

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

# Cechy krajobrazu. Rzeźba terenu

Georóżnorodność z ArcGIS Pro

Tomasz Bartuś

Wyłącznie do użytku wewnętrznego AGH.2025-10-24

## Różnorodności cząstkowe kryteriów opisujących rzeźbę terenu

Analiza rzeźby terenu jest jednym z najważniejszych aspektów badań środowiskowych i modelowań przestrzennych. W przeszłości badania morfometryczne wymagały długotrwałych prac terenowych, analiz map i zdjęć lotniczych (np. Horton, 1945; Strahler, 1957). Analogowa klasyfikacja form morfologicznych była bardzo pracochłonna, cechowała się wysokim subiektywizmem i brakiem powtarzalności. Współcześnie nauka pozyskała nowe, wydajne narzędzia pozwalające na znaczne usprawnienie i przyspieszenie analiz morfometrycznych. Dzięki powszechnej dostępności cyfrowych zdjęć lotniczych, satelitarnych, LIDAR<sup>1</sup> i innych oraz nowoczesnemu oprogramowaniu skomplikowane analizy zostały zobiektywizowane i zyskały wysoką wiarygodność i powtarzalność. Od wczesnych lat 70. ubiegłego stulecia bezpośrednim źródłem danych morfometrycznych są numeryczne modele terenu. Na ich podstawie obliczane są podstawowe i wtórne atrybuty morfometryczne<sup>2</sup> (Blyth *i in.*, 2004; Jasiewicz & Stepinski, 2013; Schmidt & Dikau, 1999; Urbański, 2012; Weiss, 2001; Wilson & Gallant, 2000).

W realizowanej ocenie różnorodności rzeźby terenu uwzględnimy przestrzenną zmienność hipsometrii, ekspozycji, nachylenia i krzywizn stoków oraz lokalnej deniwelacji (Tab. 1).

**Tab. 1. Elementy i cechy krajobrazu rzeźby terenu**

Cel oceny	Element krajobrazu	Cecha krajobrazu
morforóżnorodność	rzeźba terenu	hipsometria
		ekspozycja stoków
		nachylenia stoków
		krzywizna profilu
		krzywizna poziomic
		lokalna deniwelacja

### 1. Numeryczny model terenu

Numeryczne modele terenu (NMT) są cyfrowymi „obrazami” powierzchni Ziemi, które w sposób dyskretny przechowują informację o wysokości / głębokości przedstawianej powierzchni. W polskiej literaturze tematu funkcjonują dwa terminy: NMT, któremu od-

<sup>1</sup> **LIDAR** (*Light Detection and Ranging*) – lotniczy skanowanie laserowe – jedna z najnowocześniejszych technik pozyskiwania danych służących tworzeniu cyfrowych modeli wysokościowych.

<sup>2</sup> **Atrybuty morfometryczne** (topograficzne) – zmienne ilościowe opisujące ukształtowanie powierzchni terenu. W literaturze są opisywane jako: podstawowe (*primary topographic attributes*), np.: nachylenie, ekspozycja i krzywizna stoków, oraz wtórne atrybuty topograficzne (*secondary topographic attributes*), np.: *Slope Position Index* (SPI), *Topographic Wetness Index* (TWI) i inne (Wieczorek & Żyszkowska, 2011)

powiada anglojęzyczne termin: *Digital Elevation Model* (DEM)<sup>3</sup> oraz Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT), któremu odpowiada *Digital Terrain Model* (DTM)<sup>4</sup> (Urbański, 2012). Niezależnie od stosowanej terminologii, NMT wnoszą do analiz morfometrycznych, środowiskowych, ekologicznych, hydrologicznych i innych najwięcej informacji (Błaszczński, 1997; Moore i in., 1991).

Zacznijmy od pobrania danych NMT dla obszaru OPN i jego kolic.

### 1.1. Dane źródłowe

1.1.1. W panelu *Catalog*, na karcie *Maps* skopiuj mapę 2.3. Map\_Geol\_Tektonika, a następnie zmień nazwę skopiowanej mapy na 5.1. Map\_Morf\_NMT.

1.1.2. W panelu *Contents* usuń z mapy warstwę tektonika.

Mamy mapę gotową do utworzenia NMT (Ryc. 1).



Ryc. 1. Mapa gotowa do dodania NMT

<sup>3</sup> **Digital Elevation Model** (DEM) – cyfrowy model terenu. W literaturze polskiej odpowiada mu cyfrowy model wysokościowy (CMW) (Urbański, 2012).

<sup>4</sup> **Digital Terrain Model** (DTM) – cyfrowy model terenu, który często zawiera dodatkowo informacje o sposobie użytkowania (np. wysokości zabudowań). W literaturze polskiej odpowiada mu tzw. Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT) (Urbański, 2012).

NMT utworzymy w oparciu o dane udostępnione przez Państwowy Zasób Geodezyjny w Geoportalu Krajowym.

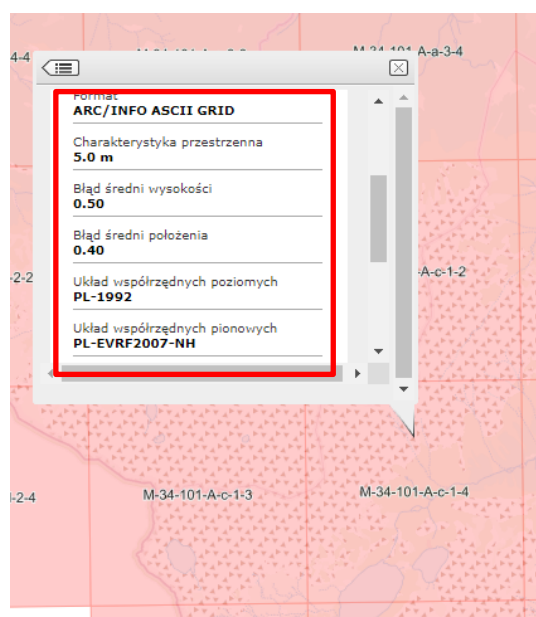
1.1.3. Utwórz folder ...\\GEODIVERSITY\\NMT\\SRC\\.

1.1.4. Przejdź do portalu [Geoportal Krajowy](http://geoportal.gov.pl) (Ryc. 2).



Ryc. 2. Strona główna Geoportalu Krajowego

1.1.5. Korzystając z zakładki *Dane do pobrania*, wyświetl na scenie siatkę arkuszy Numerycznego Modelu Terenu (NMT) z pikselem  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ , w odwzorowaniu PUWG „1992” oraz w układzie wysokościowym PL-EVRF2007-NH (Ryc. 3).



Ryc. 3. Wybrane właściwości jednego ze zbiorów NMT (Geoportal)

1.1.6. Z zasobów Geoportalu Krajowego pozyskaj wszystkie zbiory danych obejmujące cały zakres przestrzenny klasy `obszar_badan`. Zbiory zapisz w folderze `...\GEODIVERSITY\NMT\SRC\`.

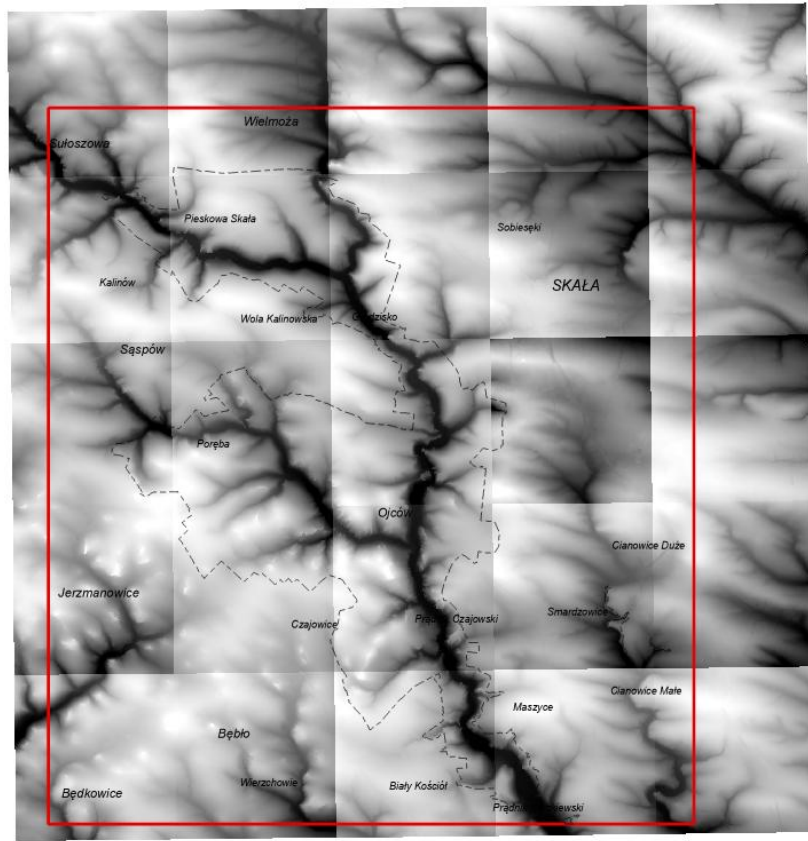
- 76532\_1217406\_M-34-64-B-c-3-1.asc
- 76532\_1217404\_M-34-64-B-a-4-3.asc
- 76532\_1216335\_M-34-64-B-d-3-3.asc
- 76532\_1216333\_M-34-64-B-d-3-1.asc
- 76532\_1216328\_M-34-64-B-d-1-3.asc
- 76532\_1216326\_M-34-64-B-d-1-1.asc
- 76532\_1216325\_M-34-64-B-c-4-4.asc
- 76532\_1216324\_M-34-64-B-c-4-3.asc
- 76532\_1216323\_M-34-64-B-c-4-2.asc
- 76532\_1216322\_M-34-64-B-c-4-1.asc
- 76532\_1216321\_M-34-64-B-c-3-4.asc
- 76532\_1216320\_M-34-64-B-c-3-3.asc
- 76532\_1216319\_M-34-64-B-c-3-2.asc
- 76532\_1216318\_M-34-64-B-c-2-4.asc
- 76532\_1216317\_M-34-64-B-c-2-3.asc
- 76532\_1216316\_M-34-64-B-c-2-2.asc
- 76532\_1216315\_M-34-64-B-c-2-1.asc
- 76532\_1216314\_M-34-64-B-c-1-4.asc
- 76532\_1216313\_M-34-64-B-c-1-3.asc
- 76532\_1216312\_M-34-64-B-c-1-2.asc
- 76532\_1216311\_M-34-64-B-c-1-1.asc
- 76532\_1216306\_M-34-64-B-b-3-3.asc
- 76532\_1216295\_M-34-64-B-a-4-4.asc
- 76532\_1216292\_M-34-64-B-a-3-4.asc
- 76532\_1216291\_M-34-64-B-a-3-3.asc

## 1.2. Dodanie rastrów NMT na scenę

1.2.1. Dodaj do mapy 5.1. `Map_Morf_NMT` wszystkie pozyskane zbiory danych ASCII GRID. Gdy zostaniesz o to poproszony potwierdź chęć obliczenia statystyk.

1.2.2. Jeśli to konieczne usuń wycinanie obiektów warstw mapy do klasy `obszar_badan`.

Poszczególne pliki `.asc` zostały dodane do sceny (Ryc. 4).



**Ryc. 4. 25 arkuszy NMT w formacie ASCII GRID dodane do mapy**

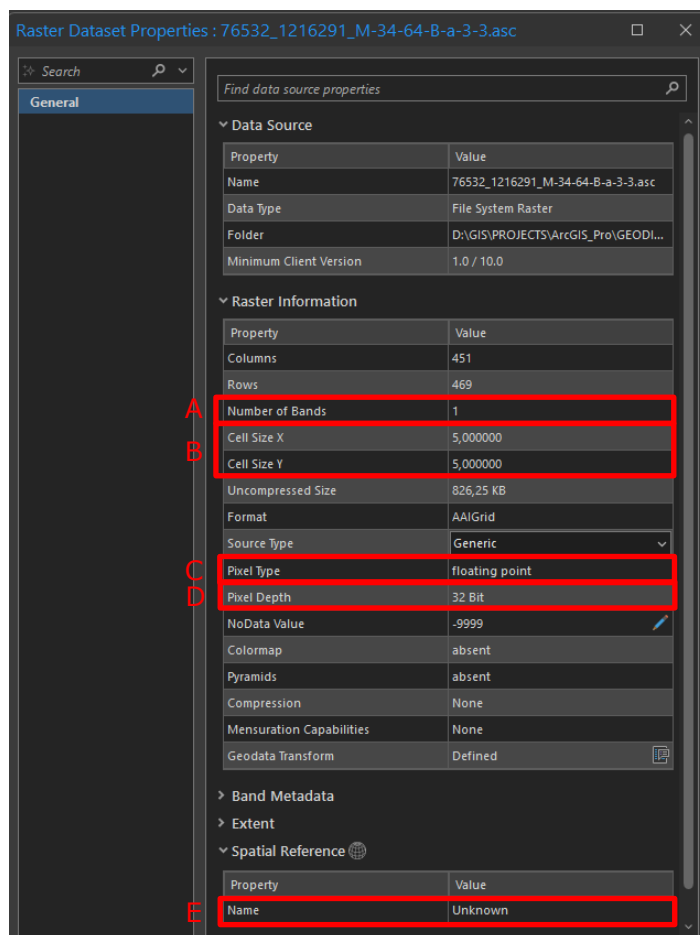
Minimalne i maksymalne wysokości n.p.m. w obrębie poszczególnych zbiorów ASCII GRID są różne, dlatego każdy z nich jest wyświetlany z nieprzystającymi do siebie paletami barw. Widać to wyraźnie wzdłuż krawędzi zbiorów danych. W kolejnym etapie ćwiczenia poszczególne zbiory ASCII GRID połączymy w jeden zbiór. Dzięki temu dane będą wyświetlane w jednym przedziale tonalnym.

### 1.3. Określenie parametrów pozyskanych rastrów

Zanim poszczególne zbiory ASCII GRID połączymy w jeden zbiór rastrowy, musimy zapoznać się z ich parametrami.

- 1.3.1. W panelu *Contents* kliknij ppm na dowolnie wybranym zbiorze ASCII GRID wyświetl jego *Właściwości (Properties)* (Ryc. 5).



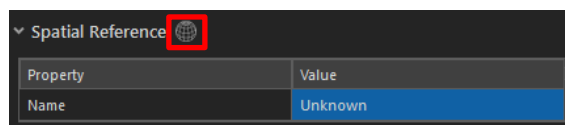


**Ryc. 5. Najważniejsze właściwości przykładowego zbioru 76532\_1216291\_M-34-64-B-a-3-3.asc; A – liczba kanałów obrazu rastrowego, B – wielkość piksela w jednostce danych (tu metry), C – zdefiniowanie rodzaju informacji zakodowanej w pikselu (tu – liczba zmiennoprzecinkowa), D – zakres przechowywanych danych (32 bity dla typu danych *floating point* to: -3.402823466e+38 to 3.402823466e+38), E – definicja odniesienia przestrzennego (GCS lub PCS)**

1.3.2. Zapamiętaj/zapisz najważniejsze parametry rastrów przedstawione na **Ryc. 5.**

## 1.4. Definiowanie w zbiorach ASCII GRID odniesienia przestrzennego

1.4.1. W panelu *Catalog* kliknij ppm na pierwszym pobranym zbiorze ASCII GRID i z menu kontekstowego wybierz polecenie *Properties* (Właściwości). W zakładce *Spatial Reference* (Odniesienie przestrzenne) wybierz ikonkę globu (**Ryc. 6**).



**Ryc. 6. Fragment okna właściwości zbioru danych ASCII GRID z położeniem narzędzia definiującego odniesienie przestrzenne**

Zwróć uwagę na niezdefiniowane odniesienie przestrzenne (*Unknown*). Zbiory danych pobrane z Geoportalu korzystają z odwzorowania Państwowy Układ Współrzędnych Geodezyjnych (PUWG) „1992” (zob. **Ryc. 3**). W zasadzie powinniśmy uzupełnić tę informację. Aby nie robić tego dla 25 zbiorów, zdefiniujemy odwzorowanie na etapie łączenia zbiorów.

### 1.5. Łączenie zbiorów ASCII GRID w jeden zbiór ESRI GRID

- 1.5.1. Aby połączyć zbiory ASCII GRID w jeden zbiór danych, na wstążce aplikacji przejdź do karty *Analysis (Analiza)*.
- 1.5.2. Wybierz narzędzie *Tools* w grupie *Geoprocessing*.
- 1.5.3. W otwartym panelu *Geoprocessing* przejdź do karty *Toolboxes (Skrzynki narzędziowe)*.
- 1.5.4. Przejdź do folderu *Data Management Tools > Raster > Raster Dataset* i uruchom narzędzie *Mosaic to new raster (Mozaika do nowego rastra)*.
- 1.5.5. W polach *Input Rasters (Rastry wejściowe)* wybierz wszystkie 25 zbiorów ASCII GRID.
- 1.5.6. Jako położenie tworzonego zbioru wynikowego wybierz utworzony folder ...\\GEODIVERSITY\\NMT\\.
- 1.5.7. Jako nazwę rastra wynikowego wpisz *NMT\_All*.
- 1.5.8. Zdefiniuj dla niego odwzorowanie PUWG „1992” (WKID: 2180).
- 1.5.9. W polu *Pixel Type* zdefiniuj format przechowywanych danych. Informacje na ten temat możemy otrzymać przeglądając właściwości rastrow wejściowych – pole *Pixel Type* oraz *Pixel Depth* (**Ryc. 5**).

Pole formularza narzędzia *Copy Raster – Pixel Type* determinuje jakie wartości pikseli będą mogły być przechowywane w pliku (zob. *ramka poniżej*).

#### UWAGA

**Głębina bitowa** (głębina pikselowa) określa zakres wartości, które może przechowywać dany plik rastrowy, co jest oparte na wzorze  $2^n$  (gdzie  $n$  jest głębokością bitową), np. raster 8-bitowy może mieć 256 unikalnych wartości z zakresu od 0–255. Poniższa tabela pokazuje zakres przechowywanych wartości dla różnych głębokości bitowych:

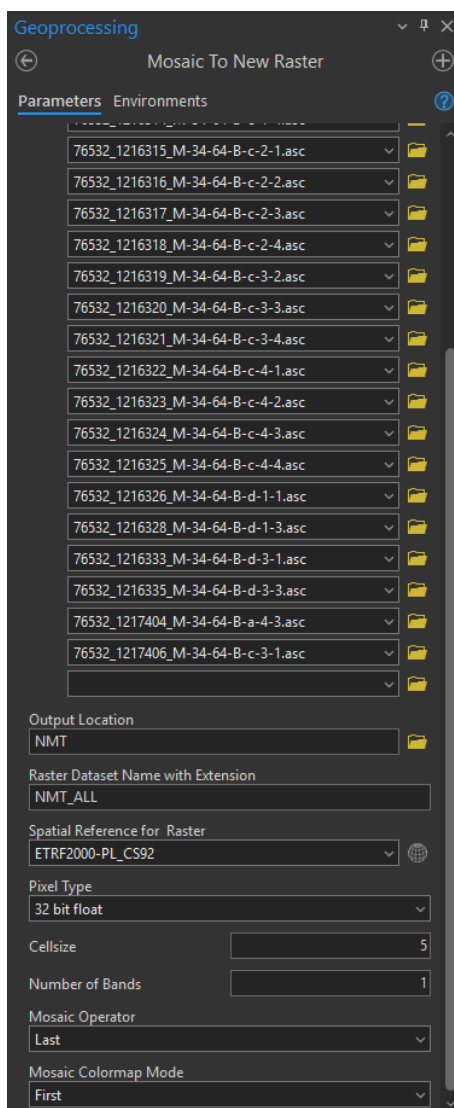
Głębina bitowa	Zakres zmienności
1 bit	0–1
2 bity	0–3
4 bity	0–15
Unsigned 8 bit	0–255
Signed 8 bit	–128 do 127
Unsigned 16 bit	0–65535
Signed 16 bit	–32768 do 32767
Unsigned 32 bit	0–4294967295
Signed 32 bit	–2147483648 do 2147483647
Floating-point 32 bit	–3.402823466e+38 do 3.402823466e+38
Unsigned 64 bit	0–18446744073709551616



1.5.10. Nasz plik przechowuje wartości wysokości n.p.m. w formacie zmienneoprzecinkowym – *floating point* (zob. **Ryc. 5**), dlatego w polu *Pixel Type* należy wybrać opcję „Floating-point 32 bit”.

1.5.11. Wielkość piksela zdefiniuj na 5 m, a liczbę kanałów (*Bands*) na 1 (**Ryc. 7**).

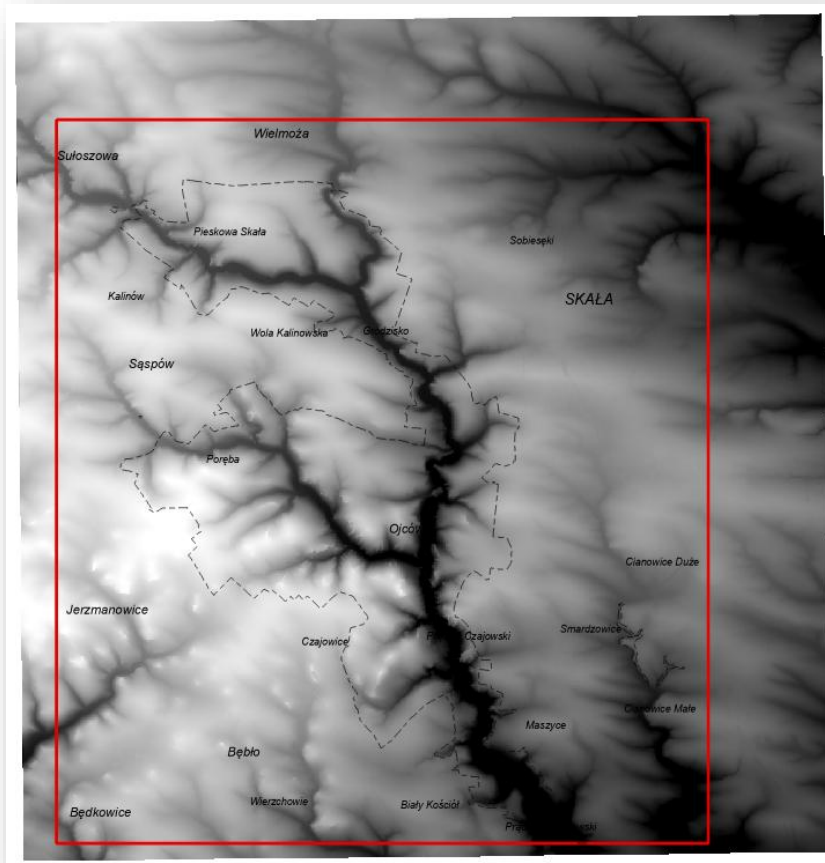
W związku z tym, że nie zdefiniowano rozszerzenia pliku wynikowego NMT\_ALL – jako format wynikowy pliku rastrowego zostanie zdefiniowany Esri Grid.



**Ryc. 7. Panel narzędzia *Geoprocessing* – *Mosaic to new raster***

1.5.12. Po poprawnym zdefiniowaniu parametrów narzędzia naciśnij przycisk *Run*.

1.5.13. Utworzony raster został dodany na scenę mapy (**Ryc. 8**).



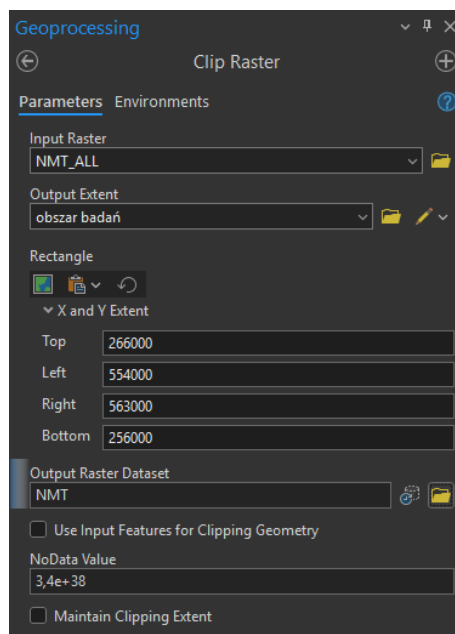
**Ryc. 8. Scalony rastrowy zbiór NMT\_ALL w formacie ESRI GRID**

1.5.14. Usuń z panelu *Contents* 25 rastrowych zbiorów składowych NMT.

Obraz wykracza poza zdefiniowany obszar badań, dlatego go przytniemy.

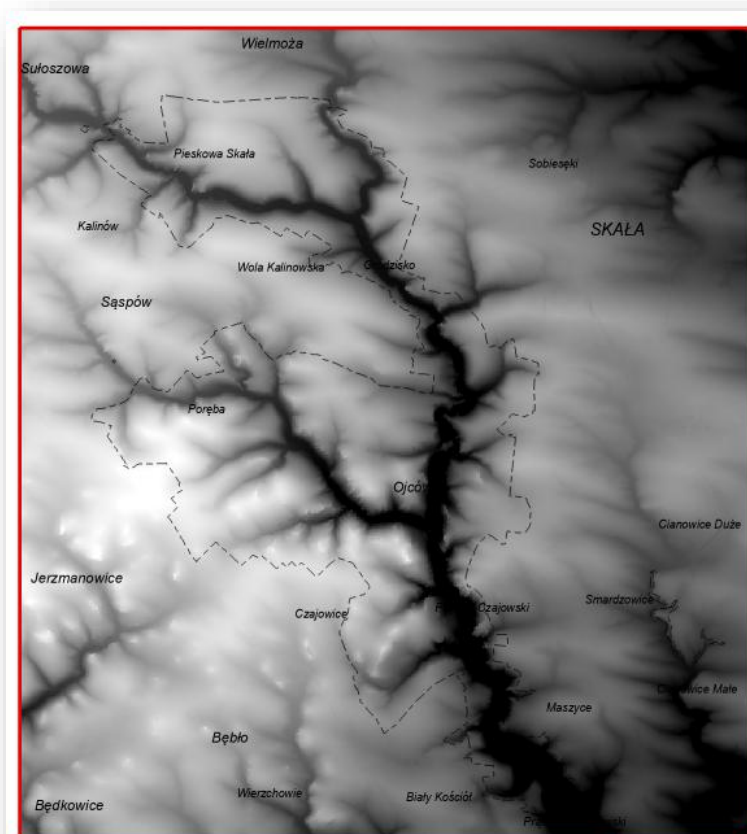
1.5.15. Wyszukaj narzędzie *Clip Raster (Data Management)*.

1.5.16. Wytnij raster NMT\_ALL w zakresie przestrzennym klasy obszar\_badan. Nowy, wycięty raster zapisz pod nazwą NMT w folderze ...\\GEODIVERSITY\\NMT\\ (Ryc. 9).



**Ryc. 9. Panel narzędzia *Geoprocessing* – *Clip Raster***

W wyniku działania narzędzia rastrowy obraz NMT w formacie ESRI GRID (Ryc. 10).



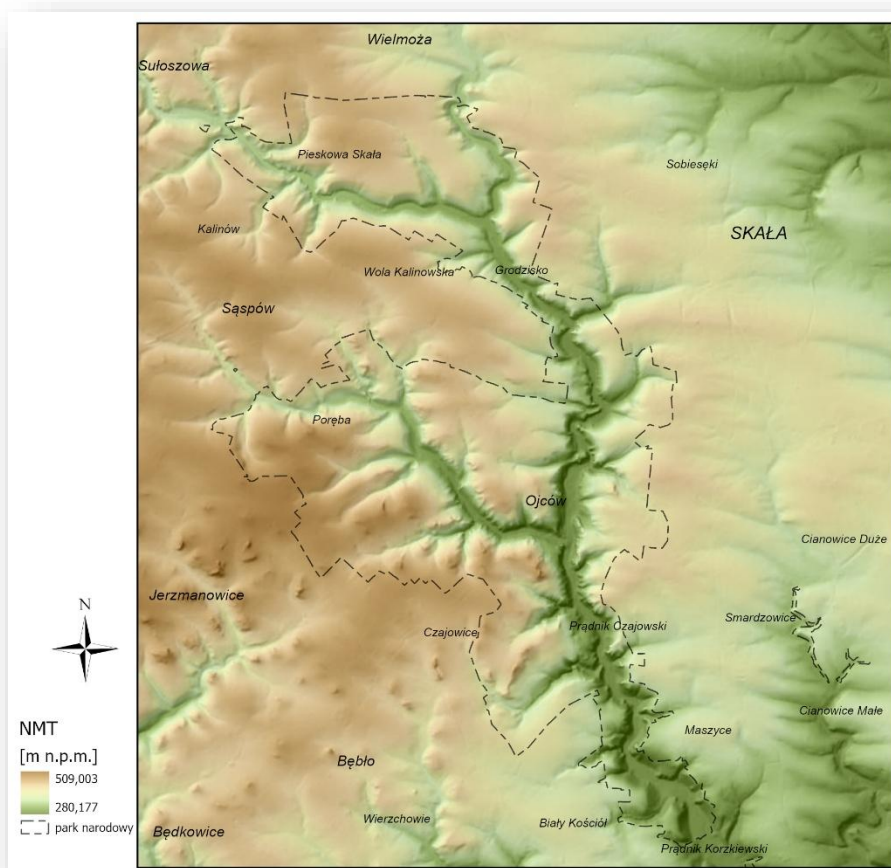
### Ryc. 10. NMT rejonu OPN i jego okolic

1.5.17. Usun z panelu *Contents* niepotrzebny juz plik NMT ALL.

- 1.5.18. Usuń go także z folderu ...\\GEODIVERSITY\\NMT\\.
- 1.5.19. Pod warstwę NMT z serwera WMTS Geoportalu dodaj cieniowany relief terenu (ISOK).
- 1.5.20. We właściwościach mapy przytnij całą mapę do zakresu klasy obszar\_badan (zakładka *Clip Layers*).
- 1.5.21. Aby poprawić czytelność mapy zmień skalę barw (*Color Ramp*) na gradient od zieleni do brązów, np. Elevation #5 (Ryc. 11).
- 1.5.22. Zmień transparentność warstwy NMT na 40%.

## 1.6. Utworzenie układu NMT

- 1.6.1. Zduplikuj układ 1.3. Layout\_Sozo. Zmień nazwę nowego układu na 5.1. Layout\_NMT.
- 1.6.2. W utworzonym układzie zmień zawartość ramki mapy z 1.3. Map\_Sozo na 5.1. Map\_Morf\_NMT.
- 1.6.3. Dopracuj legendę układu.
- 1.6.4. Zmień skalę mapy na 1:68 000.



Ryc. 11. NMT rejonu OPN i jego okolic; w tle cieniowany relief terenu (Geoportal)

Opracowany raster NMT ([Wieczorek & Żyszkowska, 2011](#)) zostanie wykorzystany w analizie różnorodności rzeźby terenu.

## **2. Mapa ekspozycji stoków**

Jednym z ważniejszych egzogenicznych czynników morfotwórczych jest położenie stoku względem kierunku padania promieni słonecznych, czyli tzw. ekspozycja solarna (dalej nazywana ekspozycją stoków). Obszary o monotonnej, poziomej morfologii są nasłonecznione w podobnym stopniu. Na obszarach o zróżnicowanej morfologii ekspozycja zboczy wpływa na ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni terenu i jest bezpośrednim powodem powstawania przestrzennej zmienności temperatury i wilgotności podłoża ([Paszyński, 1980, 2004](#); [Paszyński i in., 1999](#); [Kicińska i in., 2001](#)). Ekspozycja stoków, obok zróżnicowania litologicznego oraz nachylenia zboczy, w największym stopniu wpływa na procesy wietrzenia fizycznego skał oraz jakość i intensywność procesów rzeźbotwórczych ([Rech i in., 2001](#); [B. N. Burnett i in., 2008](#)). Do głównych efektów wietrzenia spowodowanego nasłonecznieniem zalicza się dezintegrację granularną, eksfoliację i dezintegrację blokową. W rzeczywistości, w strefie umiarkowanej, wychodnie skalne są często pokryte zwietrzeliną skalną i roślinnością, które zaburzają opisywane zjawiska i w znacznym stopniu spowalniają procesy wietrzeniowe. Efektywne wietrzenie wskutek nasłonecznienia warunkują także: wysoki stopień nagrzania skał oraz wahania temperatury w trakcie ogrzewania i ochładzania.

Ekspozycja stoków w pewnym zakresie może wpływać na sposób i intensywność zmian morfologii na skutek zjawiska zamrozu. Gdy skały są uszczelinione lub porowate, puste przestrzenie są wypełnione wodą (opadową, roztopową lub z kondensacji mgły), a temperatura oscyluje wokół 0°C, w wyniku zamarzania i zwiększenia objętości lodu o około 9%, dochodzi do wzrostu ciśnienia i niszczenia spójności skał. Głównym efektem tego zjawiska jest rozpad blokowy. Produktem wietrzenia fizycznego tego typu jest zwietrzelina blokowo-ziarnisto-pylasta o charakterze glin. Intensywność zjawiska jest silnie uzależniona od litologii skał ([Klimaszewski, 1963](#)). W umiarkowanych szerokościach geograficznych, poza obszarami wysokogóorskimi, zjawisko zamrozu zachodzi głównie w zimie i wiosną. W Polsce ze względu na dużą liczbę dni z przymrozkami (200 w roku 1990) istnieją warunki klimatyczne sprzyjające rozwojowi wietrzenia zamrozowego. Podlegają mu pozbawione pokrywy zwietrzelinowej, nagie wychodnie skalne.

Ekspozycja stoków, przez przestrzenną zmienność temperatury, wpływa także na intensywność parowania. Zjawisko to ma szczególne znaczenie na nagich wychodniach skał ilastych, np. łowców, mułowców, glin, lessów lub margli. Utwory te w stanie wilgotnym cechują się znaczną spójnością. Po odparowaniu wody rozpadają się na drobne

okruchy lub tworzą na powierzchni wychodni charakterystyczne szczeliny dzielące powierzchnię na wieloboczne wklęsłe fragmenty. Powstające formy ułatwiają rozmywanie i modelowanie powierzchni (Klimaszewski, 1963).

Na półkuli północnej, na północ od zwrotnika Raka ( $23^{\circ}27' N$ ), Słońce zawsze świeci od południowej strony. Za ciepłą ekspozycję (solarną) uważany jest kierunek południowo-zachodni. Skały są w ciągu dnia silnie nagrzewane, a w nocy, zwłaszcza w warunkach górskich, szybko ochładzane. Powoduje to, że w umiarkowanych szerokościach geograficznych nagie wychodnie skał eksponowane w tym kierunku, w pewnym zakresie, poddawane są temu rodzajowi wietrzenia (Klimaszewski, 1963).

Ilość światła docierającego do powierzchni w istotny sposób wpływa także na wegetację (Davis & Goetz, 1990; Bennie *i in.*, 2006) i zróżnicowanie siedliskowe organizmów roślinnych i zwierzęcych (M. R. Burnett *i in.*, 1998; Stage, 1976).

## 2.1. Utworzenie mapy ekspozycji stoków

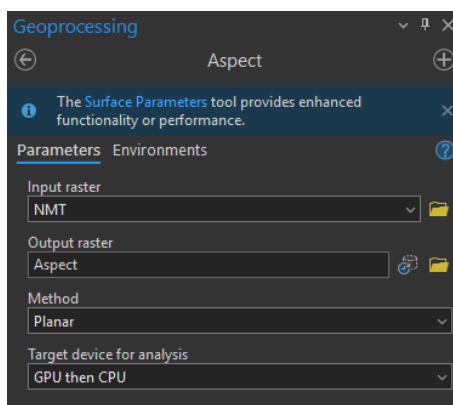
- 2.1.1. W panelu *Catalog*, na karcie *Maps* skopiuj mapę 5.1. Map\_Morf\_NMT, a następnie zmień nazwę skopiowanej mapy na 5.2. Map\_Morf\_Aspect.

Raster ekspozycji stoków tworzymy przy użyciu narzędzia *Aspect*.

- 2.1.2. Na karcie *Analysis* kliknij w grupie *Geoprocessing* narzędzie *Tools*. Z karty *Toolboxes* okna *Geoprocessing* wybierz *Spatial Analyst Tools > Surface > Aspect (3D Analyst Tools)*.

- 2.1.3. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź NMT (Ryc. 12).

- 2.1.4. Jako raster wyjściowy (*Output raster*) wprowadź ...\\GEODIVERSITY\\\\NMT\\Aspect.



Ryc. 12. Okno dialogowe *Aspect* generujące raster ekspozycji stoków

- 2.1.5. Po wypełnieniu okna dialogowego naciśnij przycisk *Run*.  
 2.1.6. Z panelu *Contents* usuń warstwę NMT.  
 2.1.7. Włącz widoczność warstwy cieniowanego reliefu terenu ISOK\_cien.



2.1.8. Aby lepiej zobrazować zróżnicowanie ekspozycji stoków, zamiast klasycznej przezroczystości, opcję *Layer Blend* warstwy *Aspect* ustaw na *Overlay*.

## 2.2. Utworzenie układu ekspozycji stoków

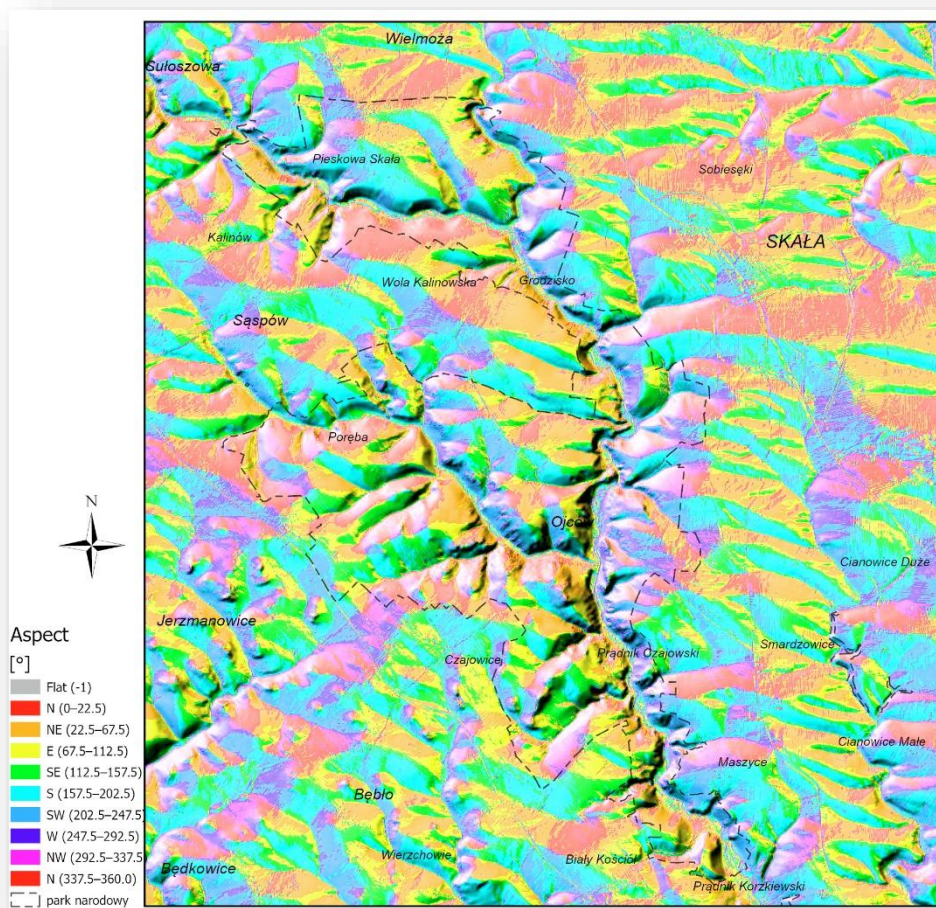
2.2.1. Zduplikuj układ 1.3. *Layout\_Sozo*. Zmień nazwę nowego układu na 5.2. *Layout\_Aspect*.

2.2.2. W utworzonym układzie zmień zawartość ramki mapy z 1.3. *Map\_Sozo* na 5.2. *Map\_Morf\_Aspect*.

2.2.3. Dopracuj legendę układu.

2.2.4. Zmień skalę mapy na 1:68 000.

W wyniku działania narzędzia otrzymujemy układ ekspozycji stoków (Ryc. 13).



**Ryc. 13. Ekspozycja stoków w OPN i jego okolicach**

Opracowany raster ekspozycji stoków (Wieczorek & Żyszkowska, 2011) będzie wykorzystany w analizie różnorodności rzeźby terenu.



### 3. Mapa nachyleń stoków

Nachylenie stoków stanowi jeden z najważniejszych czynników wpływających na postrzeganie krajobrazu. Jest definiowane jako kąt zawarty pomiędzy powierzchnią terenu a płaszczyzną poziomą i wyznaczany w kierunku największego spadku (Urbański, 2012). Wielkość nachyleń stoków wpływa na rodzaj i dynamikę procesów morfotwórczych – denudacji i akumulacji. W zależności od natury zjawiska warunkuje ona jakość i intensywność ruchów masowych i spłukiwania (Klimaszewski, 1963). Nachylenie stoków wpływa na ilość promieniowania słonecznego docierającego do eksponowanej powierzchni. Południowe stoki o nachyleniach około 30° absorbują o 30% promieniowania więcej w stosunku do powierzchni horyzontalnej, a do podobnych stoków o ekspozycji północnej dociera zaledwie o 10% promieniowania mniej niż do powierzchni poziomych (Kicińska i in., 2001). Nachylenie stoków jest także istotnym czynnikiem wpływającym na wegetację roślin (Bolińska & Znoj, 2003), reguluje sposób rolniczego użytkowania ziemi, zagospodarowania przestrzennego i warunkuje rozwój sieci komunikacyjnej.

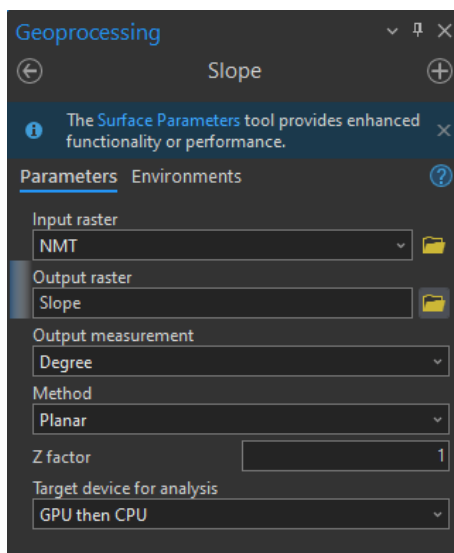
Z praktycznego punktu widzenia klasy nachyleń stoków są wykorzystywane w analizach przestrzennych stref zagrożeń ruchami masowymi ( np. Arabameri i in., 2020; Chowdhuri i in., 2021; Sahana i in., 2022; Chen i in., 2024, 2025; Sahrane i in., 2025), w analizach spływu powierzchniowego, stopnia uwilgocenia gleby, pokrycia roślinnością, zróżnicowania topoklimatycznego (Paszyński, 1980; Kicińska i in., 2001; Bartuś, 2020), do określenia jakości wegetacji (Bennie i in., 2006), definicji klasy gruntów (np. Witek, 1973), różnorodności krajobrazowej (Wilson & Gallant, 2000; Kot, 2006; Bartuś, 2020; Bartuś & Mastej, 2023, 2025; Mastej & Bartuś, 2024) i innych.

#### 3.1. Utworzenie mapy nachyleń stoków

- 3.1.1. W panelu *Catalog*, na karcie *Maps* skopiuj mapę 5.1. Map\_Morf\_NMT, a następnie zmień nazwę skopiowanej mapy na 5.3. Map\_Morf\_Slope.

Raster nachyleń stoków tworzymy przy użyciu narzędzia *Slope*.

- 3.1.2. Na karcie *Analysis* kliknij w grupie *Geoprocessing* narzędzie *Tools*. Z karty *Toolboxes* okna *Geoprocessing* wybierz *Spatial Analyst Tools > Surface > Slope (3D Analyst Tools)*.
- 3.1.3. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź NMT (Ryc. 14).
- 3.1.4. Jako raster wyjściowy (*Output raster*) wprowadź ...\\GEODIVERSITY\\NMT\\Slope.
- 3.1.5. Jako jednostkę danych wyjściowych pozostaw stopnie Degree, a jako wartość jednostki 1.



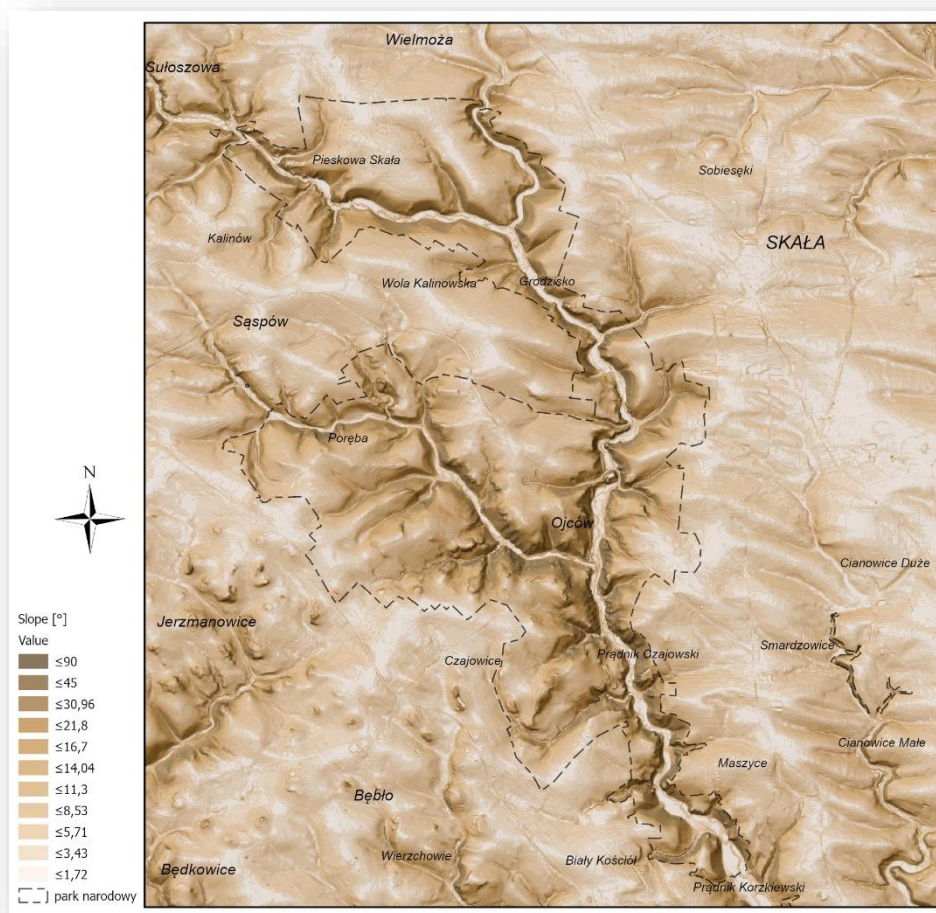
**Ryc. 14. Okno dialogowe narzędzia *Slope* generującego raster nachyleń stoków**

- 3.1.6. Po wypełnieniu okna dialogowego naciśnij przycisk *Run*.
- 3.1.7. Z panelu *Contents* usuń warstwę *NMT*.
- 3.1.8. Włącz widoczność warstwy cieniowanego reliefu terenu *ISOK\_cien*.
- 3.1.9. Zmień przezroczystość warstwy *Slope* na 30%.

W wyniku działania narzędzia otrzymujemy raster nachyleń stoków (Ryc. 15).

## 3.2. Utworzenie układu nachyleń stoków

- 1.1.1. Zduplikuj układ 1.3. *Layout\_Sozo*. Zmień nazwę nowego układu na 5.3. *Layout\_Slope*.
- 1.1.2. W utworzonym układzie zmień zawartość ramki mapy z 1.3. *Map\_Sozo* na 5.3. *Map\_Morf\_Slope*.
- 1.1.3. Dopracuj legendę układu.
- 1.1.4. Zmień skalę mapy na 1:68 000.



**Ryc. 15. Rastrowy model nachylenia stoków w OPN i jego okolicach; klasyfikacja 5-sopniowa**

Opracowaną mapę nachyleń stoków (Wieczorek & Żyszkowska, 2011) będzie wykorzystywana w analizach różnorodności rzeźby terenu.

## 4. Mapy krzywizny stoków

Krzywizna należy do grupy podstawowych atrybutów topograficznych i służy do opisu kształtu stoków (Bartuś, 2020; Wieczorek & Żyszkowska, 2011). Współczesne oprogramowanie umożliwia wyznaczenie krzywizny poziomic (in. planarnej, *plan curvature*), profilu (in. wertykalnej, *profile curvature*) oraz krzywizny sumarycznej (całkowitej).

**Krzywizna planarna** opisuje kształt poziomic na powierzchni poziomej. Pozwala ona na wyodrębnienie fragmentów zboczy mających tendencję do konwergencji (zbieżności) spływu powierzchniowego oraz obszarów powodujących jego dywergencję (rozbieżność). Atrybut przyjmuje wartości proporcjonalne do stopnia zakrzywienia powierzchni morfologicznej, ujemne dla dolin, dodatnie dla grzbietów oraz zblizone do zera dla stoków prostych w planie.

**Krzywizna profilu** opisuje zmianę nachylenia wzdłuż linii spływu i pozwala na określenie kształtu stoku. Atrybut przyjmuje wartości dodatnie dla stoków wklęsłych w profilu, ujemne dla stoków wypukłych w profilu oraz zbliżone do zera dla stoków prostych w profilu. **Krzywizna sumaryczna** nie opisuje zakrzywienia linii (poziomic bądź profili), lecz wyznacza zakrzywienie płaszczyzny topograficznej. Tak jak poprzednio, atrybut może przyjmować wartości ujemne (dla obszarów wklęsłych) bądź dodatnie (dla obszarów wypukłych).

#### 4.1. Utworzenie map krzywizn stoków

4.1.1. Na karcie *Maps* skopiuj mapę 5.1. *Map\_Morf\_NMT*, a następnie zmień nazwę skopiowanej mapy na 5.4. *Map\_Morf\_Curvature*. Dodaj tę mapę na scenę.

Rastry krzywizn tworzymy przy użyciu narzędzia *Curvature (3D Analyst Tools)*.

4.1.2. W polu szybkiego dostępu *Command Search* wpisz słowo „*Curvature*”, alternatywnie na karcie *Analysis* kliknij w grupie *Geoprocessing* narzędzie *Tools*. Z karty *Toolboxes* okna *Geoprocessing* wybierz *Spatial Analyst Tools > Surface > Curvature*. Uruchom to narzędzie.

4.1.3. Jako raster wejściowy (*Input raster*) wprowadź *NMT* (Ryc. 16).

Narzędzie *Curvature* za jednym zamachem tworzy trzy pliki wynikowe:

- raster krzywizny całkowitej (*Output curvature raster*),
- raster krzywizny profilu (wertykalnej) (*Output profile curve raster*),
- raster krzywizny poziomic (planarnej) (*Output plan curve raster*).

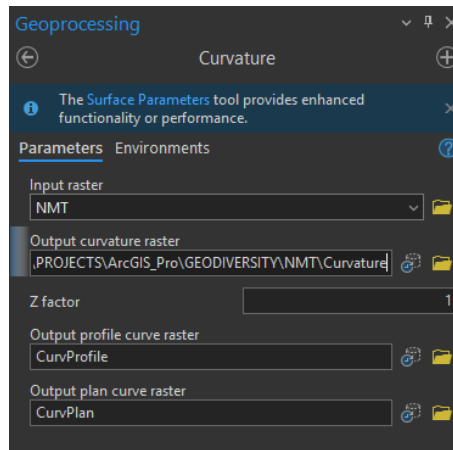
Wszystkie wyjściowe rastry zapiszemy do folderu: ...\\GEODIVERSITY\\NMT\\.

4.1.4. Jako raster wyjściowy krzywizny całkowitej (*Output curvature raster*) wprowadź *Curvature*.

4.1.5. Jako raster wyjściowy krzywizny profilu (*Output profile curve raster*) wprowadź *CurvProfile*.

4.1.6. Jako raster wyjściowy krzywizny planarnej (*Output plan curve raster*) wprowadź *CurvPlan*.

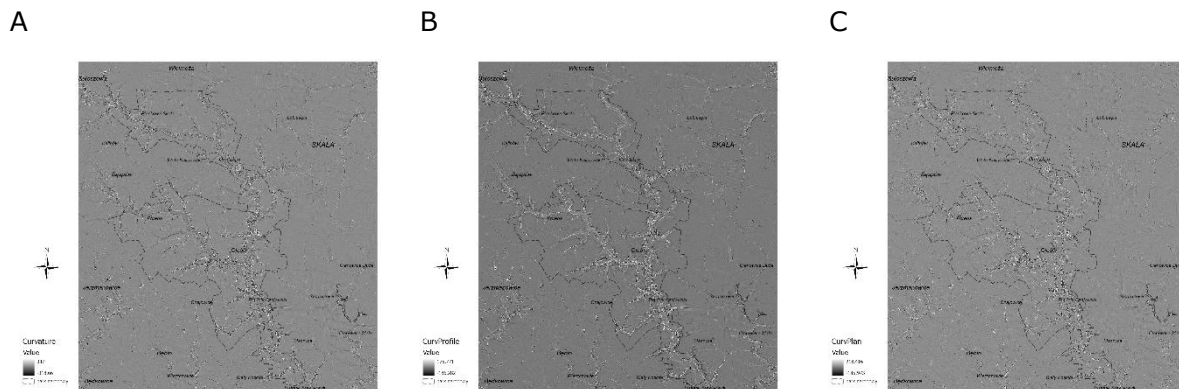
4.1.7. Pole *Z factor* pozostaw bez zmian.



**Ryc. 16.** Okno dialogowe narzędzia *Curvature* generującego rastry krzywizn: całkowitej, profilu i planarnej

- 4.1.8. Po uzupełnieniu pól okna dialogowego naciśnij przycisk *Run*.
- 4.1.9. Z panelu *Contents* usuń warstwę *NMT*.
- 4.1.10. Włącz widoczność warstwy cieniowanego reliefu terenu *ISOK\_cien*.
- 4.1.11. Zmień przezroczystość warstwy *Slope* na 30%.

W wyniku działania narzędzia otrzymujemy trzy obrazy rastrowe krzywizn: całkowitej (Ryc. 17A), profilu (Ryc. 17B) i poziomic (Ryc. 17C).



**Ryc. 17.** Mapy krzywizn całkowitej (A), profilu (B) i poziomic (C) OPN i jego okolic

Mapa krzywizny poziomic (Ryc. 17C) będzie w dalszym ciągu analizy wykorzystywana do oceny różnorodności morfologicznej.

## 5. Mapa lokalnej deniwelacji

Rozwój modeli morforóżnorodności (Bartuś, 2020; Bartuś & Mastej, 2023, 2025; Mastej & Bartuś, 2024) wskazuje, że jednym z najlepszych wskaźników zróżnicowania rzeźby terenu jest lokalna deniwelacja (Bartuś & Mastej, 2025). Należy ją rozumieć jako różnicę pomiędzy wartościami wysokości pikseli *NMT*, a średnią wysokością terenu w pewnej lokalnej przestrzeni wokół analizowanego piksela. Taki sens ma geomorfome-

tryczny wskaźnik *Topographic Position Index* (TPI) (Weiss, 2001; Jenness, 2006). Obecnie narzędzie wchodzi w skład zewnętrznego pakietu narzędzi **Topography Toolbox**.

## 5.1. Instalacja Topography Toolbox

- 5.1.1. Pobierz narzędzie [Topography Tools Pro](#).
- 5.1.2. Utwórz podfolder ...\\GEODIVERSITY\\ADDS\\SRC\\.
- 5.1.3. Przenieś pobrane archiwum do utworzonego folderu ...\\SRC\\.
- 5.1.4. Rozpakuj archiwum.
- 5.1.5. Przenieś rozpakowane archiwum do folderu ...\\GEODIVERSITY\\ADDS\\.
- 5.1.6. Upewnij się, że po wykonanych czynnościach posiadasz strukturę folderów taką jak poniżej:

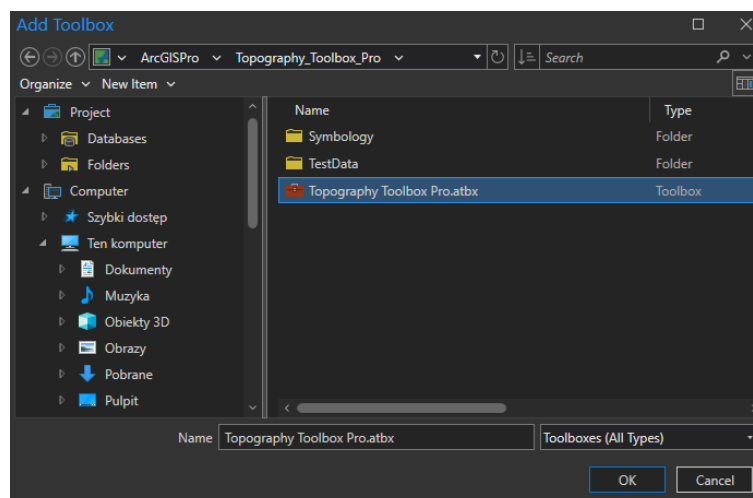
```

└─ GEODIVERSITY\
    └─ ADDS\
        └─ SRC\
            └─ Topography_Toolbox_Pro.zip
            └─ Topography_Toolbox_Pro\

```

ArcGIS Pro umożliwia używanie niestandardowych narzędzi geoprzetwarzania, które są zawarte w projektach lub tworzenie i używanie własnych niestandardowych narzędzi. Aplikacja obsługuje niestandardowe narzędzia geoprzetwarzania, które są tworzone za pomocą **ModelBuilder** lub **Python**.

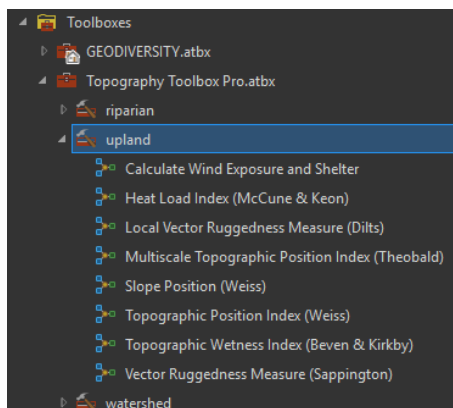
- 5.1.7. Aby dodać skrzynkę narzędziową do projektu, w panelu *Catalog* kliknij ppm na zakładce *Toolboxes* i z menu kontekstowego wybierz *Add Toolbox* (*Dodaj skrzynkę narzędziową*). Wskaż położenie pliku narzędzia (Ryc. 18).



Ryc. 18. Dodanie ścieżki do zestawu narzędzi **Topography\_Toolbox\_Pro**



Link do skrzynki narzędziowej jest zapisywany w projekcie w panelu *Catalog* w zakładce *Toolboxes* (*Skrzynki narzędziowe*) (Ryc. 19).



Ryc. 19. Panel *Catalog*, zakładka *Toolboxes* z widoczną strukturą narzędzi *Topography\_Toolbox\_Pro*

## 5.2. Topograficzny Indeks Pozycji

5.2.1. W panelu *Catalog*, na karcie *Maps* skopiuj mapę 5.1. *Map\_Morf\_NMT*, a następnie zmień nazwę skopiowanej mapy na 5.5. *Map\_Morf\_TPI*.

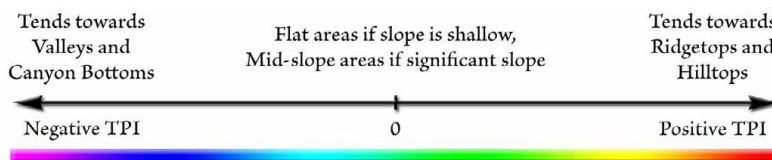
**Topograficzny indeks pozycji (TPI)** jest geomorfometrycznym algorytmem obliczeniowym wykorzystywanym do klasyfikacji najważniejszych form morfologicznych. Został opracowany w 2001 roku przez [Andrew Weiss](#) (2001). Charakteryzuje się on pomysłem i prostym algorytmem obliczeniowym. W największym zarysie polega on na określeniu różnic pomiędzy oryginalną powierzchnią NMT, a wyliczoną powierzchnią uśrednionych wysokości. Do analizy wykorzystywane są obrazy rastrowe.

Generowanie powierzchni uśrednionej przebiega półautomatycznie. Dla każdej komórki podstawowej (piksela) tej powierzchni obliczana jest wartość przeciętna z komórek znajdujących się w pewnym jej otoczeniu, które dalej będzie nazywane **sąsiedztwem** lub **skalą obserwacji**. Na wstępie określa się kształt i wielkość wspomnianego sąsiedztwa. Może mieć ono formę kwadratu, koła, pierścienia, wycinka koła lub być nieregularne – zdefiniowane przez badacza. Podczas tworzenia indeksu TPI wykorzystuje się technikę ruchomego okna. Na pierwszą komórkę analizowanej powierzchni nakładana jest maska zdefiniowanego sąsiedztwa i w oparciu o dane znajdujące się w jej wnętrzu dokonywane są obliczenia średniej wysokości. Obliczona średnia jest następnie odejmowana od wysokości piksela centralnego. Po wykonaniu obliczeń maska zostaje przesunięta na kolejną komórkę i algorytm ulega powtórzeniu. Obliczenia dokonywane są w kolejnych obszarach analizowanego rastra, aż do wyczerpania całej jego powierzchni.

Atrybuty TPI komórek mają wartości ujemne wtedy gdy analizowana komórka leży niżej od średniej wysokości komórek swojego sąsiedztwa (obszary o reliefie wklęsłym: doliny, kaniony, zagłębienia terenu, Ryc. 20). Dodatkowo wartości atrybutu TPI wskazują

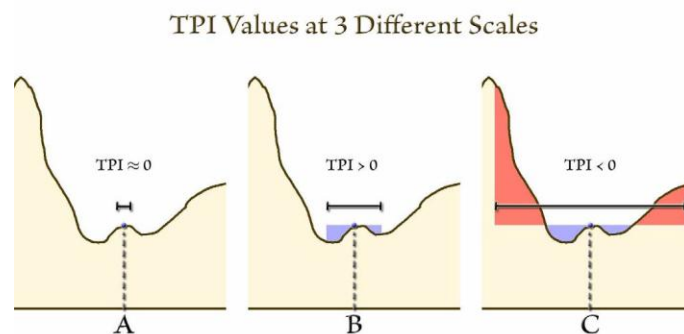


na wyższe położenie komórki względem swego sąsiedztwa (obszary o reliefie wypukłym: wzgórza, grzbiety). Wartości TPI zbliżone do zera informują nas, że analizowany wycinek powierzchni NMT jest podobny do powierzchni uśrednionej. Z sytuacją taką możemy mieć do czynienia w obszarach płaskich albo na stokach, na których średnia wysokość komórek analizowanego sąsiedztwa jest równa wysokości komórki obliczanej. W wyniku przeprowadzonych obliczeń, powstaje nowa, rastrowa warstwa informująca nas jak bardzo wysokość w danym miejscu odbiega od lokalnej średniej.



**Ryc. 20. Zmienność indeksu TPI**

Indeks TPI jest bardzo czuły na wielkość sąsiedztwa analizowanej komórki. Ten sam punkt, w zależności od przyjętej skali obserwacji może zostać różnie zinterpretowany, np., lokalne niewielkie wzniesienie znajdujące się wewnątrz doliny (Ryc. 21), jeżeli zastosujemy bardzo wąski promień sąsiedztwa, może zostać zinterpretowane jako obszar płaski. Jeżeli jednak przyjmimy większą, ale niewykraczającą poza szerokość doliny skalę obserwacji, analizowany obszar zostanie zinterpretowany jako obszar wyniesiony. Jeżeli jednak zwiększymy skalę obserwacji na tyle aby objęła swym zasięgiem przeciwległe stoki doliny, obszar zostanie sklasyfikowany jako wklęsły.

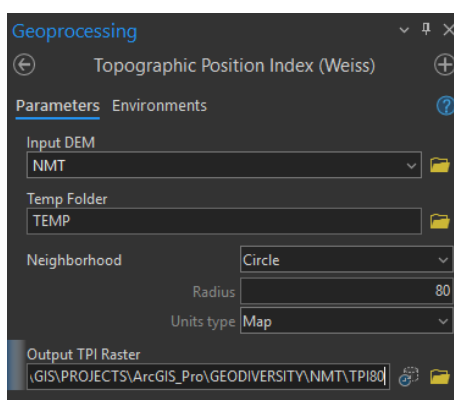


**Ryc. 21. Zależność wyników interpretacji morfologicznej od skali obserwacji**

Duże znaczenie w analizach ma także kształt obszaru zliczania. Niezależnie od problemów interpretacyjnych, zróżnicowanie skali obserwacji wpływa na możliwość rejestracji mniejszych bądź większych struktur morfologicznych (Jenness, 2006). Im zastosujemy mniejszą skalę obserwacji, tym mniejsze struktury powierzchni terenu będziemy w stanie rozpoznać, a później je sklasyfikować.

Obliczmy atrybut topograficzny TPI. W nawiązaniu do badań (Bartuś, 2020), zastosujemy sąsiedztwo w kształcie koła o promieniu 80 m.

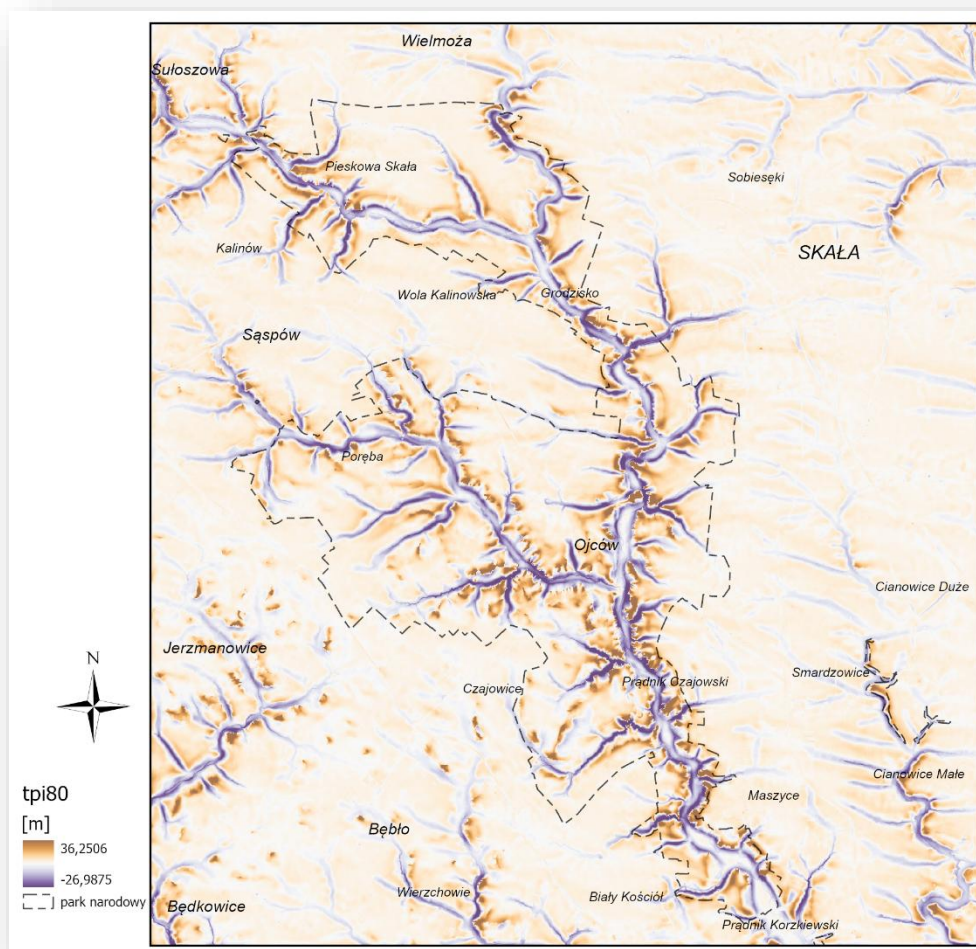
- 5.2.2. W projektowym *Toolboxes* odszukajmy zainstalowany zestaw narzędzi *Topography Tools Pro* i z zestawu *upland* wybierzmy narzędzie *Topographic Position Index (Weiss)*.
- 5.2.3. W oknie dialogowym *Topographic Position Index (Weiss)*, jako zbiór danych wejściowych (*Input DEM*) wprowadźmy posiadany NMT (**Ryc. 22**).
- 5.2.4. Jako folder tymczasowy *Temp Folder* wprowadź dowolny folder, np. D:\.
- 5.2.5. Jako obszar zliczania wybierzmy koło o promieniu 80 m w jednostkach mapy czyli w metrach.
- 5.2.6. Raster wyjściowy (*Output TPI Raster*) zapiszemy w lokalizacji ...\\GEODIVERSITY\\NMT\\. Jako nazwę zbioru wyjściowego wprowadź TPI80.
- 5.2.7. Po uzupełnieniu pól okna dialogowego naciśnij przycisk *Run*.



**Ryc. 22. Okno dialogowe *Topographic Position Index (Weiss)***

- 5.2.8. Z panelu *Contents* usuń warstwę NMT.
- 5.2.9. Zmień sybologię warstwy TPI80 na taką która zmienia się od zimnych kolorów (np. niebieskiego) poprzez neutralne (np. biały) po kolor ciepły (np. czerwony).
- 5.2.10. Włącz widoczność warstwy cieniowanego reliefu terenu ISOK\_cien.
- 5.2.11. Zmień przezroczystość warstwy TPI80 na 30%.

W wyniku działania narzędzia uzyskujemy obraz zmienności indeksu TPI80 (**Ryc. 23**).



Ryc. 23. Mapa zmienności indeksu TPI dla promienia sąsiedztwa równego 80 m

## 6. Analizy morforóżnorodności

W ramach analiz georóżnorodności należy wyznaczyć wskaźniki morforóżnorodności wyszczególnione w Tab. 2. Wyniki należy zamieścić w klasie wybranej siatki analitycznej. Należy dokonać bonitacji punktowej.

Podczas klasyfikacji bonitacyjnej na kartogramach należy konsekwentnie używać jednej metody np. równych przedziałów. Ocenę różnorodności cząstkowych sprowadzamy do pięciu stopni: 1 – różnorodności brak; 2 – różnorodność mała; 3 – różnorodność średnia; 4 – różnorodność duża; 5 – różnorodność bardzo duża. Różnorodności cząstkowe poszczególnych elementów krajobrazu w kolejnym etapie analizy będą podlegały sumowaniu. W końcowym etapie badań posłużą do oceny morforóżnorodności.

Tab. 2. Kryteria geologiczne analizy georóżnorodności

Cel oceny	Element krajobrazu	Cecha krajobrazu	Kryterium oceny	Symbol
-----------	--------------------	------------------	-----------------	--------

morforóżnorodność	rzeźba terenu	hipsometria	Standaryzowane odchylenie standardowe <i>wysokości</i>	$Altitude_{SD}$ [-]
		ekspozycja stoków	Zmodyfikowane, standaryzowane kątowe odchylenie standardowe ekspozycji stoków	$Aspect_{SDcm}$ [-]
		nachylenia stoków	Standaryzowane odchylenie standardowe nachyleń stoków	$Slope_{SD}$ [-]
		krzywizna profilu	Standaryzowane odchylenie standardowe krzywizny profilu	$CurvPlan_{SD}$ [-]
		Krzywizna poziomic	Standaryzowane odchylenie standardowe krzywizny poziomic	$CurvVert_{SD}$ [-]
		Lokalna deniwelacja	Standaryzowane odchylenie standardowe indeksu TPI80	$TPI_{SD}$ [-]

Jesteśmy teraz gotowi aby przejść do etapu oceny kryteriów cząstkowych analizy morforóżnorodności.

## Bibliografia

- Arabameri, A., Karimi-Sangchini, E., Pal, S. C., Saha, A., Chowdhuri, I., Lee, S., & Tien Bui, D. (2020). Novel Credal Decision Tree-Based Ensemble Approaches for Predicting the Landslide Susceptibility. *Remote Sensing*, 12(20), 3389. <https://doi.org/10.3390/rs12203389>
- Bartuś, T. (2020). *Struktura i różnorodność abiotycznych komponentów krajobrazu w ocenie i delimitacji obszarów chronionych na przykładzie Ojcowskiego Parku Narodowego i jego otoczenia*. Wydawnictwa AGH. <https://open.icm.edu.pl/bitstreams/0207012c-2c1f-410b-aa9f-b75bde9eaade/download>
- Bartuś, T., & Mastej, W. (2023). Morphodiversity as a Tool in Geoconservation: A Case Study in a Mountain Area (Pieniny Mts, Poland). *Sustainability*, 15(14), 11357. <https://doi.org/10.3390/SU151411357>
- Bartuś, T., & Mastej, W. (2025). HOW to use continuous variables in geodiversity assessments – RASTER continuous morphodiversity model. *Environmental Modelling & Software*, 193(0), 106597. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106597>
- Bennie, J., Hill, M. O., Baxter, R., & Huntley, B. (2006). Influence of slope and aspect on long-term vegetation change in British chalk grasslands. *Journal of Ecology*, 94(2), 355–368. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01104.x>
- Błaszczczyński, J. S. (1997). Landform characterization with Geographic Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(2), 183–191. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1997journal/feb/1997\\_feb\\_183-191.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1997journal/feb/1997_feb_183-191.pdf)
- Blyth, E. M., Finch, J., Robinson, M., & Rosier, P. (2004). Can soil moisture be mapped onto the terrain. *Hydrology & Earth System Sciences*, 8(5), 923–930.
- Boligłowa, E., & Znój, K. (2003). Wpływ nachylenia stoku na zdrowotność i plonowanie owsa w siewie czystym i w mieszanym. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 229, 221–227.
- Burnett, B. N., Meyer, G. A., & McFadden, L. D. (2008). Aspect-related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F3). <https://doi.org/10.1029/2007JF000789>
- Burnett, M. R., August, P. V., Brown, J. H., & Killingbeck, K. T. (1998). The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity I. A Patch-Scale Perspective. *Con-*

- servation Biology*, 12(2), 363–370. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1998.96238.x>
- Chen, Y., Li, N., Chang, M., Zhao, B., Xing, F., Xiang, H., & Huang, Y. (2025). Spatial Heterogeneity of Dominant Controlling Factors for Seismic Landslide Susceptibility Zones: A Case Study of the Barkam Earthquake. *Transactions in GIS*, 29(6). <https://doi.org/10.1111/tgis.70116>
- Chen, Y., Li, N., Zhao, B., Xing, F., & Xiang, H. (2024). Comparison of informative modelling and machine learning methods in landslide vulnerability evaluation – a case study of Wenchuan County, China. *Geocarto International*, 39(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2361714>
- Chowdhuri, I., Pal, S. C., Chakraborty, R., Malik, S., Das, B., & Roy, P. (2021). Torrential rainfall-induced landslide susceptibility assessment using machine learning and statistical methods of eastern Himalaya. *Natural Hazards*, 107(1), 697–722. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04601-3>
- Davis, F. W., & Goetz, S. (1990). Modeling vegetation pattern using digital terrain data. *Landscape Ecology*, 4(1), 69–80.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275–370.
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Jenks, G. F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. W *International Yearbook of Cartography*, 7 (s. 186–190). C. Vertelsmans Verlag.
- Jenness, J. (2006). *Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*. Jenness Enterprises. <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>
- Kicińska, B., Olszewski, K., & Żmudzka, E. (2001). Uwagi o wykorzystaniu klasyfikacji J. Paszyńskiego do kartowania topoklimatycznego (z doświadczeń Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego). W M. Kuchcik (Red.), *Współczesne badania topoklimatyczne. Dokumentacja geograficzna*, 23 (s. 143–151). Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania.
- Klimaszewski, M. (1963). *Geomorfologia ogólna*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

- Kot, R. (2006). *Georóżnorodność – problem jej oceny i zastosowania w ochronie i kształtowaniu środowiska na przykładzie fordońskiego odcinka doliny dolnej Wisły i jej otoczenia*. Towarzystwo Naukowe w Toruniu, Uniwersytet Mikołaja Kopernika.
- Mastej, W., & Bartuś, T. (2024). Supervised classification of morphodiversity using artificial neural networks on the example of the Pieniny Mts (Poland). *CATENA*, 242, 108086. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108086>
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Paszyński, J. (1980). Metody sporządzania map topoklimatycznych. W M. Kluge (Red.), *Metody opracowań topoklimatycznych. Dokumentacja Geograficzna*, 3 (s. 13–28). Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN.
- Paszyński, J. (2004). Wymiana energii na powierzchni czynnej jako podstawa klasyfikacji topoklimatycznej. *Acta Agrophysica*, 3(2), 351–358.
- Paszyński, J., Miara, K., & Skoczek, J. (1999). Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego. W *Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego. Dokumentacja Geograficzna*, 14. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN.
- Rech, J. A., Reeves, R. W., & Hendricks, D. M. (2001). The influence of slope aspect on soil weathering processes in the Springerville volcanic field, Arizona. *CATENA*, 43(1), 49–62. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00118-1)
- Sahana, M., Pham, B. T., Shukla, M., Costache, R., Thu, D. X., Chakraborty, R., Satyam, N., Nguyen, H. D., Phong, T. Van, Le, H. Van, Pal, S. C., Areendran, G., Imdad, K., & Prakash, I. (2022). Rainfall induced landslide susceptibility mapping using novel hybrid soft computing methods based on multi-layer perceptron neural network classifier. *Geocarto International*, 37(10), 2747–2771. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1837262>
- Sahrane, R., Bounab, A., Obda, I., Obda, O., El Hamdouni, R., & EL Kharim, Y. (2025). Assessing the Reliability of Landslides Susceptibility Models with Limited Data: Impact of Geomorphological Diversity and Technique Selection on Model Performance in Taounate Province, Northern Morocco. *Earth Systems and Environment*, 9(1), 421–445. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00455-4>



- Schmidt, J., & Dikau, R. (1999). Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models – semantics, methods, future needs. W R. Dikau & H. Saurer (Red.), *GIS for Earth Surface Systems* (s. 154–173). Gebrueder Borntraeger.
- Stage, A. R. (1976). Notes: An Expression for the Effect of Aspect, Slope, and Habitat Type on Tree Growth. *Forest Science*, 22(4), 457–460.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
- Urbański, J. (2012). *GIS w badaniach przyrodniczych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego,.
- Weiss, A. D. (2001). Topographic Position and Landforms Analysis. *ESRI User Conference*. [http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc\\_18x22.pdf](http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf)
- Wieczorek, M., & Żyszkowska, W. (2011). Geomorfometria – parametry morfometryczne w charakterystyce rzeźby terenu. *Polski Przegląd Kartograficzny*, 43(2), 130–144.
- Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). Digital Terrain Analysis. W J. P. Wilson & J. C. Gallant (Red.), *Terrain Analysis: Principles and Applications* (s. 1–27). John Wiley & Sons, Inc.  
[https://www.researchgate.net/publication/259011201\\_Digital\\_Terrain\\_Analysis\\_in\\_Terrain\\_Analysis\\_Principles\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/259011201_Digital_Terrain_Analysis_in_Terrain_Analysis_Principles_and_Applications)
- Witek, T. (1973). *Mapy glebowo-rolnicze oraz kierunki ich wykorzystania*. Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, seria P(18).