



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE  
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW

# Numeryczne modele terenu

Zastosowanie GIS w badaniach przyrodniczych

Tomasz Bartuś  
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska  
Katedra Geologii Ogólnej i Geoturystyki

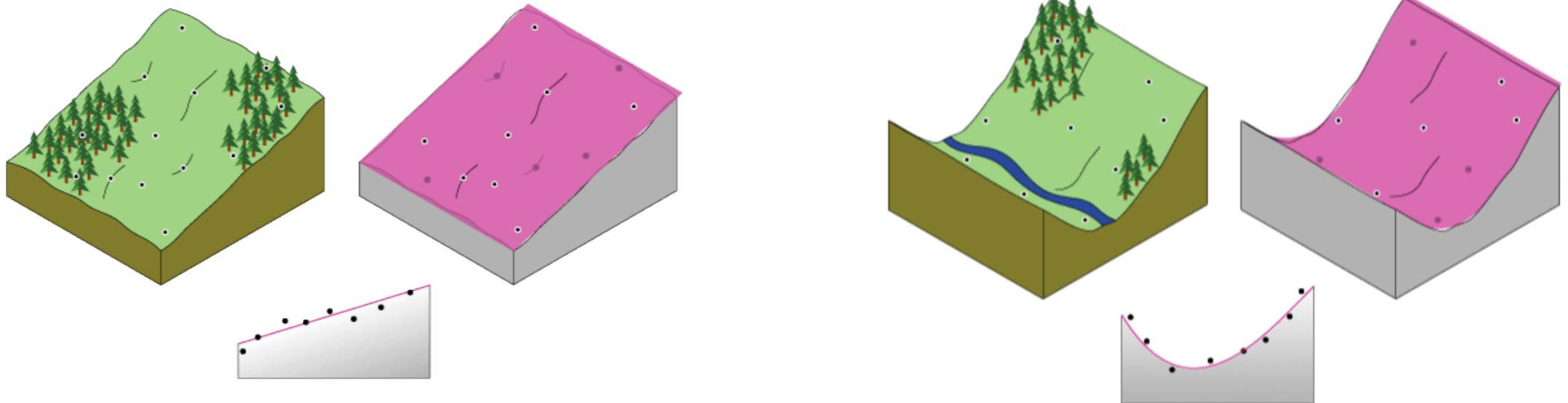
## Modelowanie powierzchni ciągłych

Jednym z typowych zagadnień w analizach przyrodniczych jest przedstawienie zjawisk o charakterze ciągłym jak np. powierzchnia terenu, rozkład średnich temperatur, zawartość w glebie metali ciężkich itp.

# Funkcje przestrzenne

W ogólnym przypadku kiedy zjawisko możemy przedstawić funkcją w postaci:

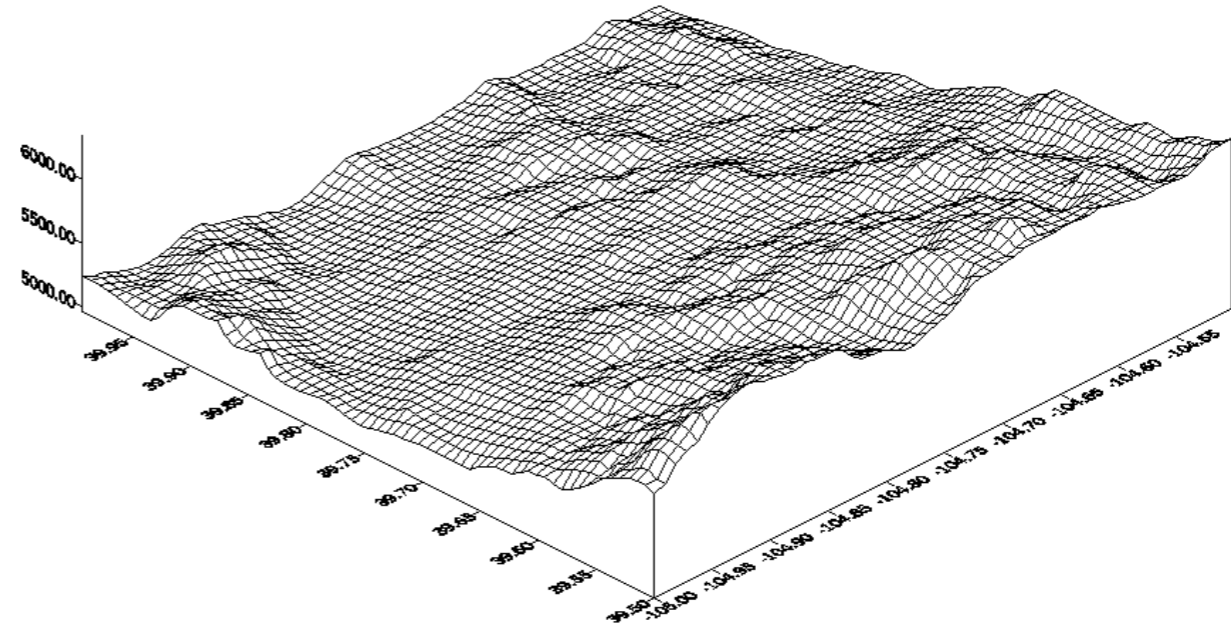
$$z = f(x, y)$$



zagadnienie nie stanowi żadnych trudności. Dzięki znanej funkcji, w każdym punkcie  $P(x,y)$  możemy określić wartość danego zjawiska.

## Funkcje przestrzenne

W sytuacji kiedy modelowane zjawiska, ze względu na znaczną ich komplikację (np. powierzchnia terenu), nie można określić za pomocą nawet skomplikowanej funkcji,

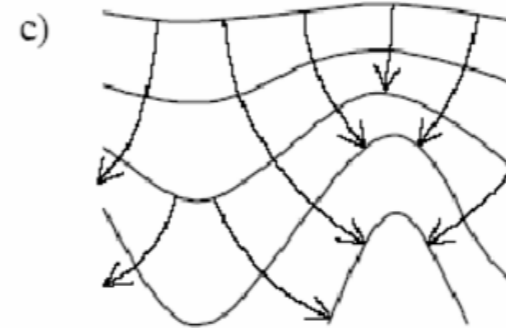
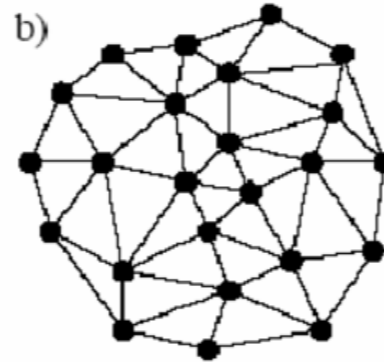
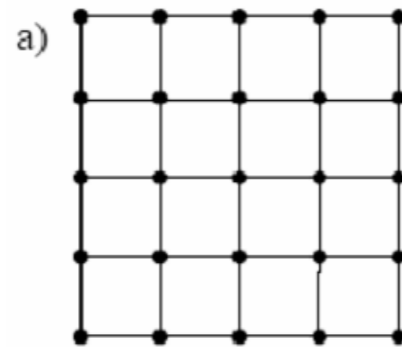


stosujemy inne rozwiązania, oparte na wartościach zjawiska zarejestrowanych w wybranych punktach pomiarowych.

## Metody przestrzennej reprezentacji zjawisk

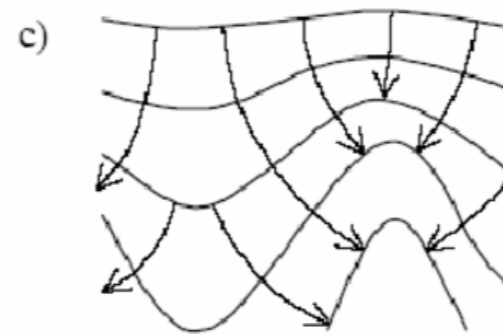
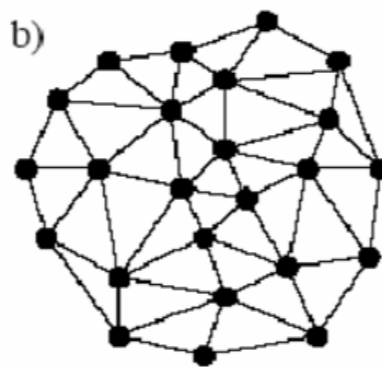
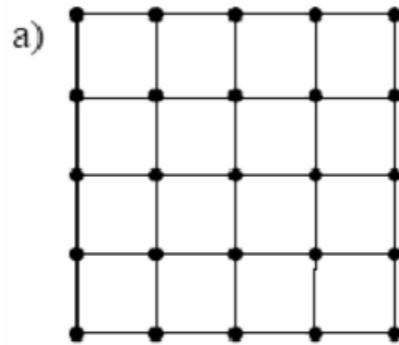
Do najbardziej typowych metod reprezentacji danych przestrzennych ciągłych należą:

- a) Regularna sieć punktów (ang. *grid*),
- b) Sieć nieregularnych trójkątów **TIN** (ang. *Triangular Irregular Network*),
- c) Model poziomicowy (ang. DGL – *Digital Line Graph*) - izolinie.



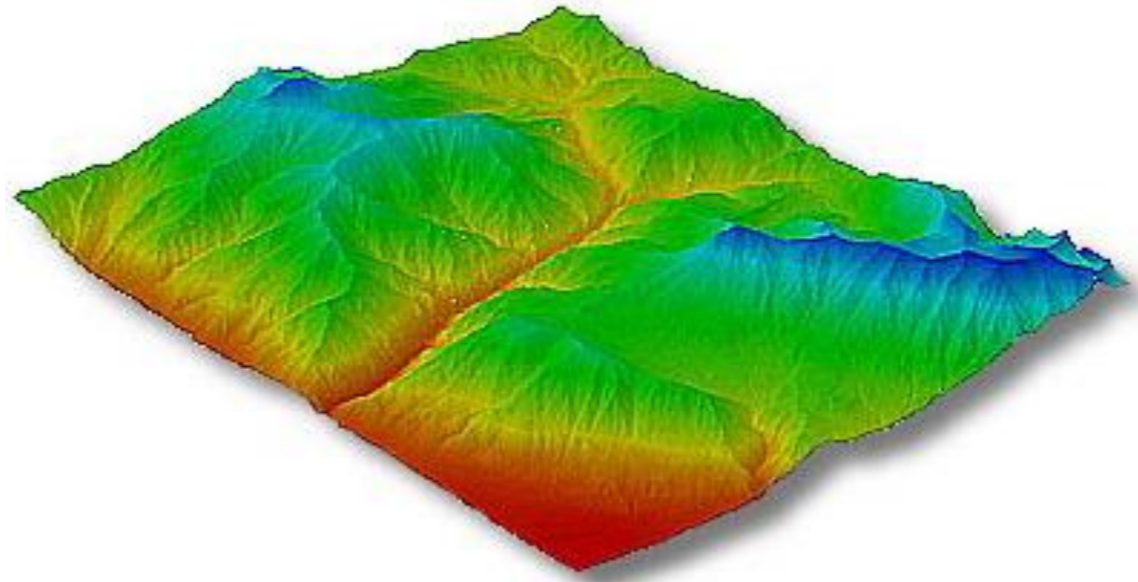
## Metody przestrzennej reprezentacji zjawisk

Każda z wymienionych metod przedstawia daną powierzchnię ciągłą (zjawisko) w sposób dyskretny (skokowy). Dlatego z każdą z nich wiążą się inne algorytmy interpolacyjne umożliwiające określenie wartości zjawiska w dowolnie wybranym punkcie.



## Numeryczne modele terenu

Numeryczne modele terenu (NMT) są cyfrowymi „obrazami” powierzchni Ziemi, które w sposób dyskretny przechowują informację o wysokości/głębokości przedstawianej powierzchni.



## Numeryczne modele terenu

W polskiej literaturze, pod nazwą NMT ukryte są dwa anglojęzyczne terminy:

**Digital Elevation Model** (DEM) – cyfrowy model terenu. W literaturze polskiej odpowiada mu cyfrowy model wysokościowy (CMW lub NMT).

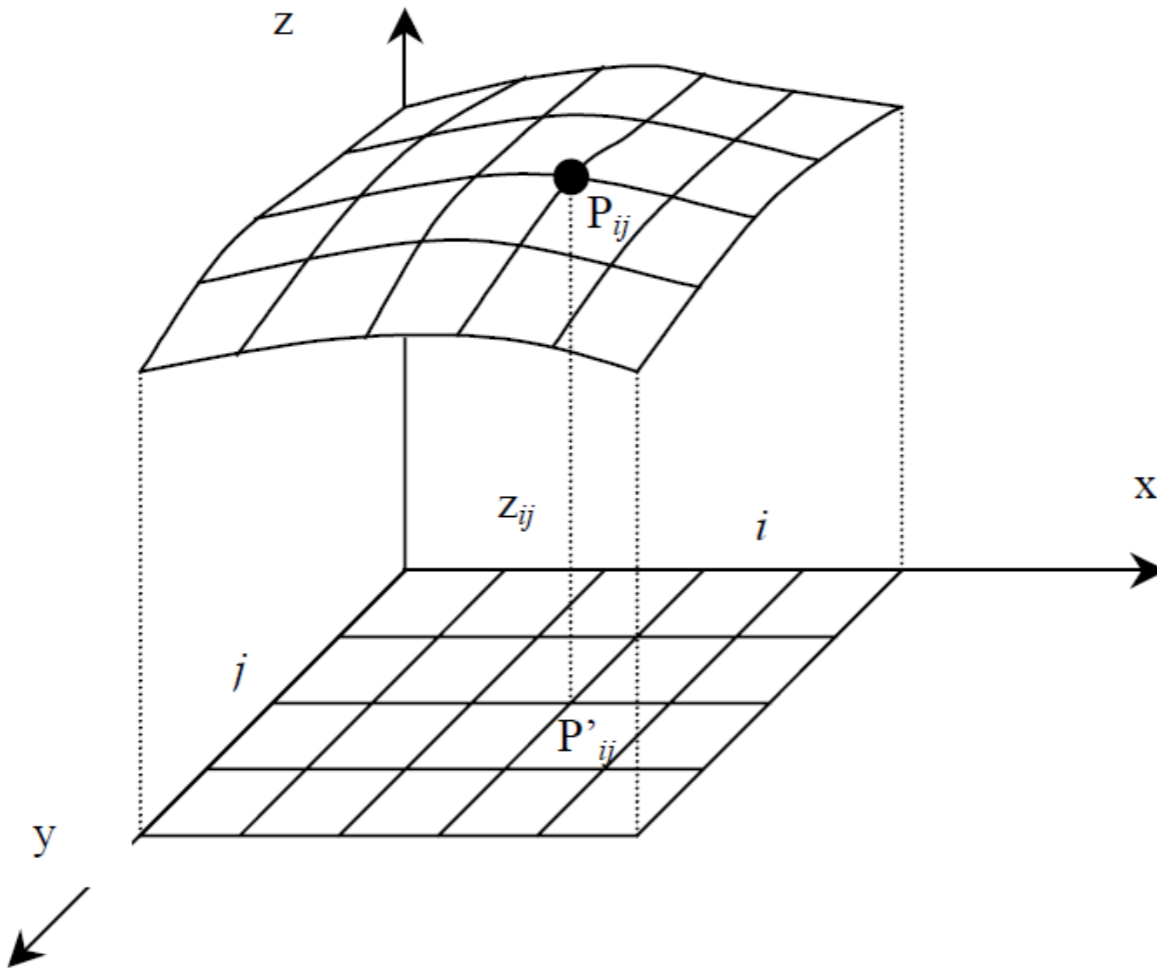
**Digital Terrain Model** (DTM) – cyfrowy model terenu, który zawiera informacje o sposobie użytkowania Ziemi (np. zabudowa, lasy). W literaturze polskiej odpowiada mu tzw. numeryczny model pokrycia teren (NMPT).

## Rodzaje NMT

W praktyce podstawowe znaczenie mają dwa modele: regularny w postaci siatki kwadratów oraz w postaci nieregularnej siatki trójkątów (TIN).

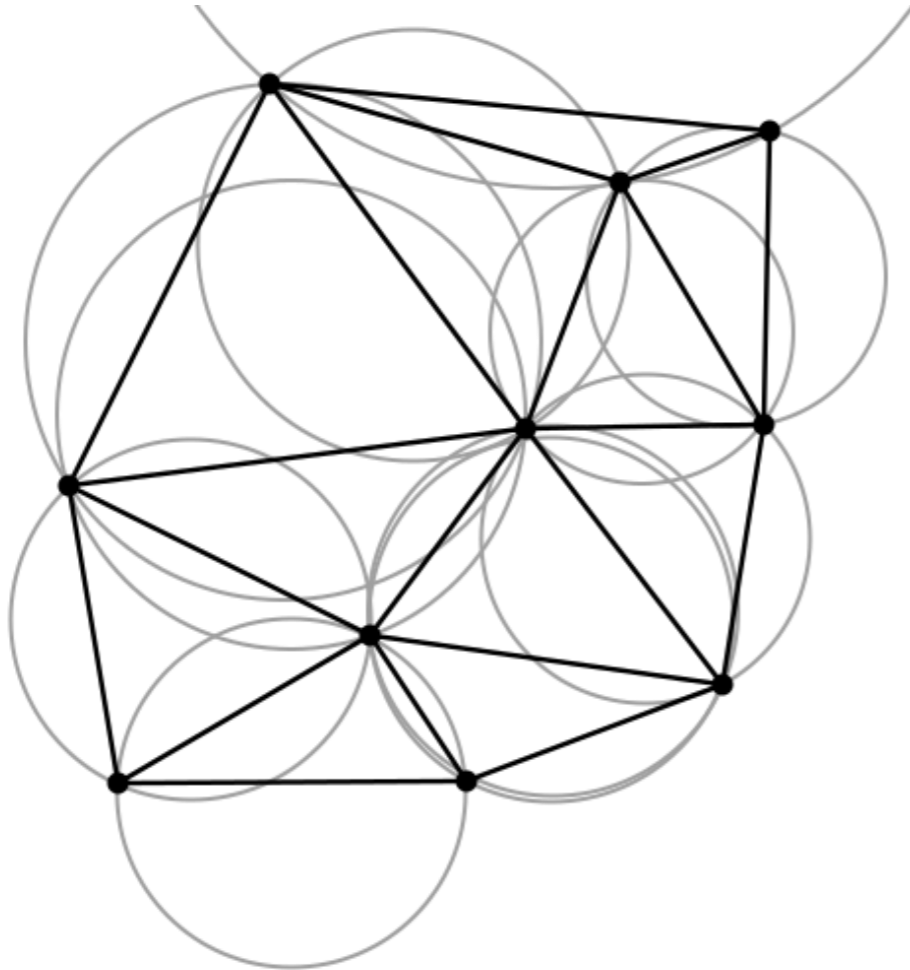
Każdy z wymienionych modeli posiada swoje zalety i wady.

## Model grid



- Najczęściej stosowany,
- zazwyczaj konwertowany do postaci rastra,
- łatwy do przetwarzania,
- zabiera bardzo mało pamięci,
- algorytmy używane do modelowania terenu są stosunkowo proste,
- im gęstsza siatka, tym dokładniejszy model.
- dane siatki najczęściej pochodzą z wcześniejszej interpolacji

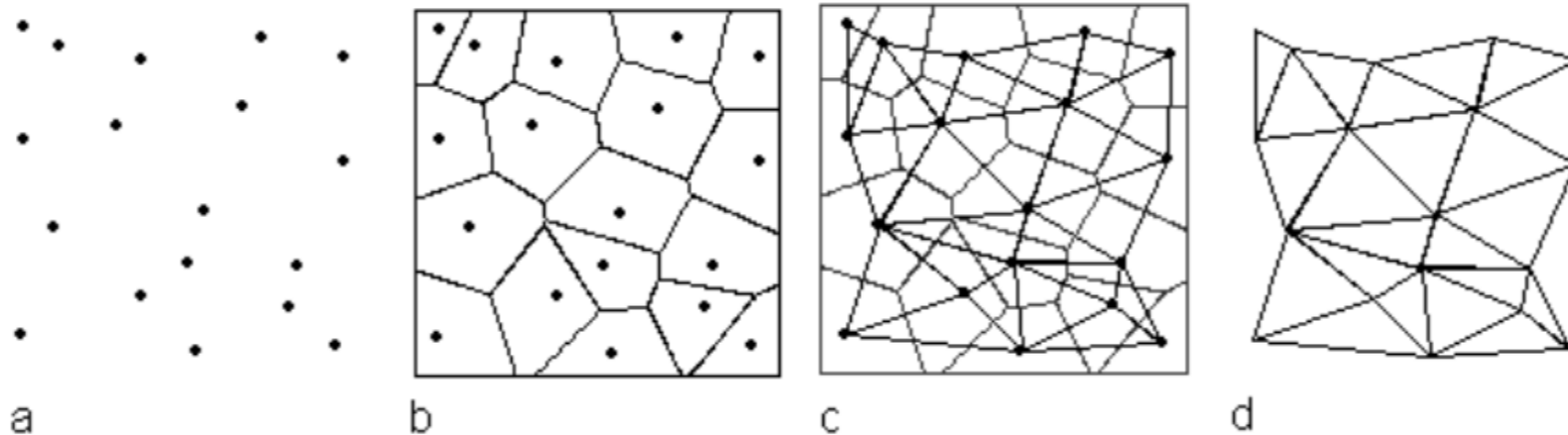
## Model TIN



Model TIN tworzy nieregularna sieć trójkątów z wierzchołkami w punktach o znanej wysokości. Konstrukcja sieci odbywa się z zastosowaniem **triangulacji Delanuaya**. Trójkąty tworzone są w ten sposób aby żaden z punktów nie należących do niego nie był położony wewnątrz okręgu opisanego na trójkącie.

## Etapy triangulacji Delanuaya

- a) Mamy punkty z ze znanymi wartościami wysokości,
- b) punkty są otaczane poligonami Thiessen'a (Voronoi),
- c) punkty dla których wieloboki Thiessen'a posiadają wspólne krawędzie są ze sobą łączone,
- d) w rezultacie powstaje siatka trójkątów.



## Jakość NMT

- **Rozdzielczość** - określa stopień szczegółowości modelu. Im rozdzielczość jest większa, tym bliższe sobie punkty reprezentowane będą w modelu jako odrębne obiekty
- **Dokładność** – stopień zgodności z jakim położenie obiektu w modelu odpowiada rzeczywistemu położeniu obiektu w przestrzeni geograficznej

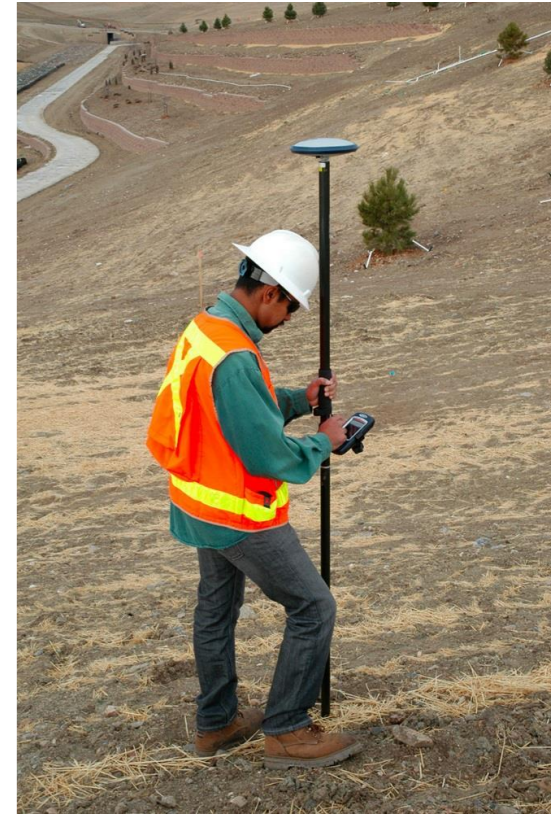
## Źródła danych NMT - pomiary terenowe

- tradycyjne pomiary geodezyjne
- pomiary GPS w trybie referencyjnym
- naziemny skanning laserowy

**Zalety** - bardzo duża dokładność i swobodny dobór rozdzielczości

**Wady** - czasochłonność i wysoki koszt pomiaru

**Zastosowanie** - niewielkie obszary dla których istotna jest wysoka dokładność danych np.: ocena dynamiki erozji gleb, pomiary niewielkich form terenu, modele budynków itp.



# Źródła danych NMT - digitalizacja mat. kartograficznych

## Zalety

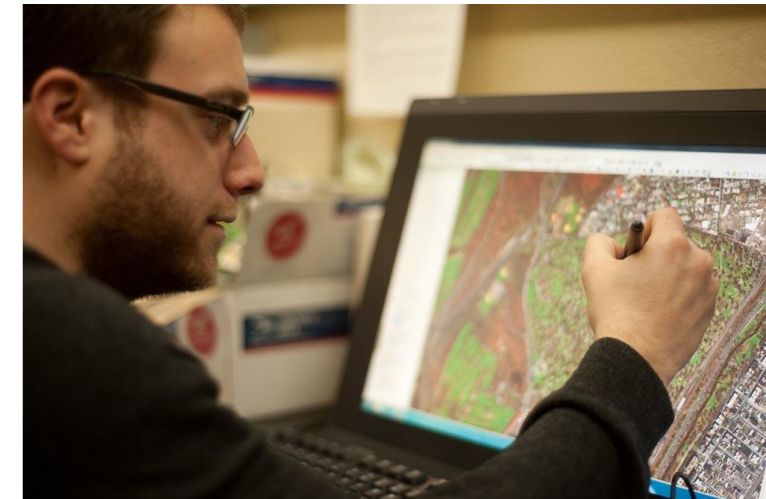
- dostępność materiałów źródłowych
- pokrycie całego kraju,
- wysoka dokładność,
- najlepszy stosunek ceny do dokładności, prostota tworzenia,
- otrzymujemy model rzeźby terenu (bez budynków, lasów itp.)

## Wady

- zróżnicowana jakość materiałów źr.
- duża pracochłonność

## Zastosowanie

- średniopowierzchniowe obszary wymagające wysokiej dokładności



# Źródła danych NMT - fotogrametria analogowa i cyfrowa

## Zalety

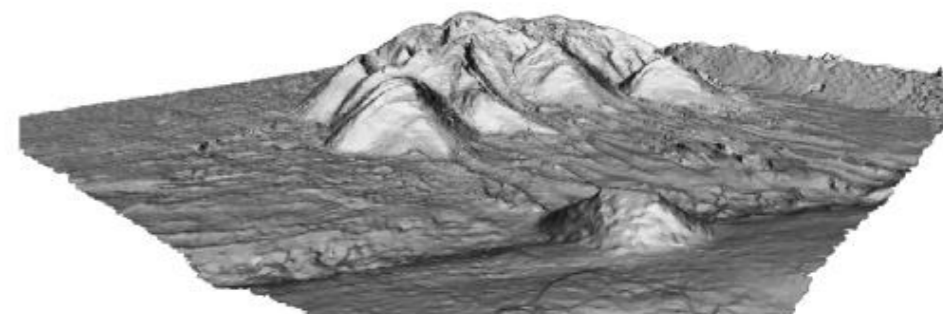
- wysoka dokładność,
- wysoka efektywność,
- powtarzalność

## Wady

- wysoka cena,
- brak penetracji pokrywy roślinnej,
- Zależność od warunków pogodowych,
- drogi sprzęt i oprogramowanie

## Zastosowanie

- tam gdzie liczy się dokładność i powtarzalność pomiaru np.: rejestracja zmian rzeźby kopalń odkrywkowych



# Źródła danych NMT - LIDAR (light detection and ranging)

## Zalety

- wysoka dokładność,
- krótki cykl produkcji,
- niezależność od warunków pogodowych,
- penetracja pokrywy roślinnej

## Wady

- bardzo wysoki koszt, wymagany specj. sprzęt

## Zastosowanie

- tam gdzie wymagana jest wysoka dokładność i szybkość uzyskania modelu np. ocena skutków zdarzeń katastrofalnych



## Źródła danych NMT - obrazy radarowe

### Zalety

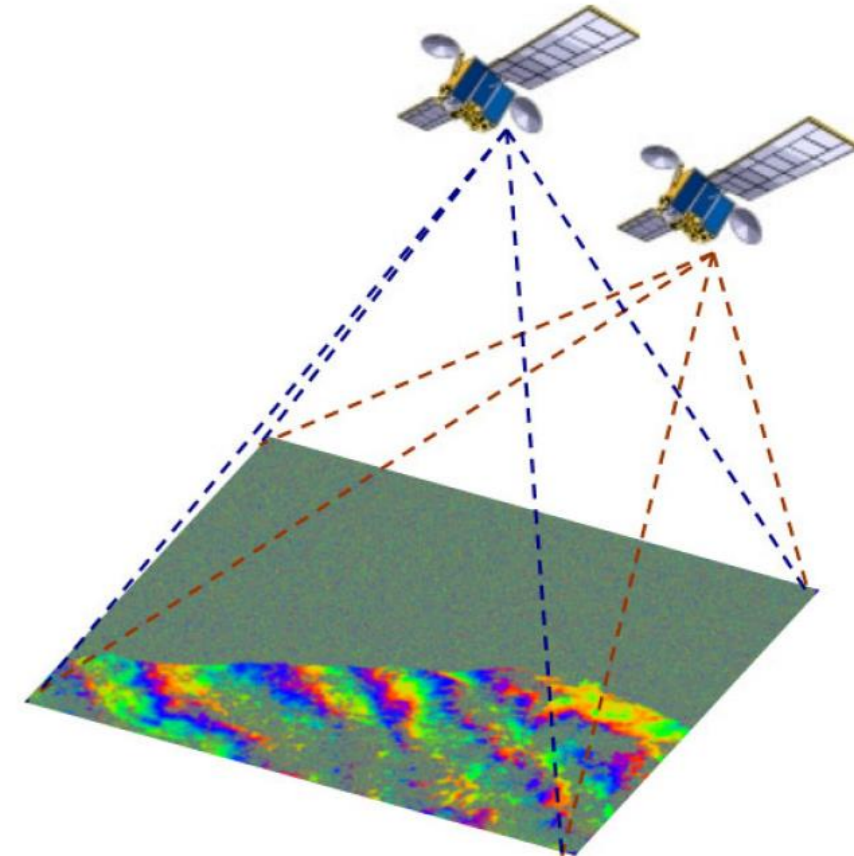
- niezależność od warunków pogodowych,
- zdolność częściowej penetracji pokrycia terenu oraz wody

### Wady

- wysoki koszt,
- Zróżnicowana dokładność (samolot 1-5m, satelita 5-50m)

### Zastosowanie

- modelowanie terenów pokrytych bujną roślinnością, śniegiem, lodem,
- monitorowanie rozwoju linii brzegowych



## NMT ISOK



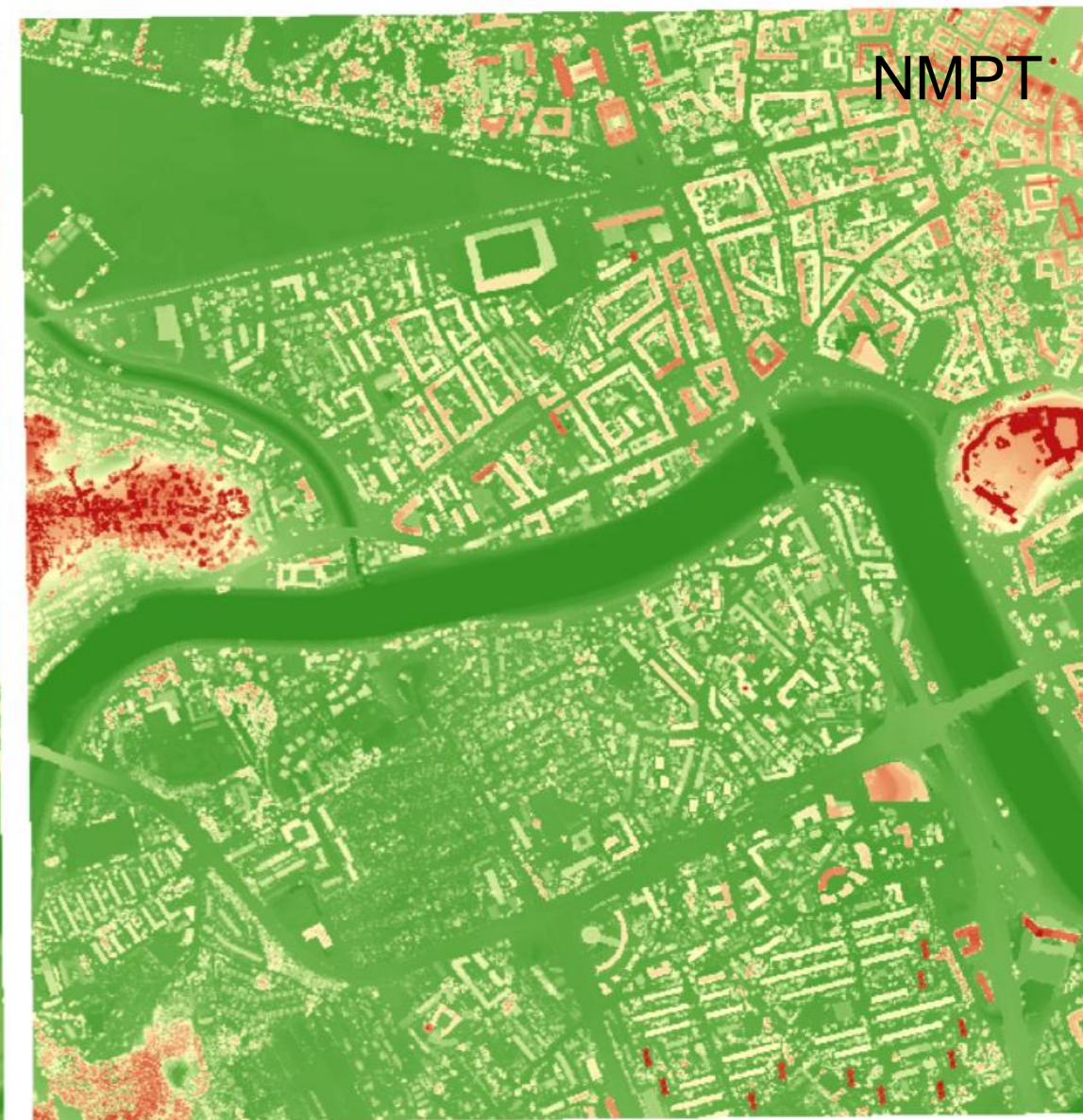
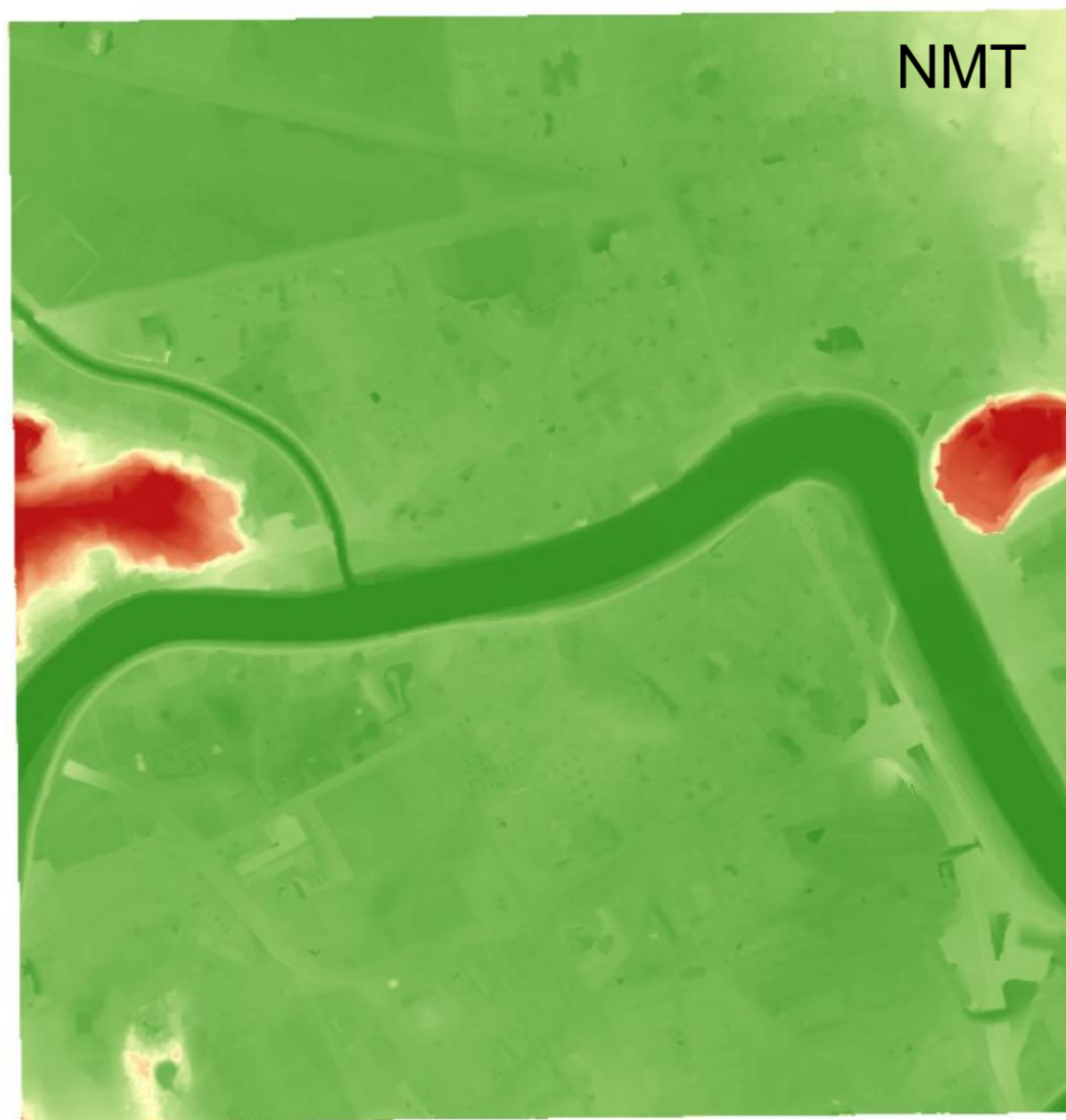
Podstawowym celem projektu jest stworzenie systemu dla poprawienia osłony społeczeństwa, gospodarki i środowiska.

Od połowy 2020 r. Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK) umożliwia bezpłatny i otwarty dostęp do usługi pobierania arkuszy:

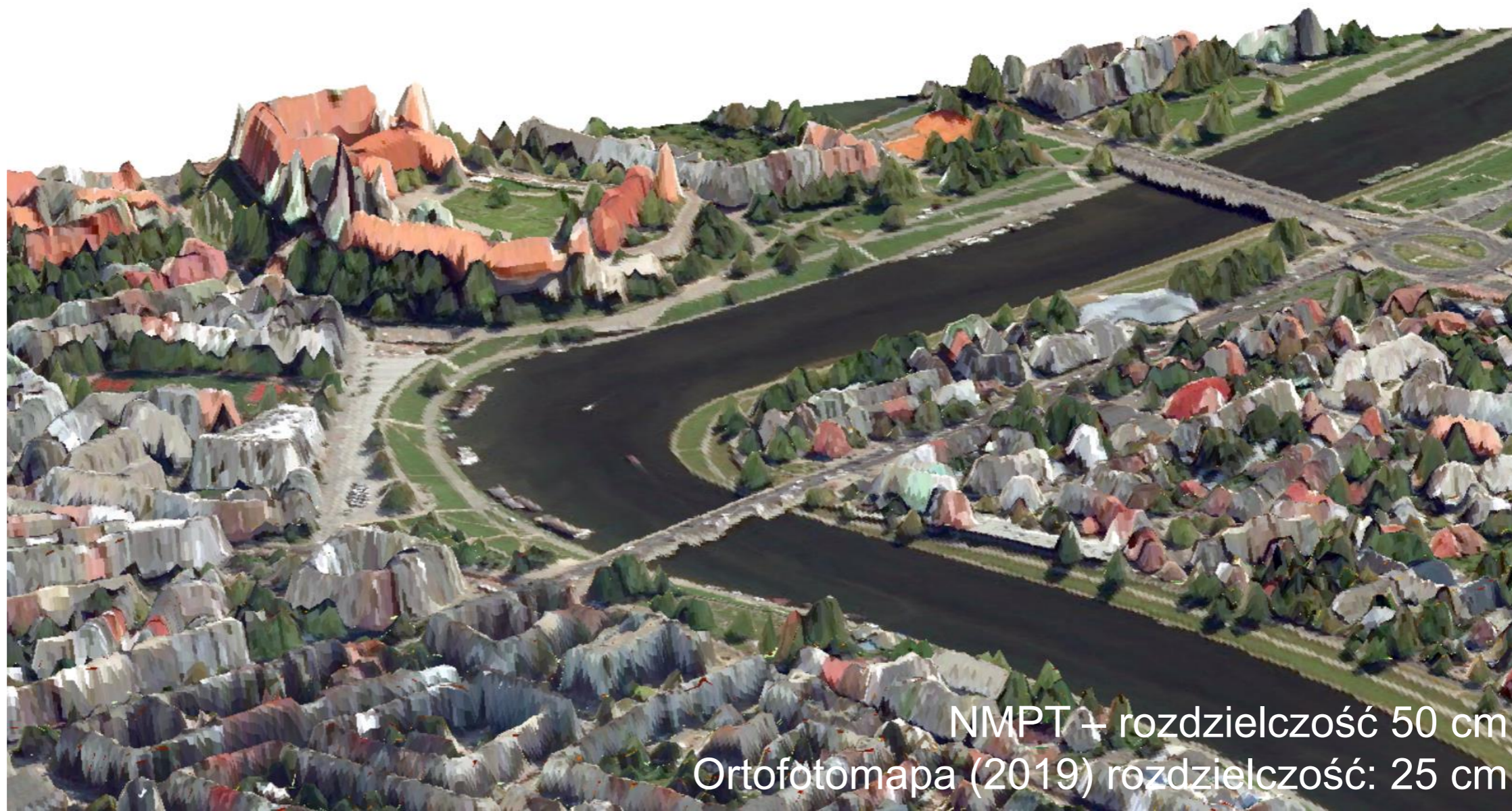
**Numerycznego Modelu Terenu (NMT)** - przechowuje wartości wysokości powierzchni terenu nad poziom morza.

**Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (NMPT)** - reprezentuje zarówno rzeźbę odkrytego terenu jak i wysokość obiektów, które się na nim znajdują takich jak: roślinność, budynki, elementy infrastruktury.

## NMT vs. NMPT

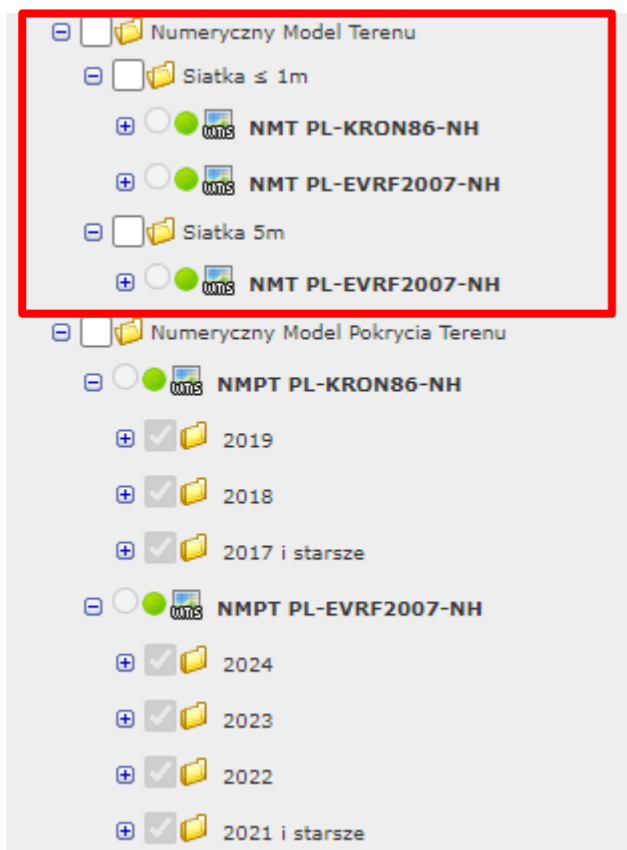


# NMPT



NMPT + rozdzielczość 50 cm  
Ortofotomapa (2019) rozdzielczość: 25 cm

## NMT ISOK - rozdzielczość



- **Rozdzielczość przestrzenna** zależy od rodzaju (NMT czy NMPT) oraz lokalizacji produktu (średnie i duże miasta czy inne obszary) i wynosi **1 m** (NMT, NMPT) lub **0,5 m** (NMPT), a średni błąd wysokości wynosi między 0,1 a 0,2 m.
- Dla niektórych obszarów Polski można pobrać NMT z rozdzielczością **5 m** i średnim błędem wysokości 0,5 m. Taki model zwykle wystarcza do ogólnej analizy ukształtowania terenu przy opracowywaniu większych obszarów (map w bardziej przeglądowych skalach). Do szczegółowej analizy warto stosować NMT z rozdzielczością 1 m.

## NMT ISOK – układy wysokościowe

Dane dostępne są w dwóch **układach wysokościowych**:

- **PL- KRON86-NH** - starszy (obowiązujący do 2019 r. włącznie; z poziomem odniesienia Morza Bałtyckiego w miejscowości Kronsztad k. Petersburga).
- **PL-EVRF2007-NH** – aktualnie obowiązujący w Polsce (od 2020 r.; z poziomem odniesienia Morza Północnego w Amsterdamie). Obligatoryjny od **31 grudnia 2023**.

Układy różnią się punktem 0. Wartości wysokości nad poziom morza nieznacznie różnią się pomiędzy układami.

**UWAGA!** Należy uważać przy łączeniu danych NMT i NMPT wytworzonych w różnych układach!

## NMT ISOK – formaty

Na Geoportalu Krajowym dane można pobrać w dwóch formatach:

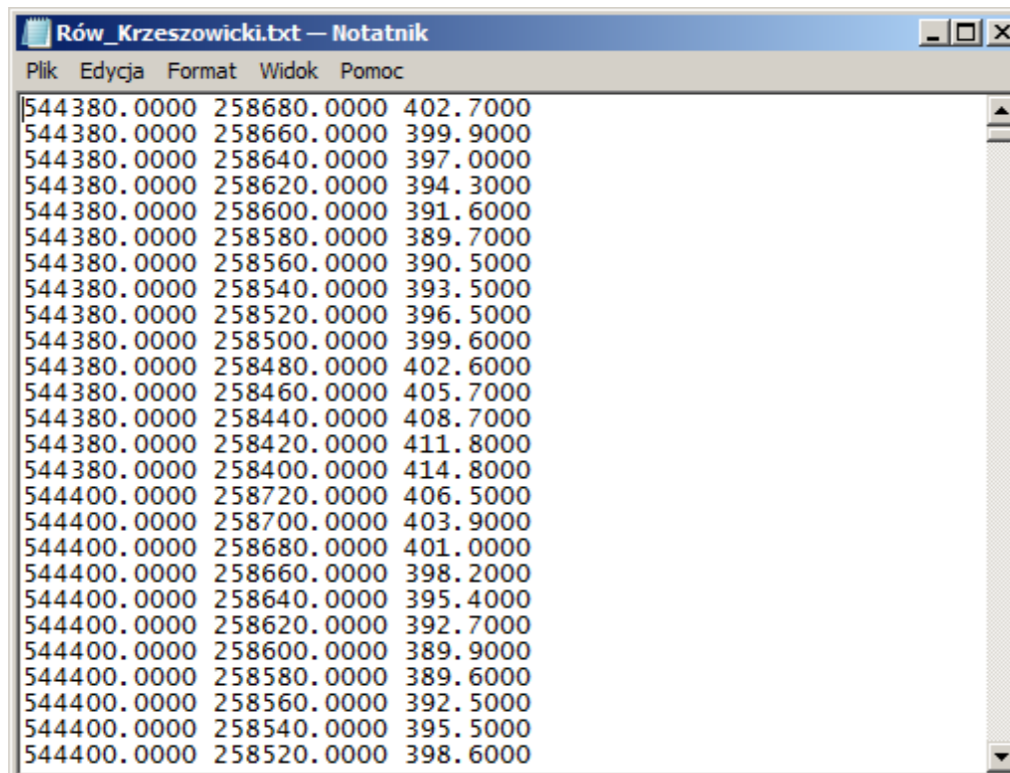
- ARC/INFO ASCII GRID – plik tekstowy z rozszerzeniem `.asc`, składa się z nagłówka opisującego właściwości rastra:

<code>ncols 2257</code>	liczbę kolumn
<code>nrows 2341</code>	liczbę wierszy
<code>xllcenter 557959.00</code>	współrzędna X początku układu rastra
<code>yllcenter 258125.00</code>	współrzędna Y początku układu rastra
<code>cellsize 1.00</code>	rozmiar piksela
<code>nodata_value -9999</code>	

oraz wykazu współrzędnych wysokości zapisanych wiersz po wierszu.

## NMT ISOK – formaty

ASCII XYZ GRID – plik tekstowy `.txt`; w kolejnych wierszach pliku zapisane są współrzędne X, Y, Z dla poszczególnych punktów siatki grid.

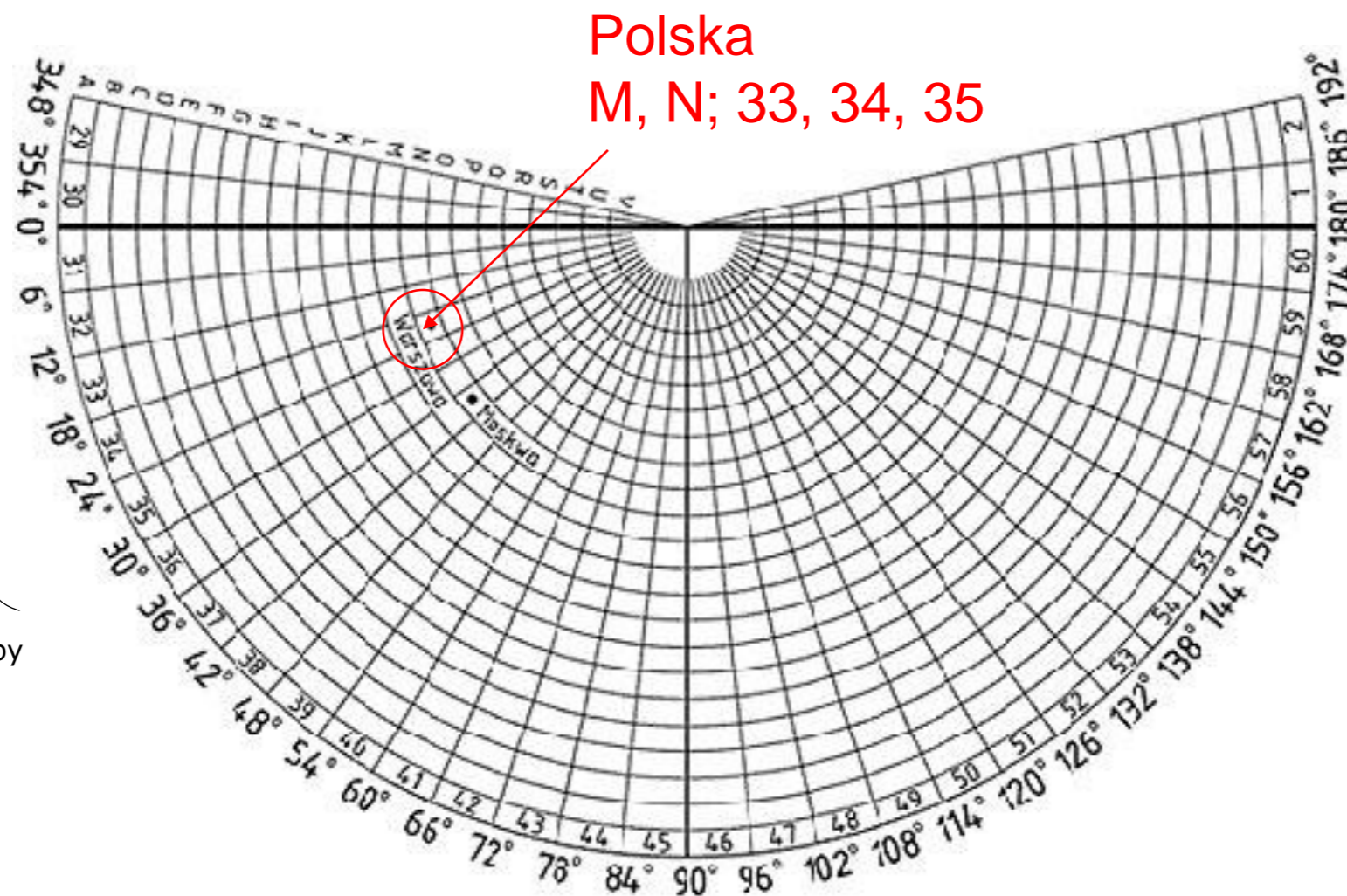


Rów\_Krzeszowski.txt — Notatnik

Plik	Edycja	Format	Widok	Pomoc
544380.0000	258680.0000	402.7000		
544380.0000	258660.0000	399.9000		
544380.0000	258640.0000	397.0000		
544380.0000	258620.0000	394.3000		
544380.0000	258600.0000	391.6000		
544380.0000	258580.0000	389.7000		
544380.0000	258560.0000	390.5000		
544380.0000	258540.0000	393.5000		
544380.0000	258520.0000	396.5000		
544380.0000	258500.0000	399.6000		
544380.0000	258480.0000	402.6000		
544380.0000	258460.0000	405.7000		
544380.0000	258440.0000	408.7000		
544380.0000	258420.0000	411.8000		
544380.0000	258400.0000	414.8000		
544400.0000	258720.0000	406.5000		
544400.0000	258700.0000	403.9000		
544400.0000	258680.0000	401.0000		
544400.0000	258660.0000	398.2000		
544400.0000	258640.0000	395.4000		
544400.0000	258620.0000	392.7000		
544400.0000	258600.0000	389.9000		
544400.0000	258580.0000	389.6000		
544400.0000	258560.0000	392.5000		
544400.0000	258540.0000	395.5000		
544400.0000	258520.0000	398.6000		

**UWAGA!** Plik w formacie `.txt` zajmuje więcej miejsca na dysku niż plik w formacie `.asc`.

## NMT ISOK – cięcie arkuszowe



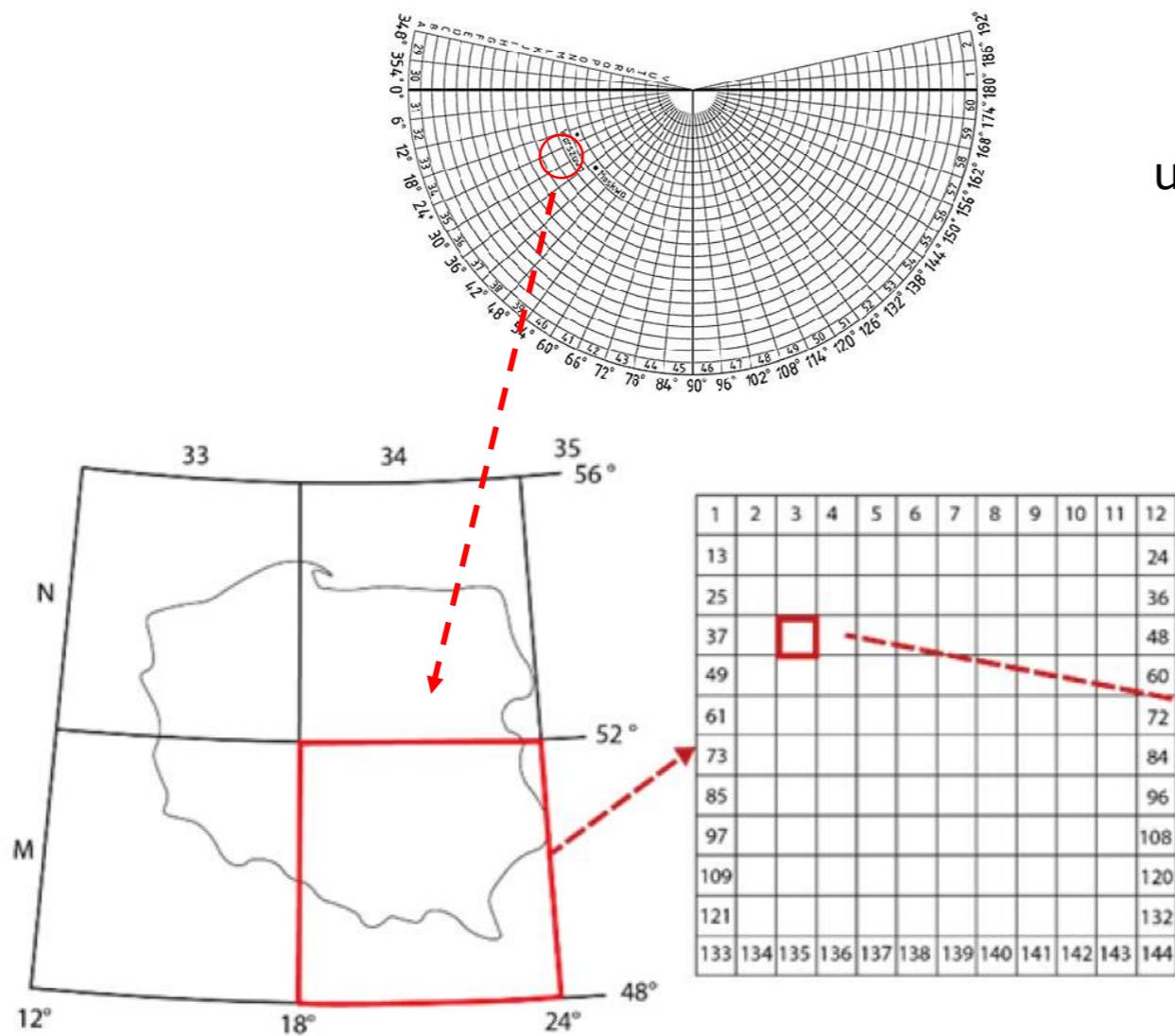
południkowe słupy  
o dł. 6°

przykładowe godło  
mapy w skali 1:1 000 000:

**M33**

podział międzynarodowej mapy świata  
na arkusze w skali 1:1 000 000

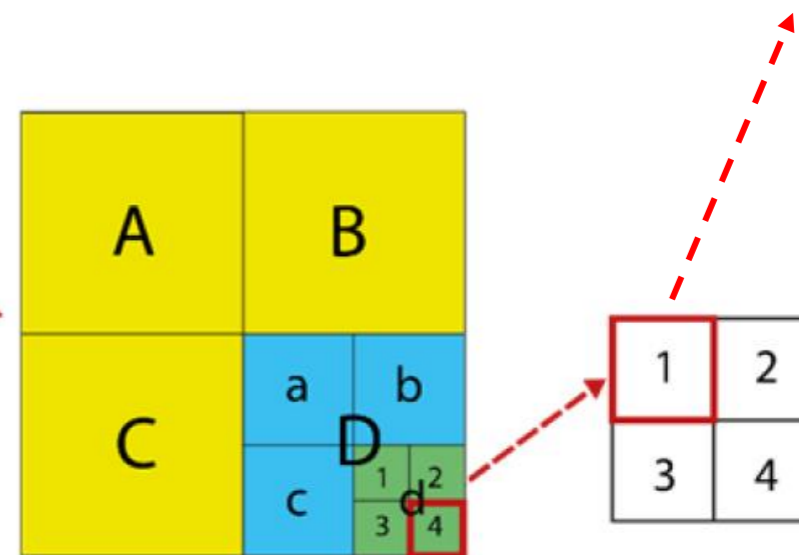
## NMT ISOK – cięcie arkuszowe



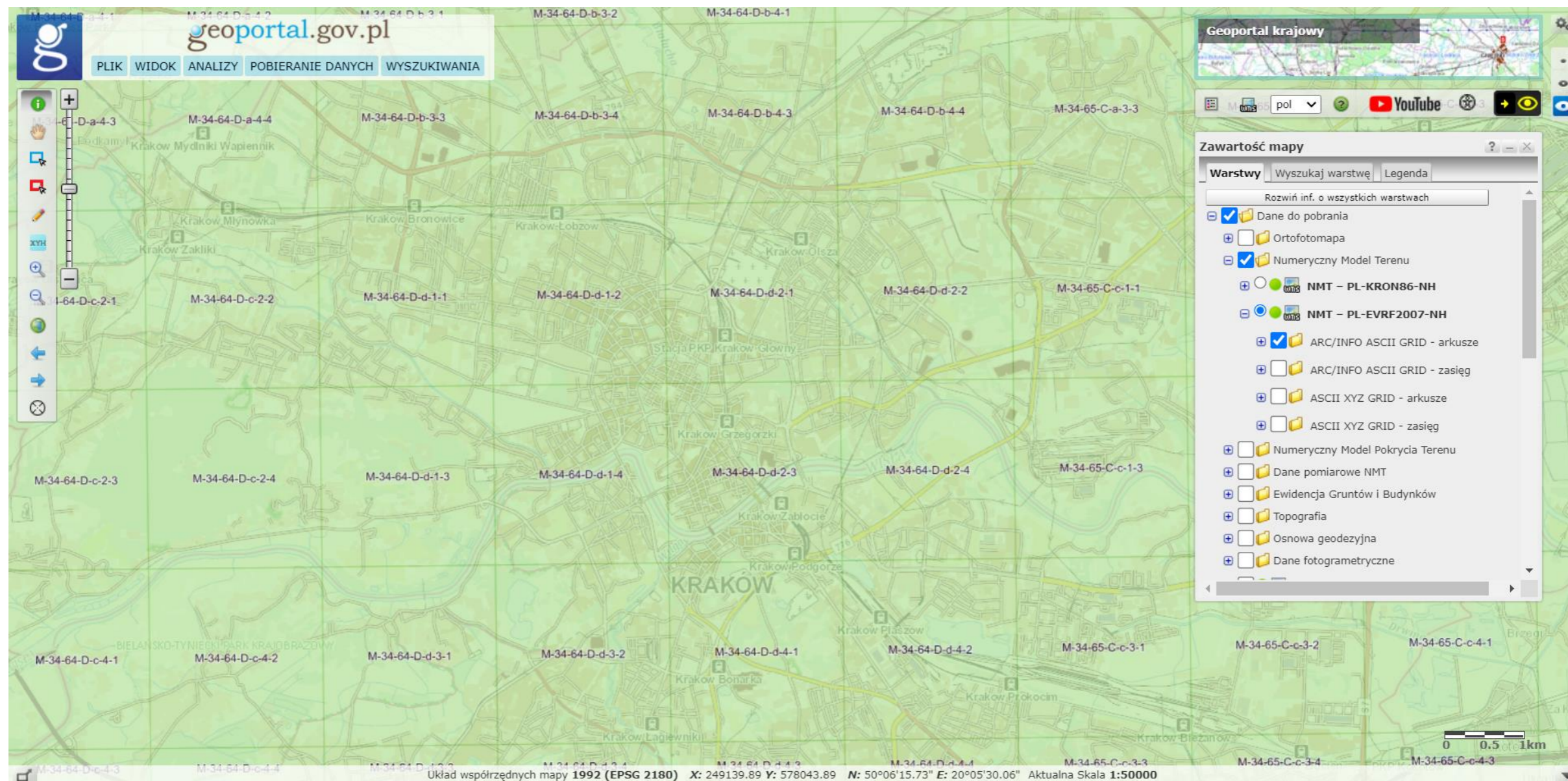
układ współrzędnych PUWG 1992 (EPSG 2180).

skala 1:5 000

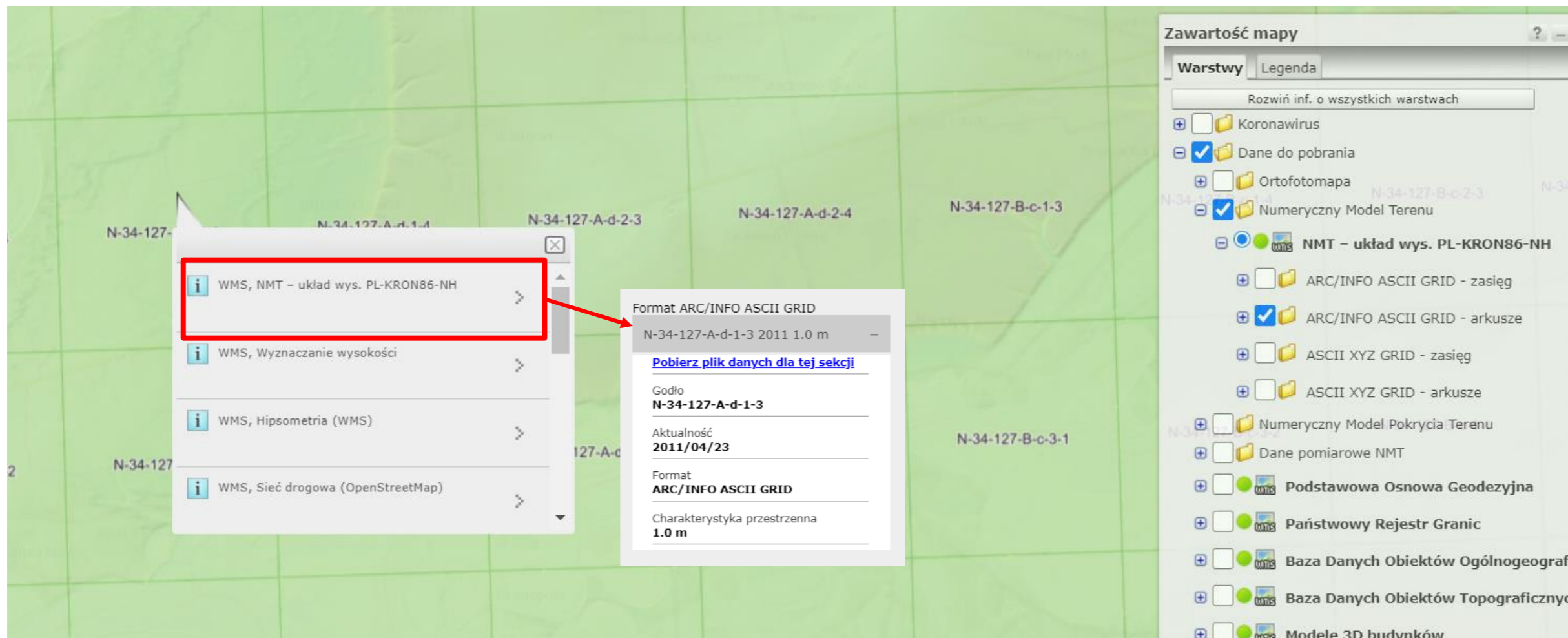
**M-34-39-D-d-4-1**



# NMT ISOK – cięcie arkuszowe



# NMT ISOK – cięcie arkuszowe



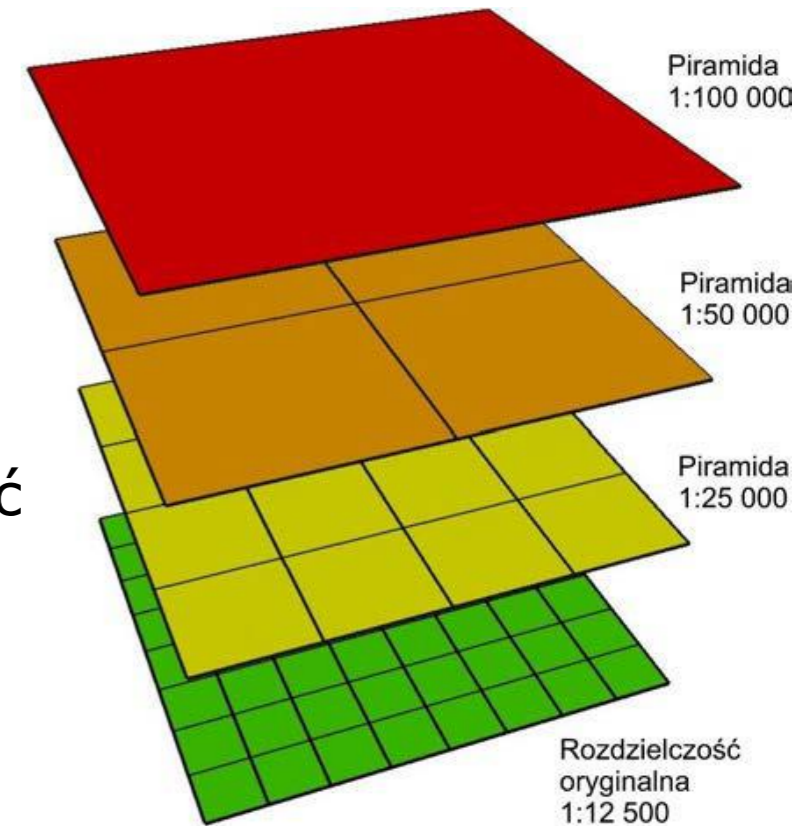
The screenshot displays a GIS application interface. The main map area shows a green grid overlay on a topographic map. Two pop-up windows are visible:

- Left Window (WMS Layers):** A list of WMS layers. The first item, "WMS, NMT – układ wys. PL-KRON86-NH", is highlighted with a red box. Other items include "WMS, Wyznaczanie wysokości", "WMS, Hipsometria (WMS)", and "WMS, Sieć drogowa (OpenStreetMap)".
- Right Window (Layer Details):** A window showing details for the selected layer. It includes the title "Format ARC/INFO ASCII GRID", the identifier "N-34-127-A-d-1-3 2011 1.0 m", a download link "Pobierz plik danych dla tej sekcji", the code "N-34-127-A-d-1-3", the date "2011/04/23", the format "ARC/INFO ASCII GRID", and the spatial characteristic "Charakterystyka przestrzenna 1.0 m".

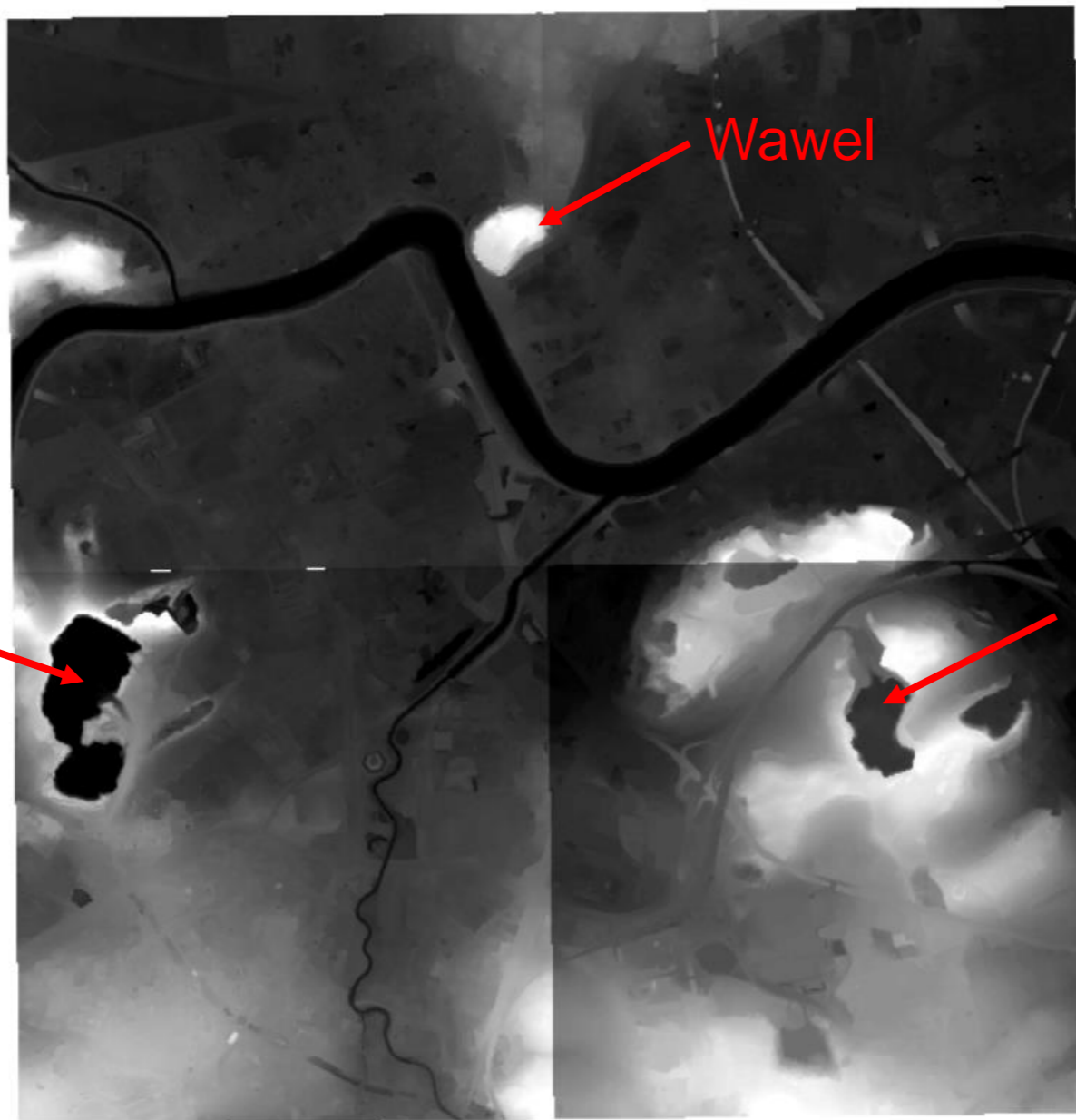
On the right side of the interface, there is a panel titled "Zawartość mapy" (Map Content) with tabs for "Warstwy" (Layers) and "Legenda" (Legend). The "Warstwy" tab is active, showing a list of layers with checkboxes and icons. The layers include "Koronawirus", "Dane do pobrania", "Ortofotomapa", "Numeryczny Model Terenu", "NMT – układ wys. PL-KRON86-NH", "ARC/INFO ASCII GRID - zasięg", "ARC/INFO ASCII GRID - arkusze", "ASCII XYZ GRID - zasięg", "ASCII XYZ GRID - arkusze", "Numeryczny Model Pokrycia Terenu", "Dane pomiarowe NMT", "Podstawowa Osnowa Geodezyjna", "Państwowy Rejestr Granic", "Baza Danych Obiektów Ogólnogeograficznych", "Baza Danych Obiektów Topograficznych", and "Modele 3D budynków".

## NMT ISOK – piramidy

Po dodaniu do aplikacji ArcGIS nowego rastrowego zbioru danych zostanie wyświetlony monit o zbudowanie piramid. Piramidy to widoki danych o zmniejszonej rozdzielczości w różnych skalach. Piramidy są przydatne, ponieważ zwiększają szybkość wyświetlania zbiorów danych rastrowych w rozdzielczości mniejszej niż ich pełna rozdzielczość. Zaleca się, aby zawsze budować piramidy dla dużych zbiorów danych rastrowych.

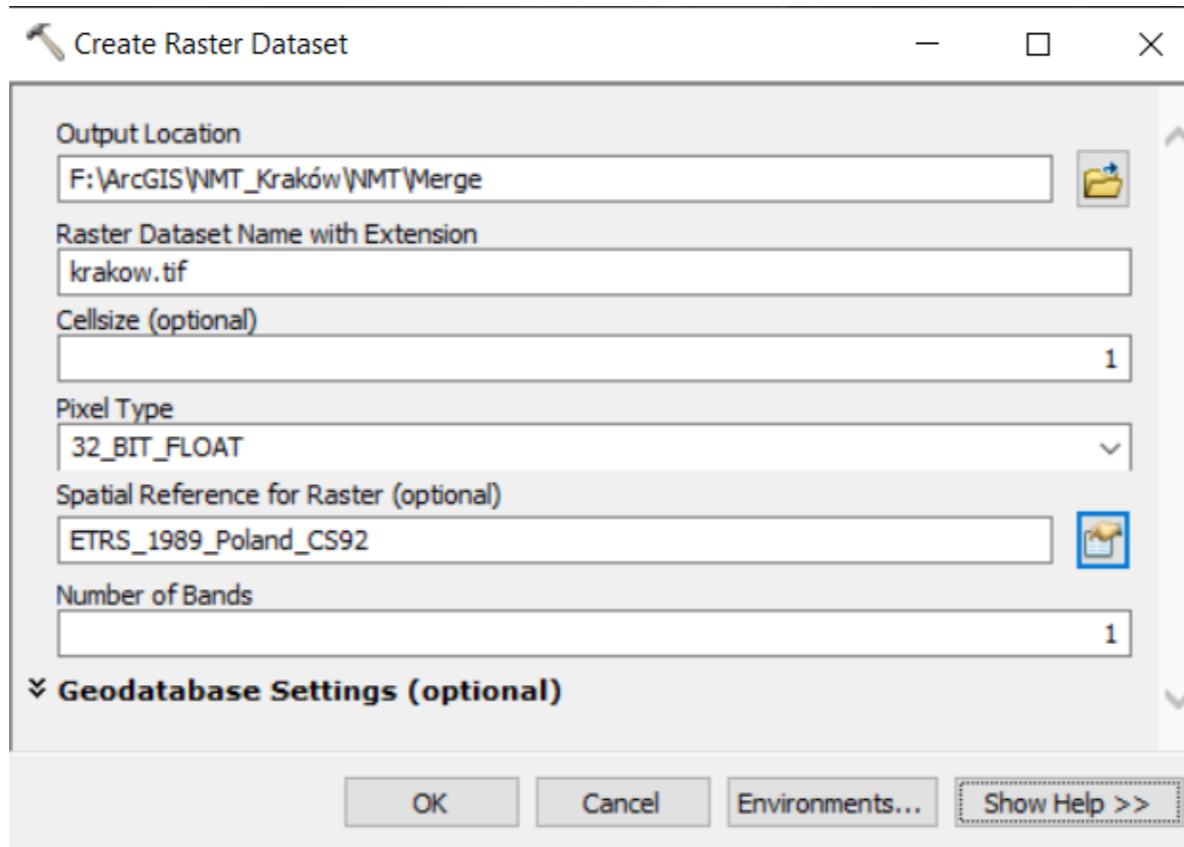


## NMT ISOK – scalanie



## NMT ISOK – scalanie

Data Management Tools > Raster > Raster Dataset >  
Create Raster Dataset



$$x=2^y$$

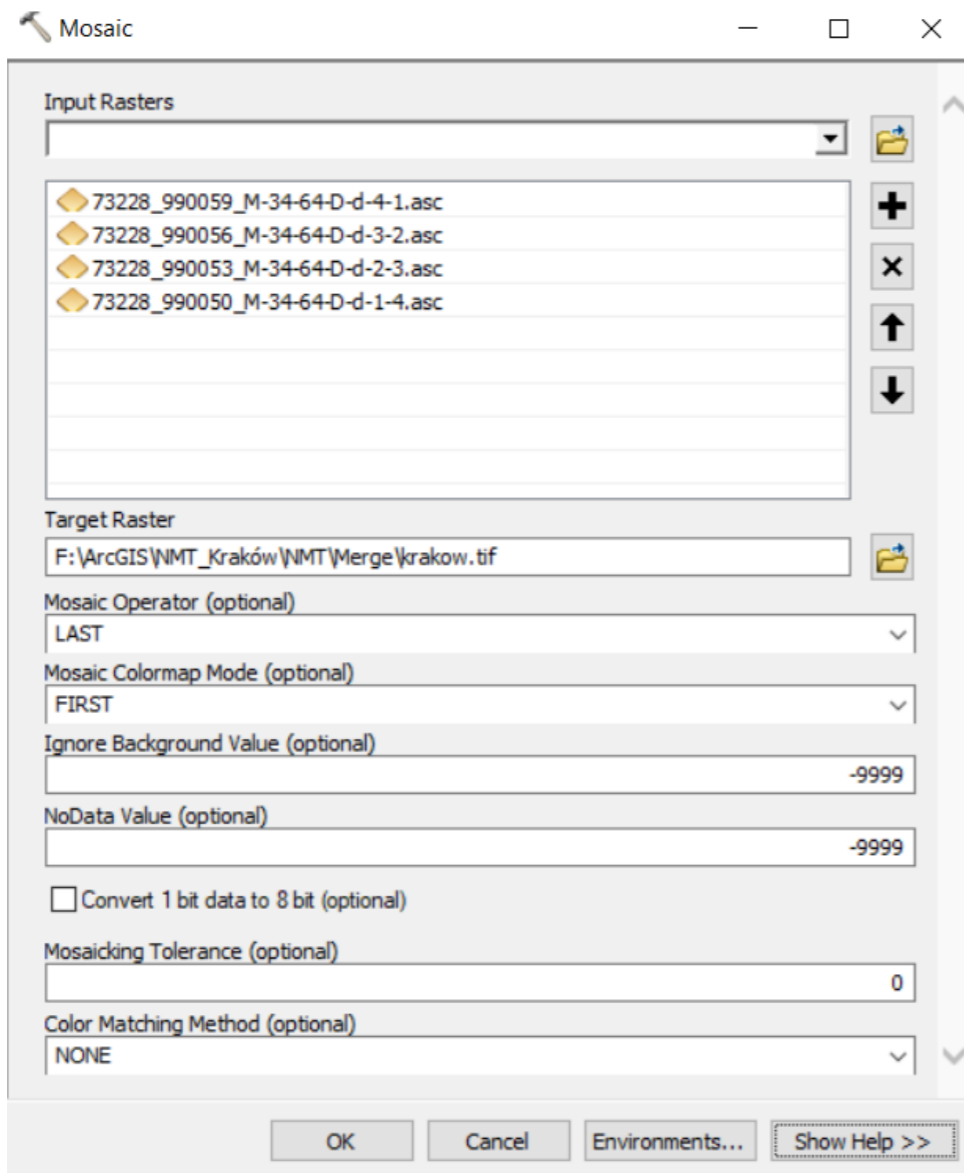
x - liczba kolorów możliwych do uzyskania

y - konkretna głębina kolorów (bpp)

2 - oznacza stan pojedynczego bita: 0 lub 1

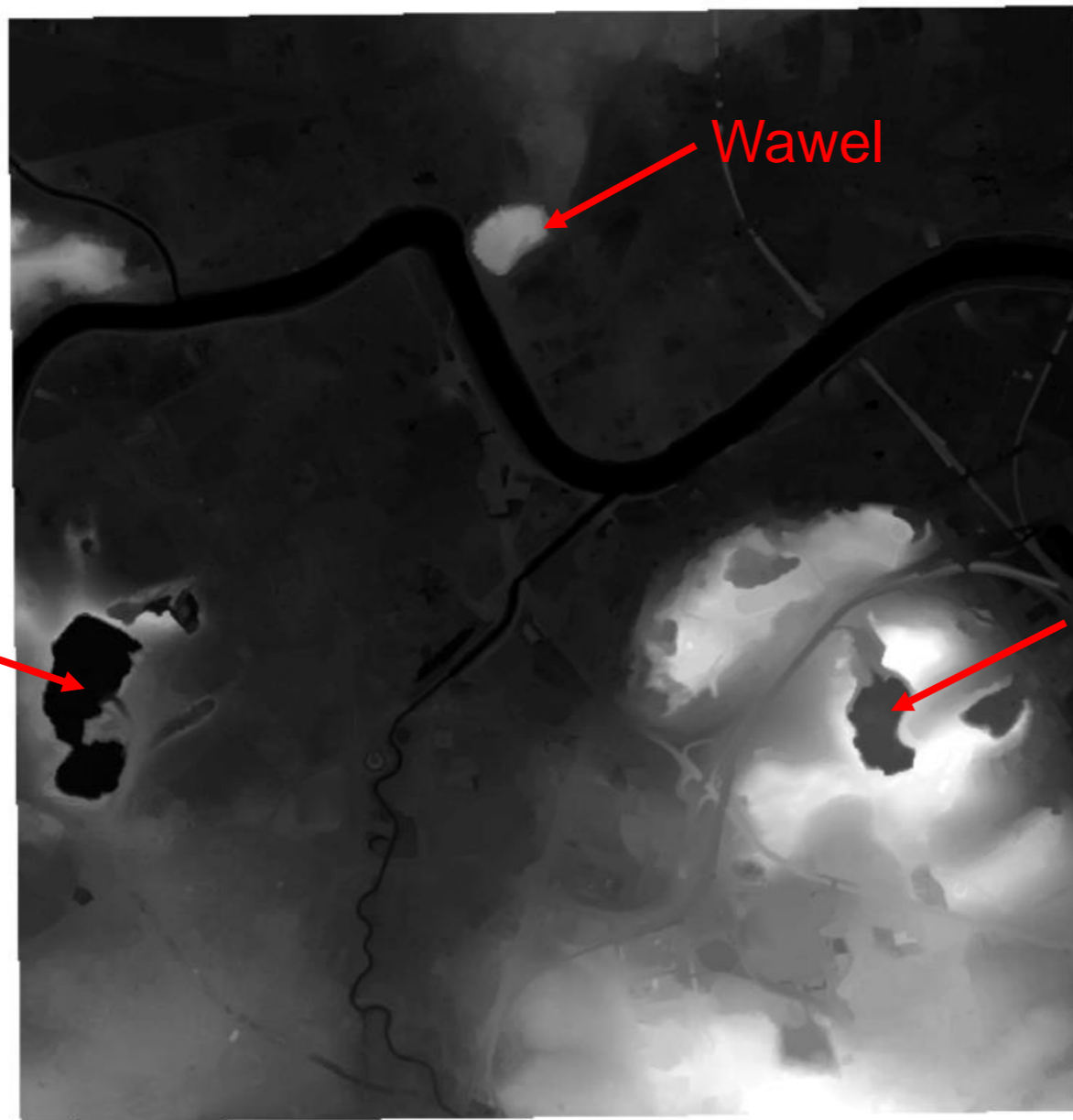
32-bitowa głębina kolorów da nam  
4 294 967 296 odcieni

## NMT ISOK – scalanie



Data Management Tools >  
Raster >  
Raster Dataset >  
Mosaic

## NMT ISOK – scalanie

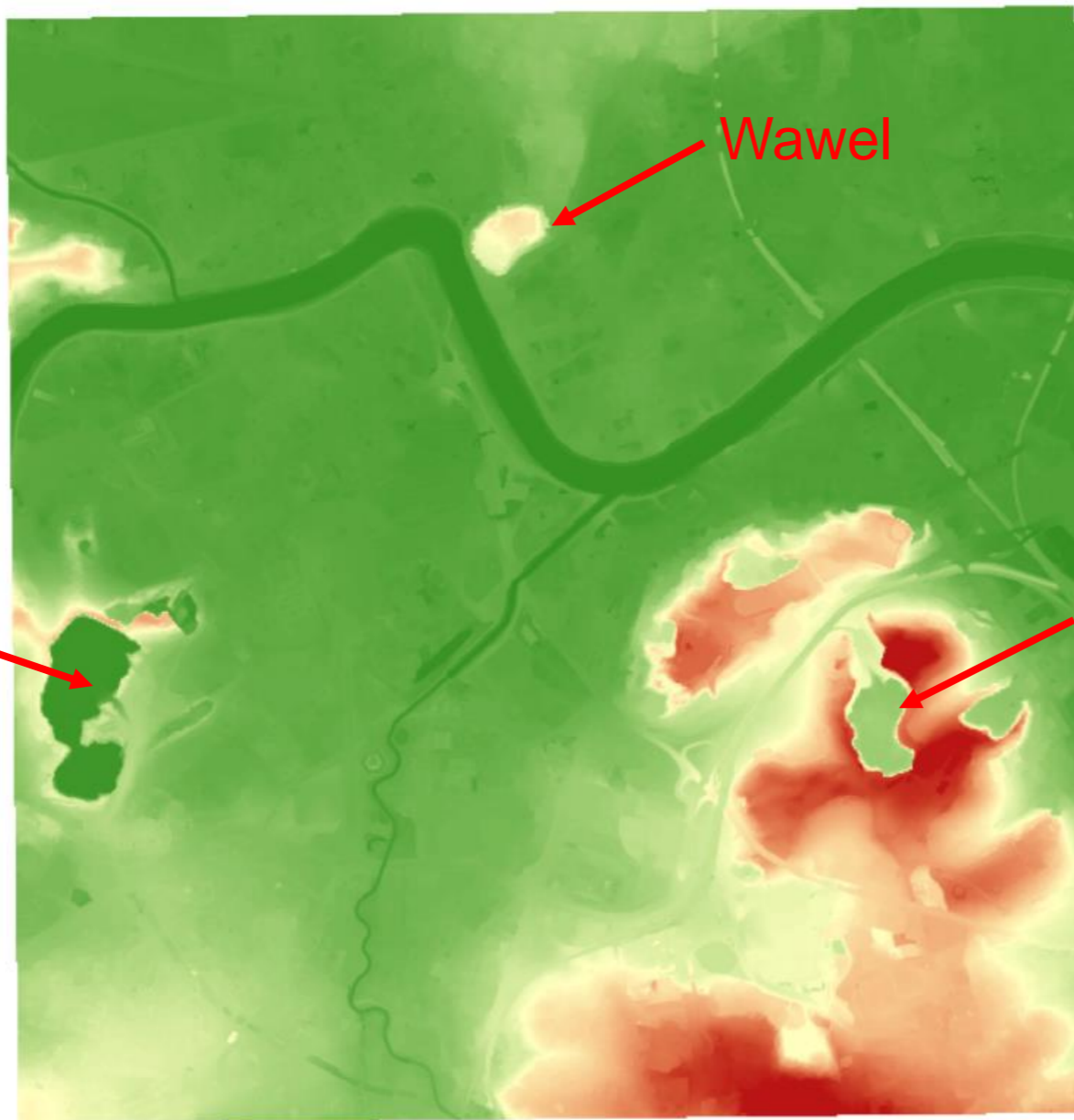


## NMT ISOK – scalanie

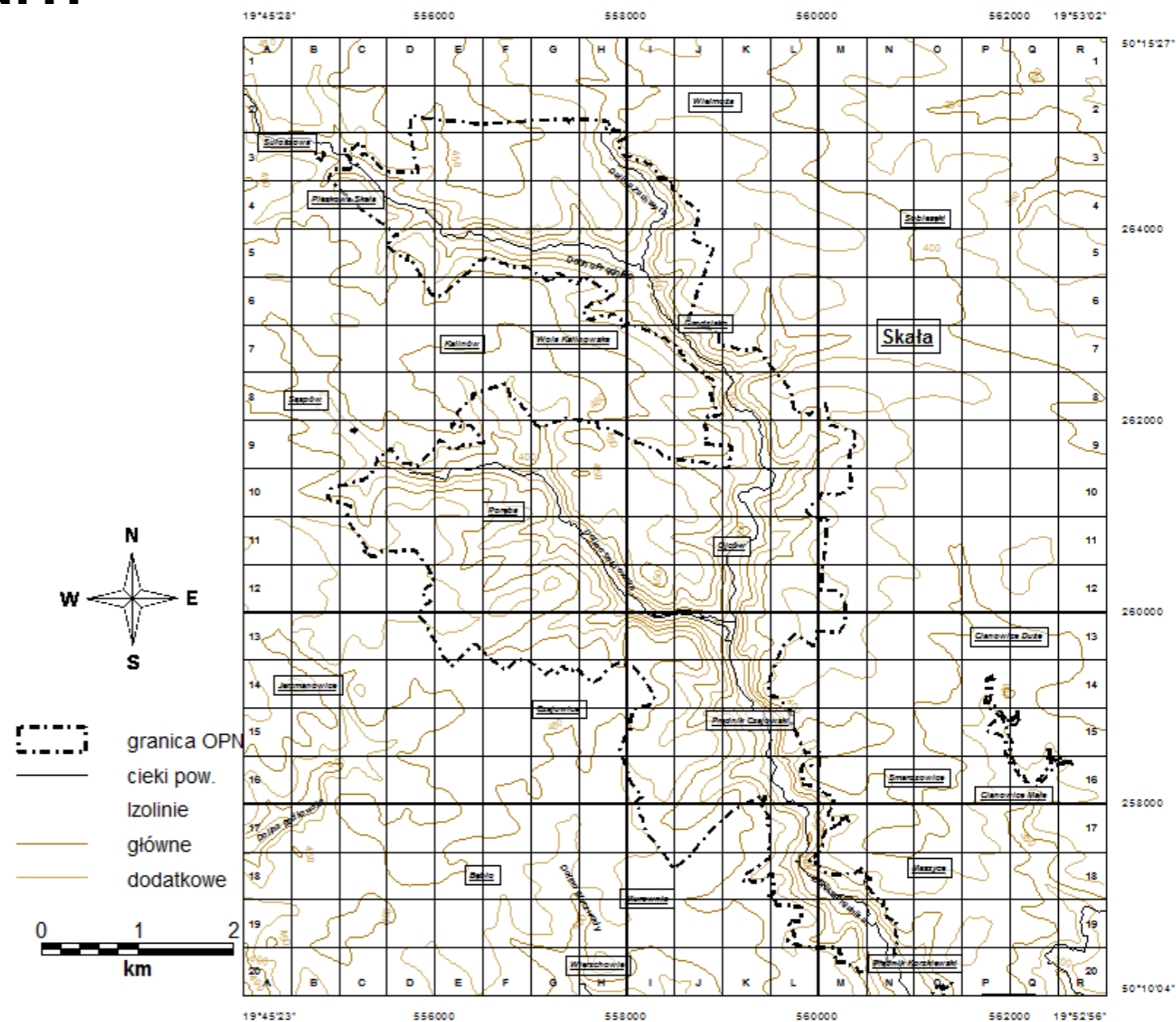
Zakrzówek

Wawel

Kam. „Liban”

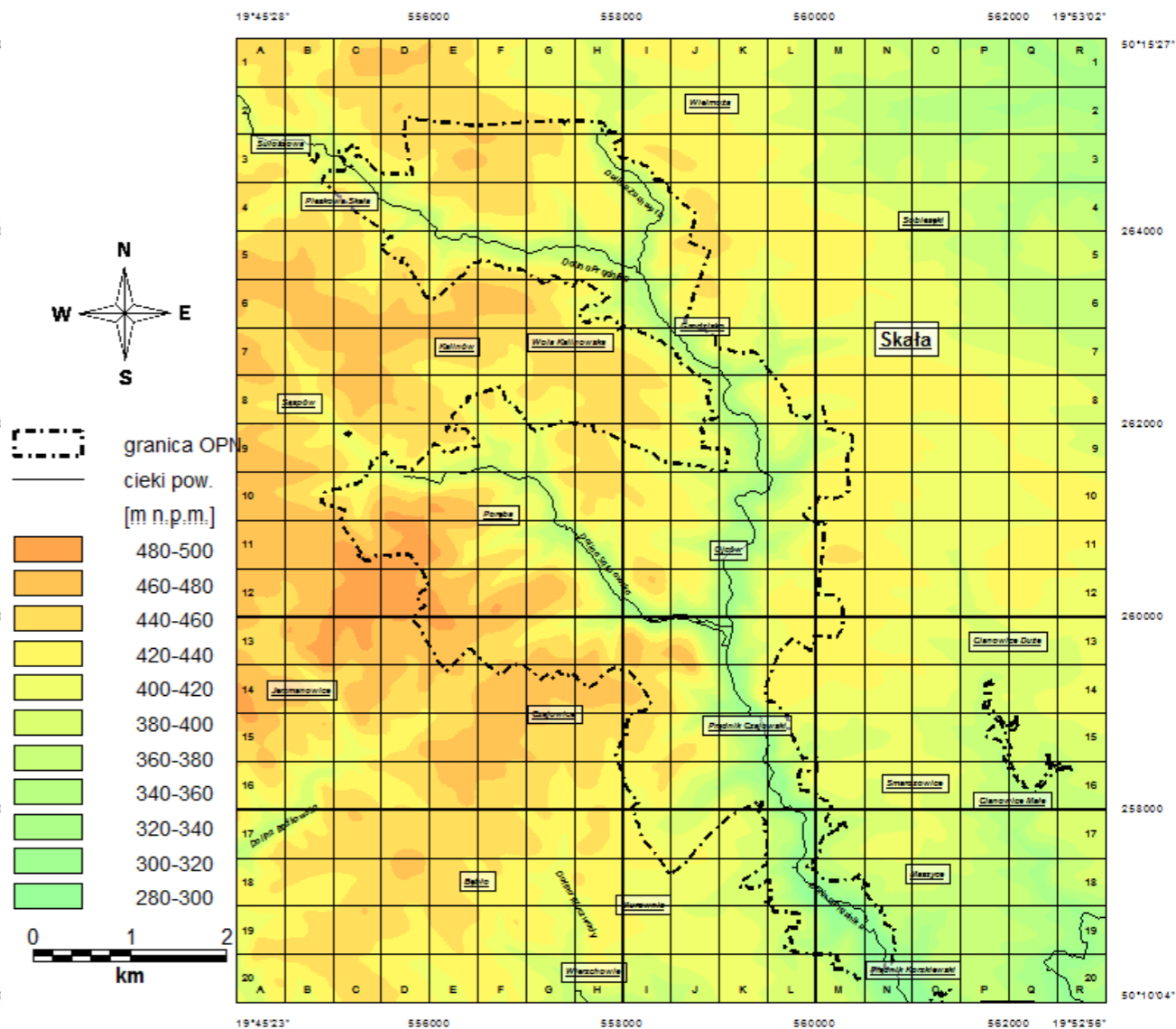
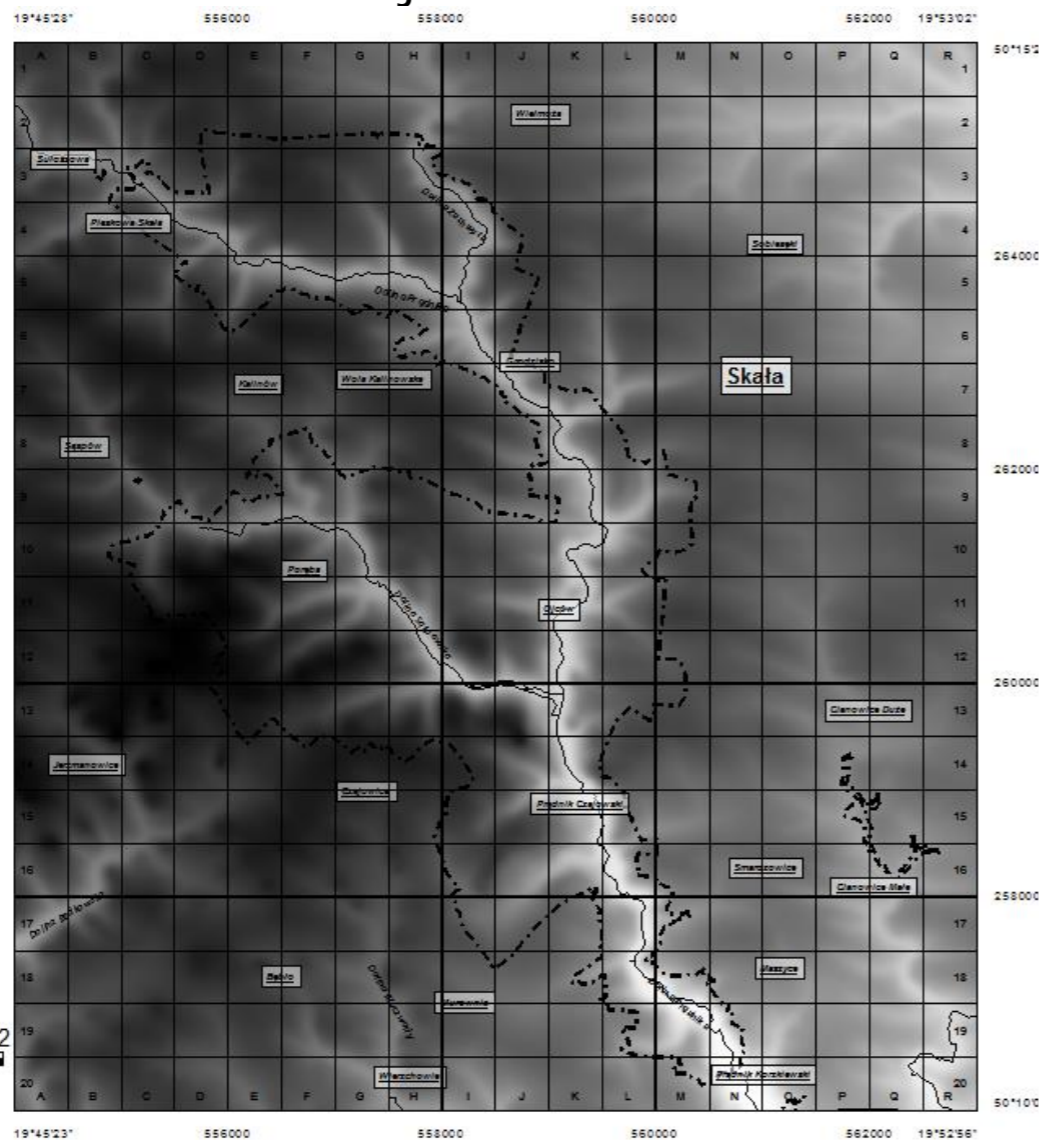


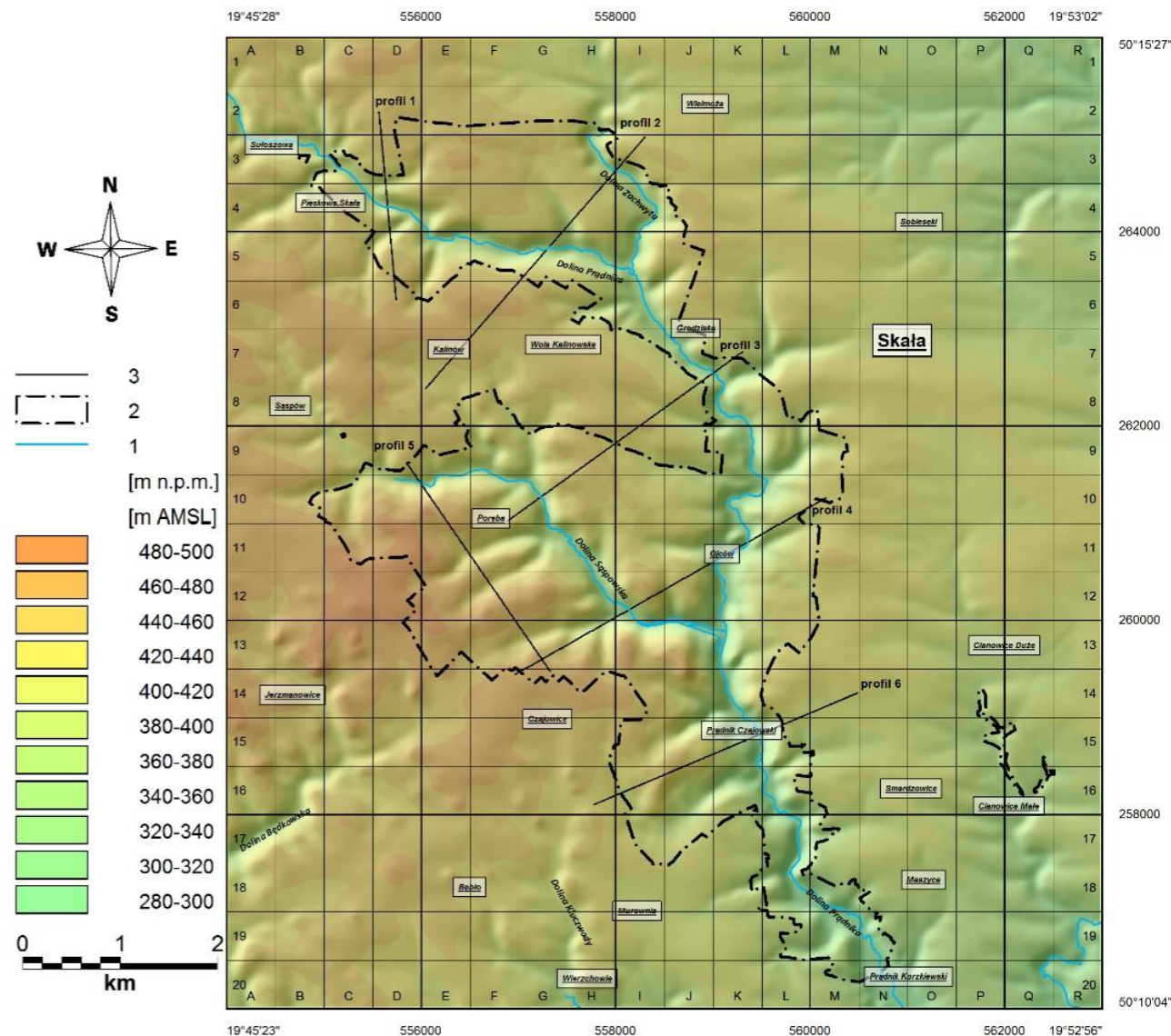
# Zastosowanie NMT



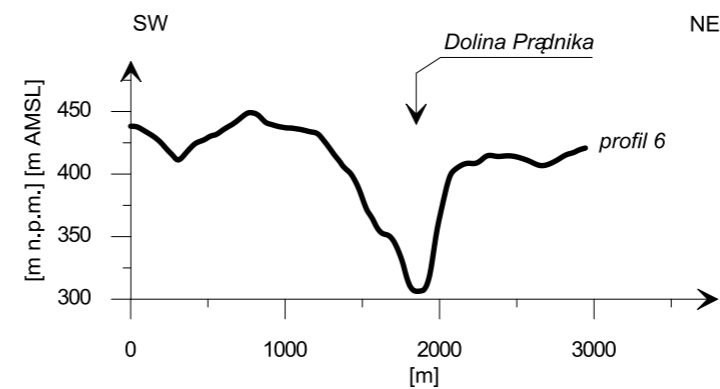
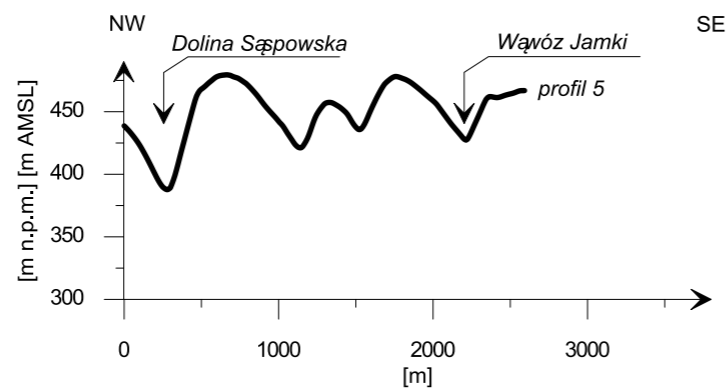
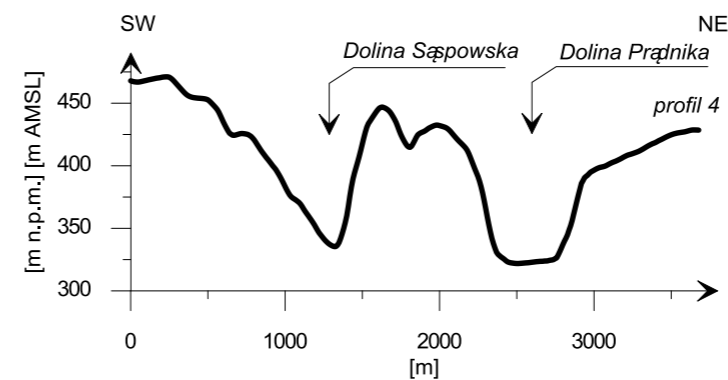
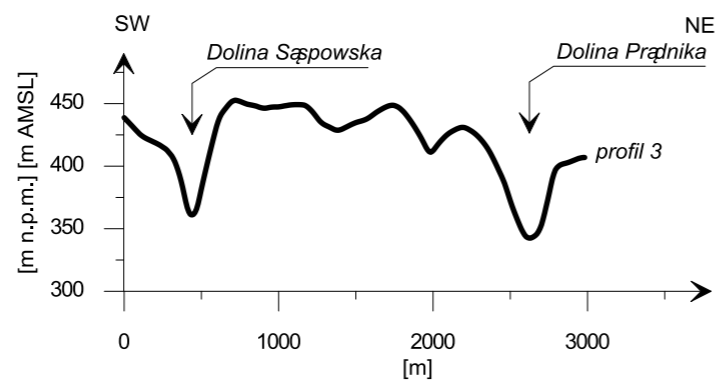
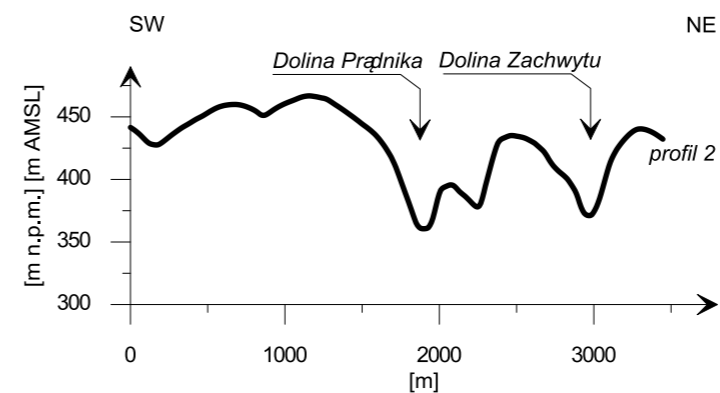
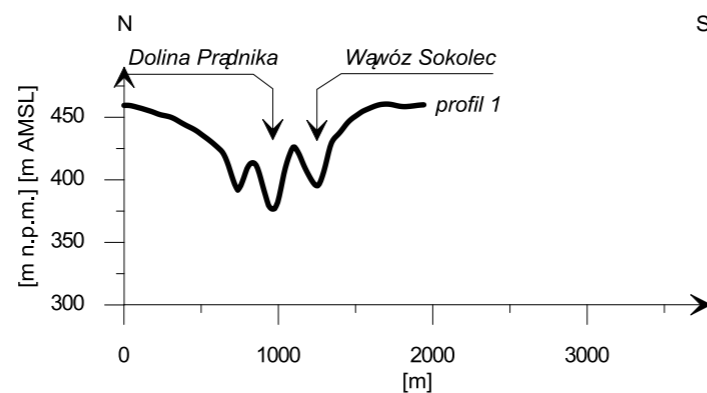
# Zastosowanie NMT

- Wizualizacje 2D





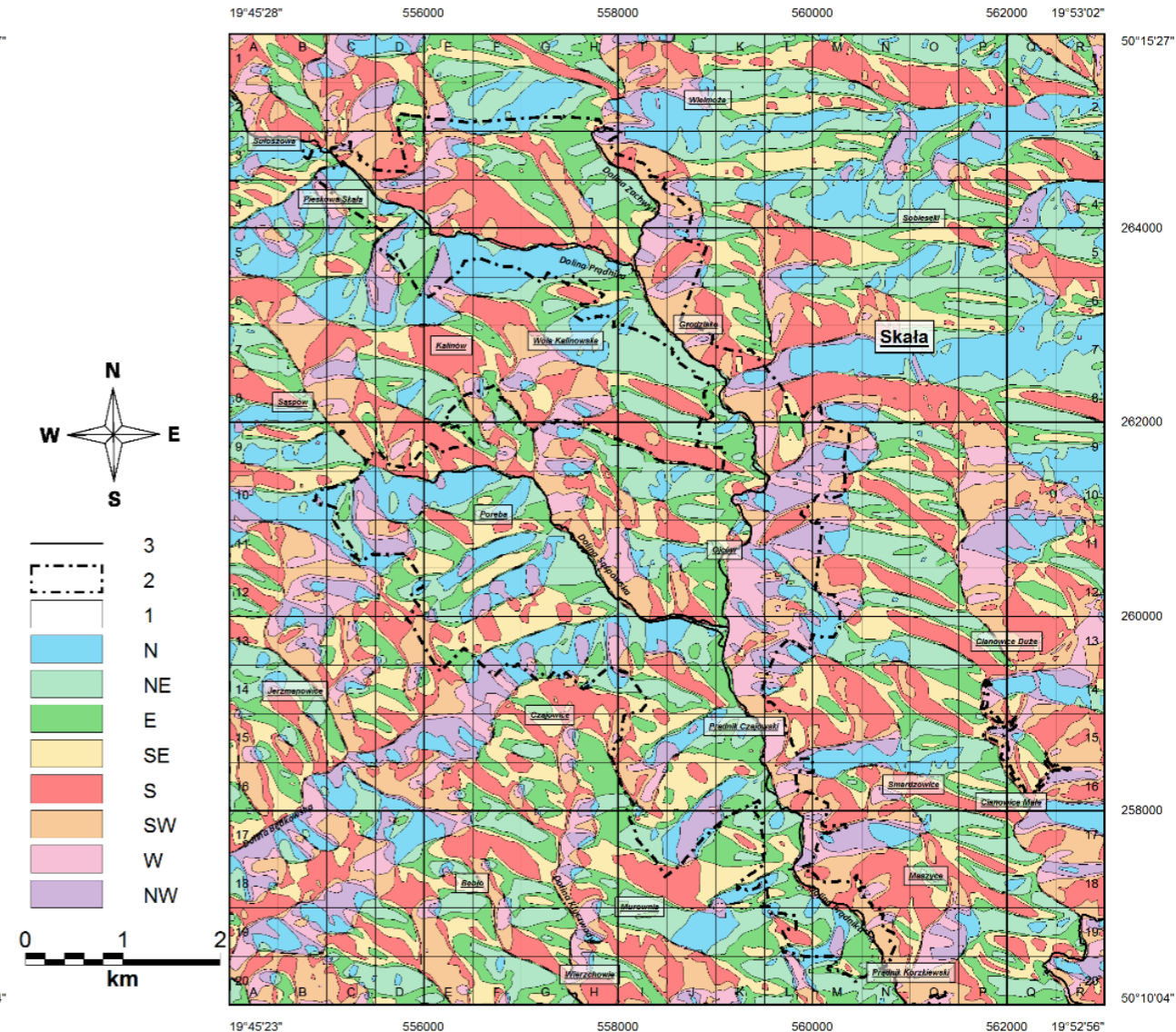
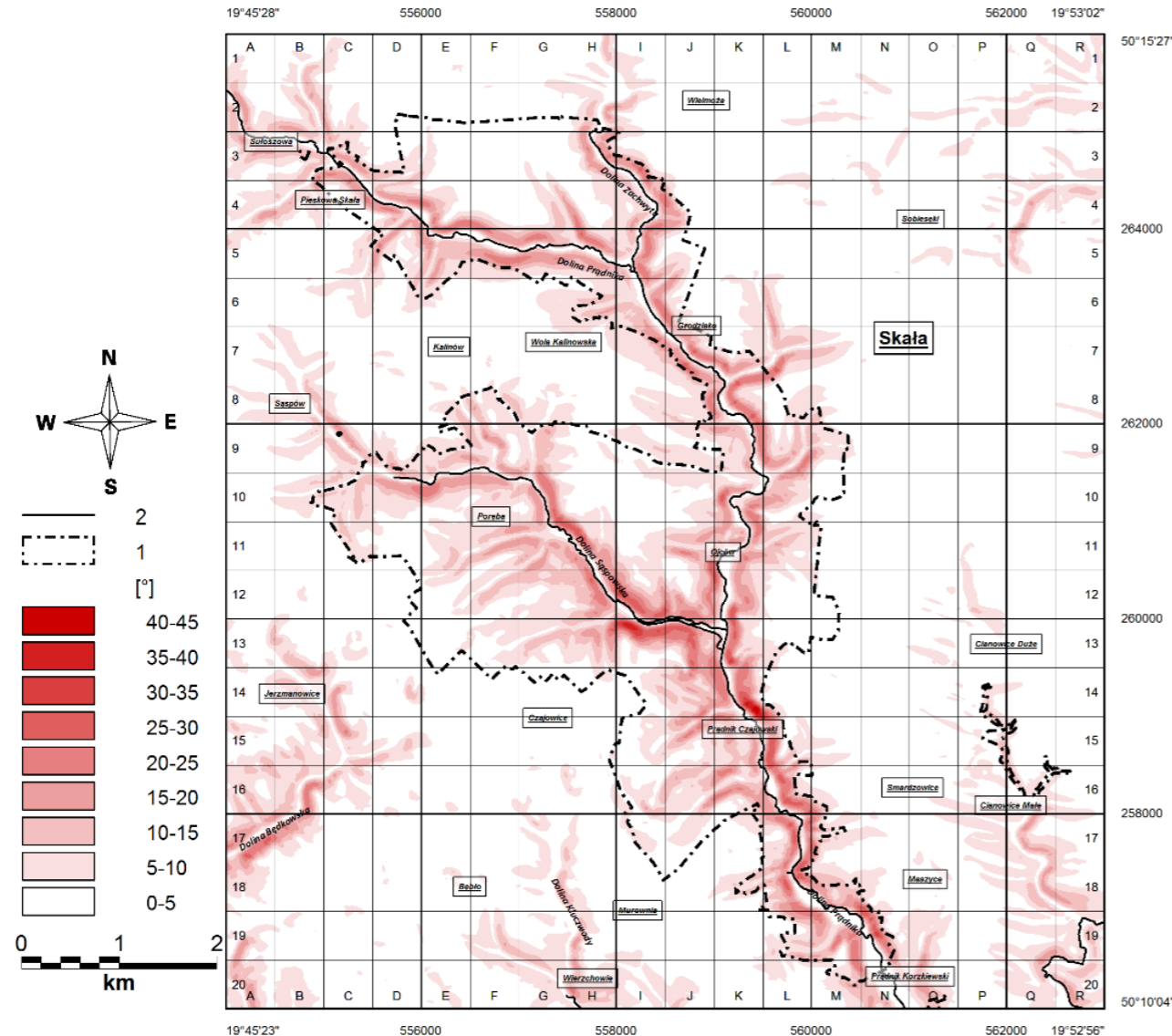
## Zastosowanie NMT



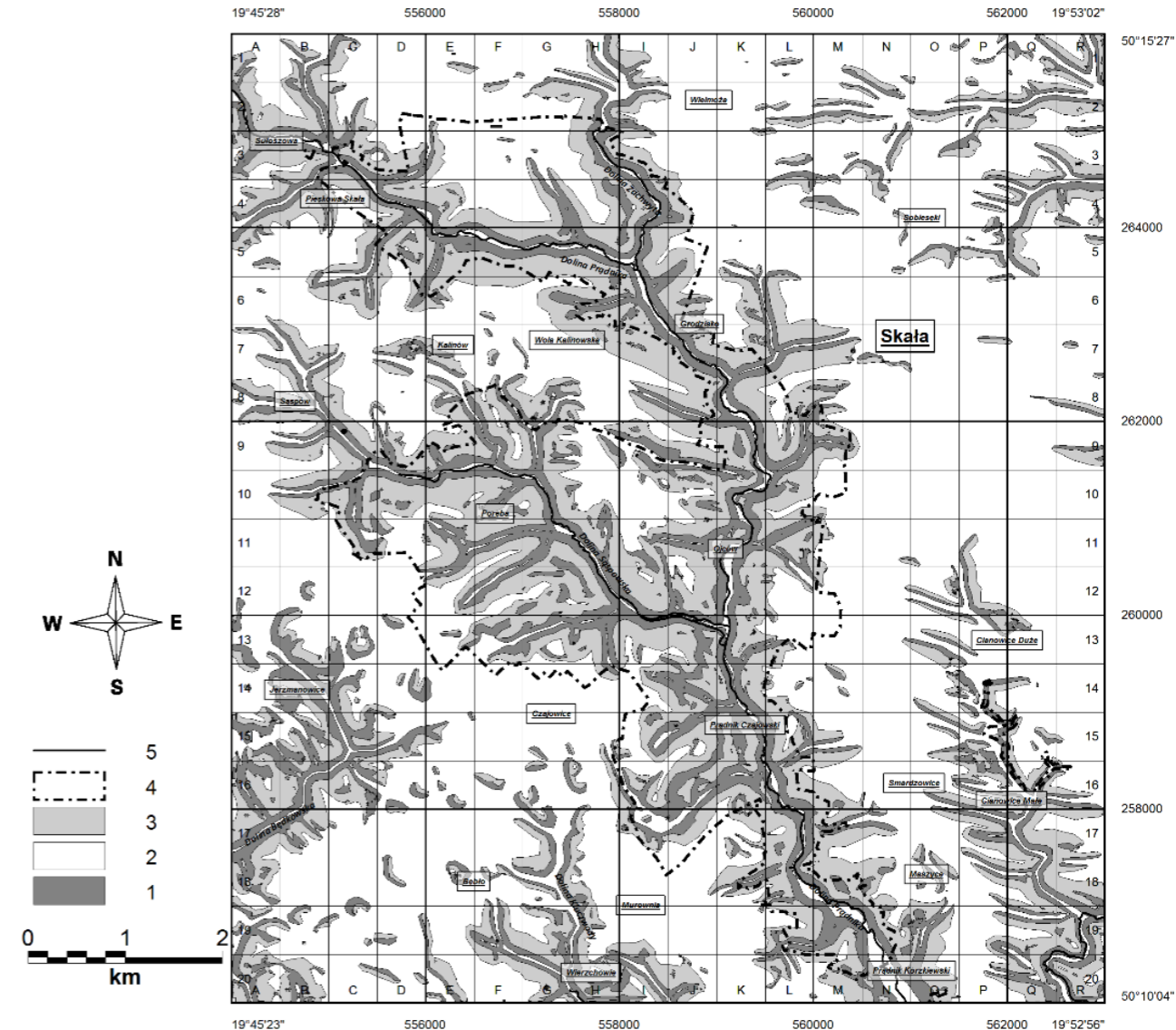
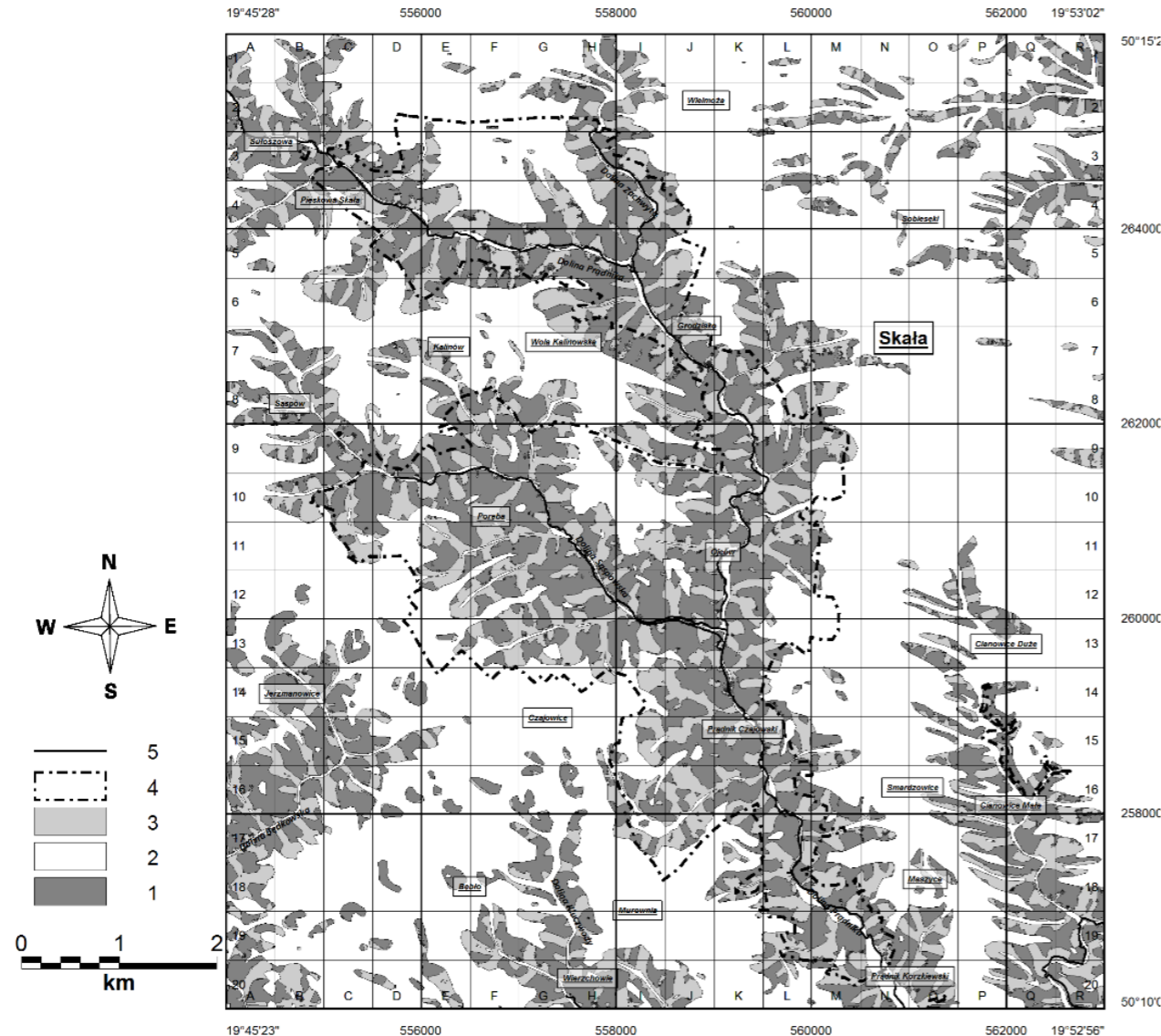
## Zastosowanie NMT



# Zastosowanie NMT - geomorfometria

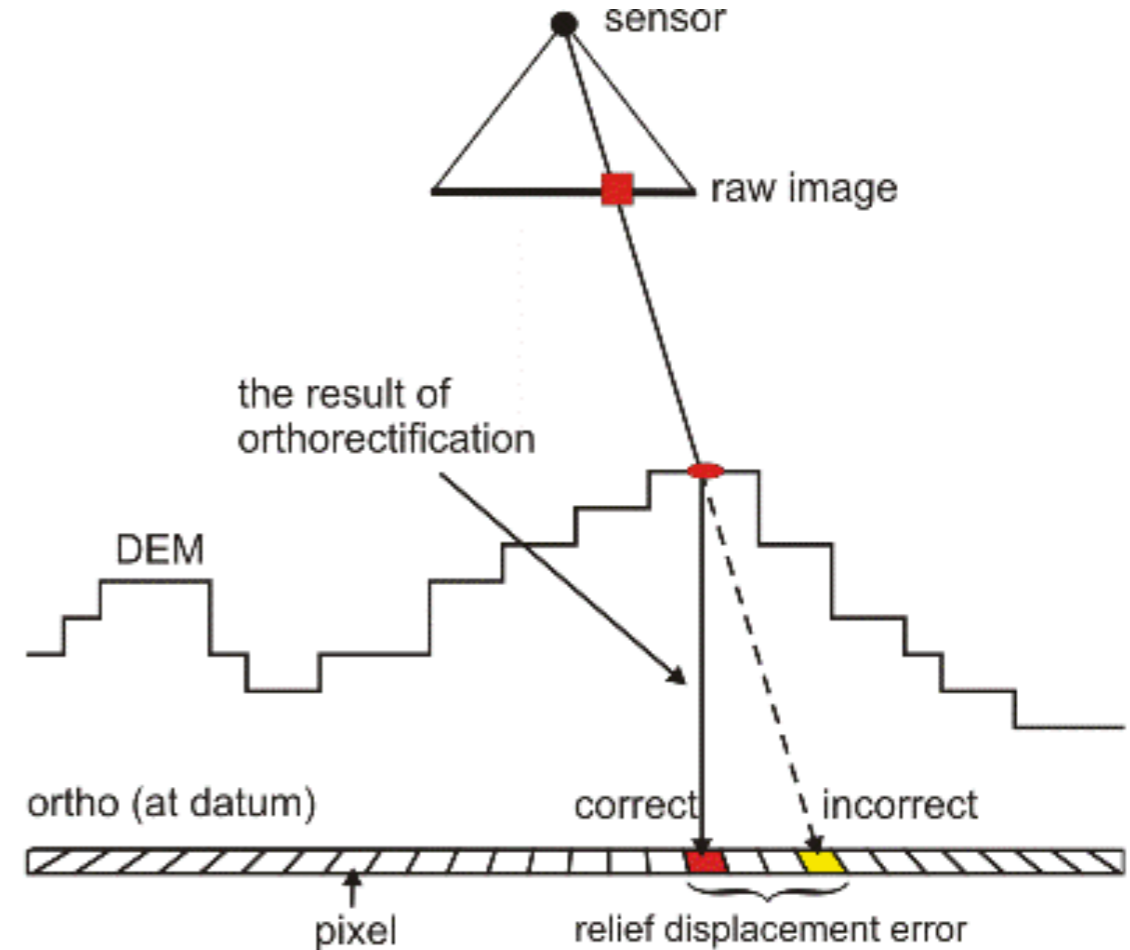
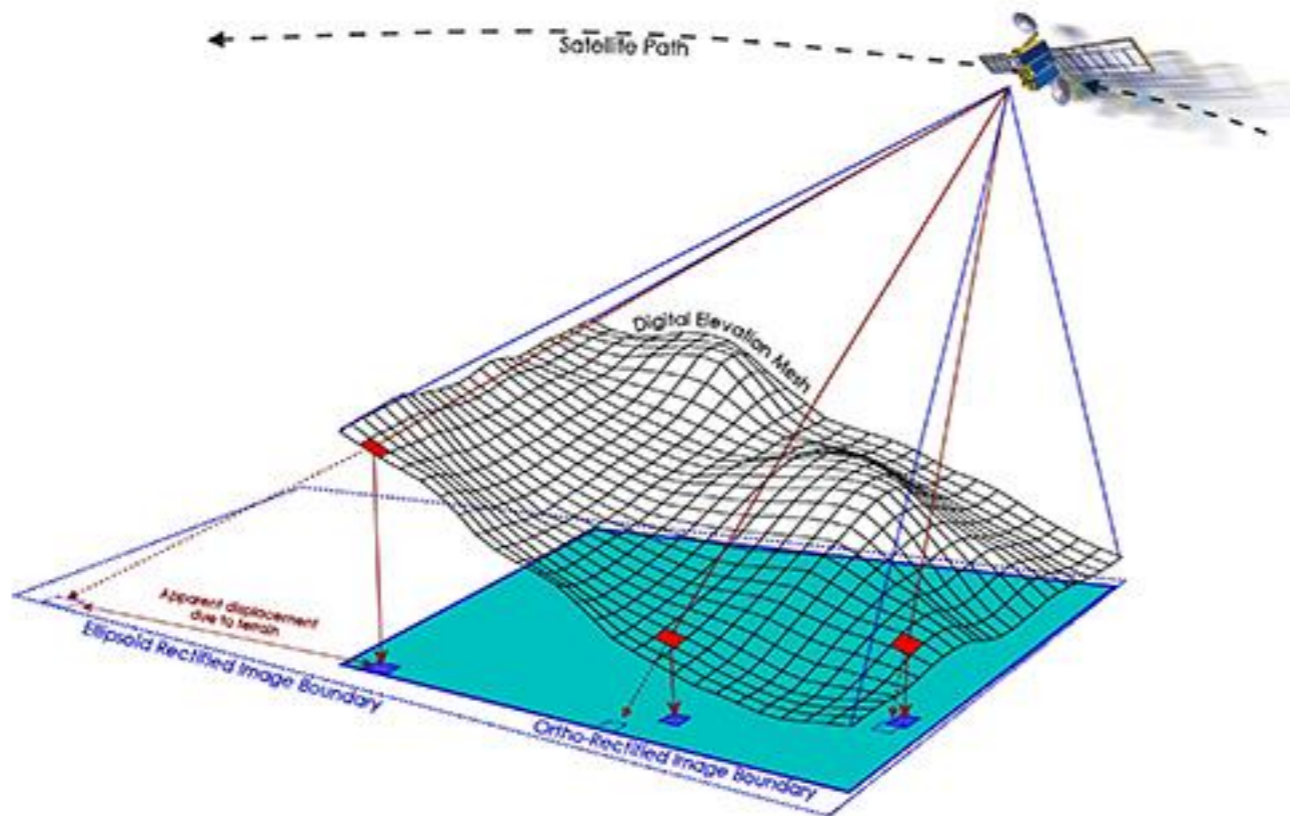


# Zastosowanie NMT - geomorfometria



## Zastosowanie NMT - teledetekcja

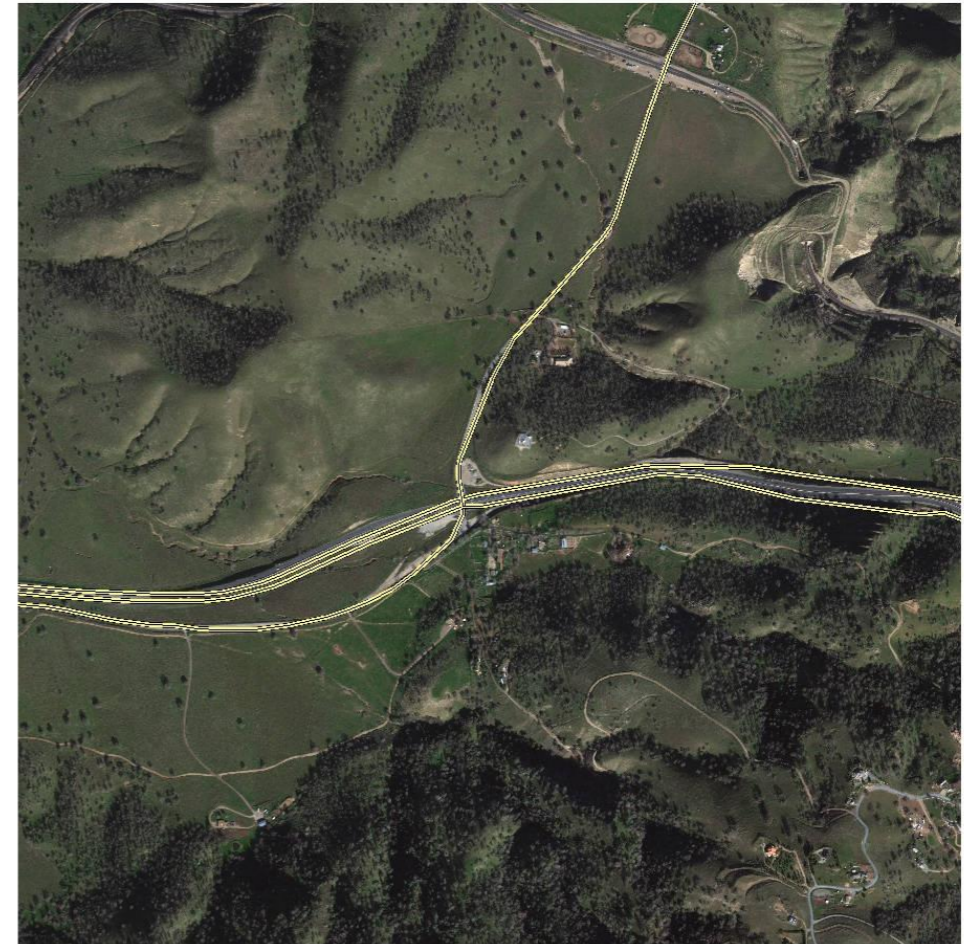
- Ortorektyfikacja zdjęć lotniczych i satelitarnych (pozbycie się zniekształceń perspektywy)



## Zastosowanie NMT

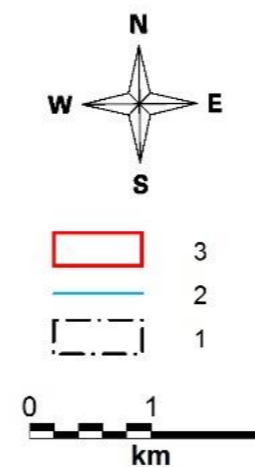


Raw scene geocoded to ephemeris  
with vector overlay

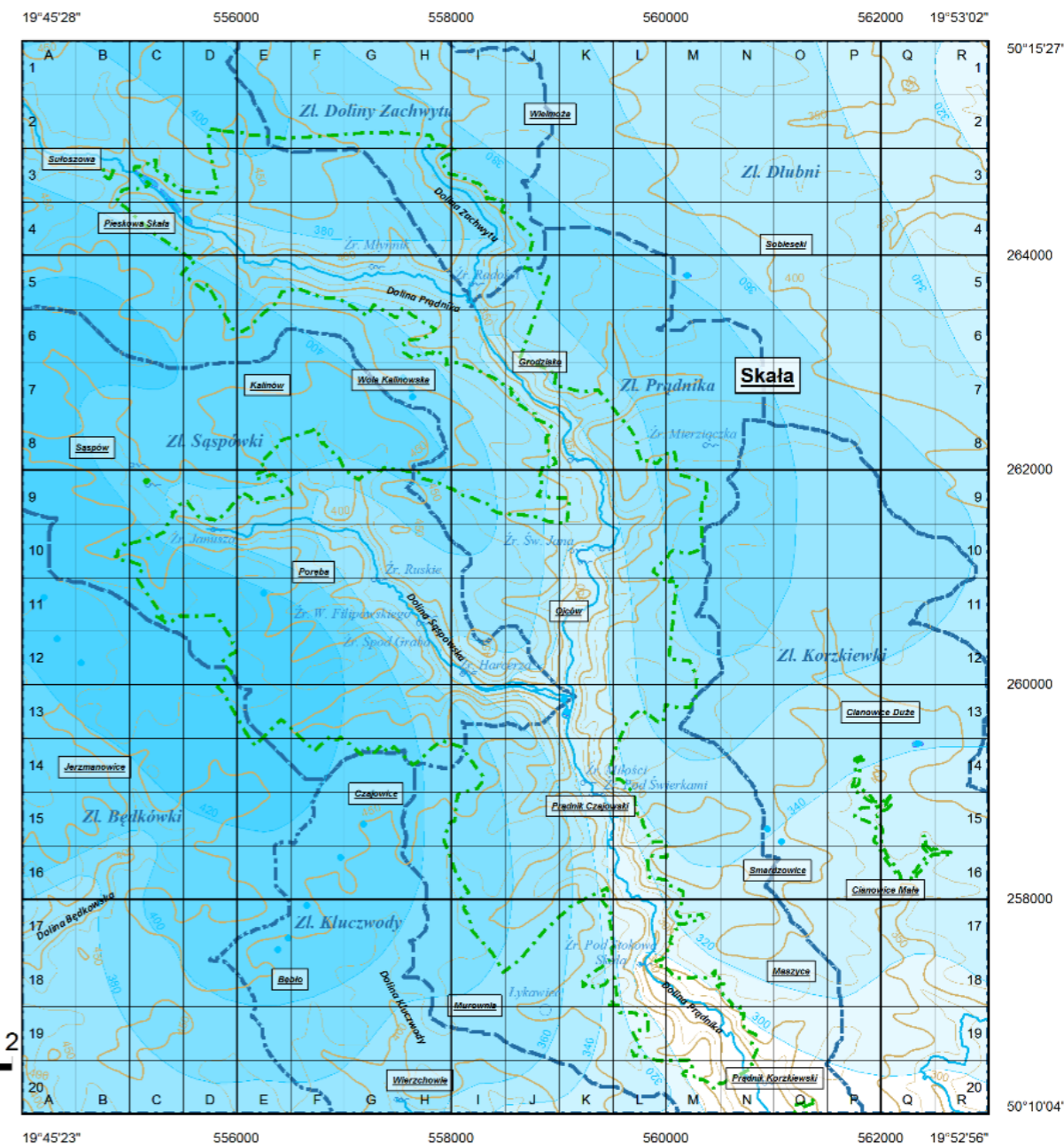
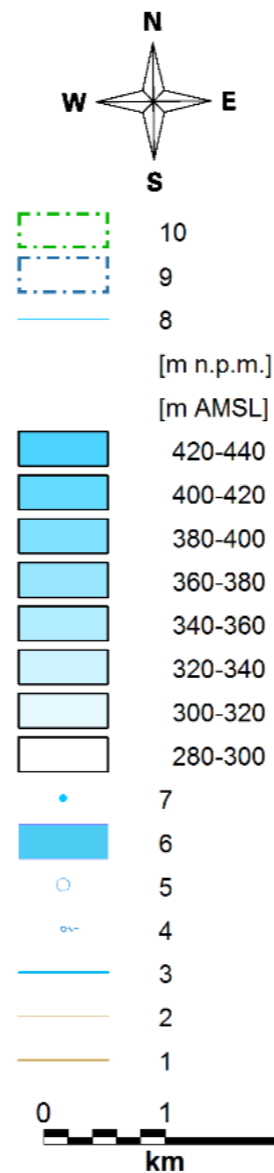


Orthorectified scene with look-up table  
and vector overlay

## Zastosowanie NMT



# Zastosowanie NMT



## Zastosowanie NMT - inne

- modelowanie klimatyczne
- ekologia
- zagrożenia powstawania osuwisk
- analizy widoczności
- budowa dróg itp.
- zastosowania militarne
- symulatory lotu
- gry komputerowe
- klasyfikacja zdjęć satelitarnych i inne



## Bibliografia

Bartuś, T., 2020. *Struktura i różnorodność abiotycznych komponentów krajobrazu w ocenie i delimitacji obszarów chronionych na przykładzie rejonu Ojcowskiego Parku Narodowego i jego otoczenia*. Wydawnictwa AGH. Kraków, 398pp.

CBK PAN 2021. *Numeryczne modele wysokościowe*. Poradnik Geoinformatyczny. CBK PAN, Centrum Informacji Kryzysowej, 17pp.

Ewertowski M., Rzeszewski M., 2007. *Numeryczne modele terenu*, prezentacja Gis Day.

Urbański, J., 2011. *GIS w badaniach przyrodniczych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 252pp.