikacji.	22
Ryc. 24 Sieć rzeczna o szerokości co najmniej 1 metra zlokalizowana w obszarze badań.	22
Ryc. 25 Porównanie wygenerowanej sieci rzecznej z siecią rzeczną zawartą na mapie topograficznej obszaru badań.	23
Ryc. 27 Zlewnie cząstkowe (elementarne).	24
Ryc. 28 Symulacja zasięgu fali powodziowej.	25
Ryc. 31 Topograficzny wskaźnik wilgotności (TWI).	26
Ryc. 32 SAGA Wetness Index.	27
Ryc. 33 Statystyki strefowe.	28
Ryc. 34 Cieniowanie.	29
Ryc. 35 Wizualizacja fragmentu doliny rzecznej w 2.5 D.	29
Ryc. 36 Drapowanie.	30
Ryc. 37 Poziomice (warstwice) o cięciu poziomym wynoszącym 2 metry.	31

SPIS TABEL

Tab. 1 Klasy danych LIDAR opracowanych przez GUGIK.	6
Tab. 2 Klasy danych LIDAR odpowiadające zabudowie i roślinności.....	17
Tab. 3 Współczynnik Manning'a dla klas użytkowania terenu wygenerowanych z danych LIDAR.....	26