

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Zhodnocení vlivu prostorového rozlišení digitálního modelu
terénu na sklonitost terénu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Petr Bašta

Bakalant: Timur Dassayev

2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Timur Dassayev

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Zhodnocení vlivu prostorového rozlišení digitálního modelu terénu na sklonitost terénu

Název anglicky

Assessing the effect of digital terrain model spatial resolution on terrain slope

Cíle práce

Hlavním cílem práce bude analýza a zhodnocení vlivu podrobnost (prostorového rozlišení gridu) digitálního modelu terénu (DEM) na sklonitost terénu z něj odvozenou ve vybrané zájmové oblasti v rámci Středočeského kraje.

Dílčím cílem bude rešerše odborných zdrojů na téma digitálních modelů terénu (formáty dat DEM, způsoby získávání dat, dostupné datové sady DEM) a digitální analýzy terénu (odvození sklonu).

Metodika

1. Rešerše odborných zdrojů na téma digitálních modelů terénu (DEM), jeho derivátů (primární terénní charakteristiky) a digitální analýzy terénu (odvození sklonu);
2. Popis zájmového území – vybrané oblasti Středočeského kraje (dvě povodí III. řádu – Benešovsko, Nymbursko);
3. Popis vstupní datové sady DEM: Digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G)
4. Resamplování zdrojové datové sady do následujících variant s rozlišením pixelů – 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 30 m, 90 m);
4. Odvození sklonitosti území pro výšková pásma na základě variant DEM;
5. Srovnání a zhodnocení výsledků formou diskuse a formulace závěrů práce.

Doporučený rozsah

práce 30 normostran textu

Klíčová slova

digitální model terénu, sklonitost, DMR, ZABAGED, digitální analýza terénu

Doporučené zdroje informací

BRŮHA, L. (2016): Digitální modely terénu. PřF, Univerzita Karlova v Praze, (online) [cit. 2022.06.06], dostupné z

<https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatikakartografie/kestazeni/projekty/modernigeoinformacni-metody-ve-vyuce-gis-kartografie-a-dpz/digitalni-modely-terenu/>

Falorni, G., Teles, V., Vivoni, E. R., Bras, R. L., & Amaratunga, K. S. (2005). Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F2).

PECKHAM, Robert J.; JORDAN, Gyozo. *Digital terrain modelling: development and applications in a policy support environment*. Berlin; New York: Springer, 2007. ISBN 9783540367307.

WILSON, John P.; GALLANT, John C. *Terrain analysis: principles and applications*. New York: Wiley, 2000. ISBN 0471321885.

Předběžný termín

obhajoby 2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Petr Bašta

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 13. 2. 2024

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 13.2.2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma: Zhodnocení vlivu prostorového rozlišení digitálního modelu terénu na sklonitost terénu vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzi tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne

.....

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá analýzou vlivu prostorového rozlišení DMT na odvozený sklon terénu v regionech Benešovsko a Nymbursko v České republice. Provedeno bylo detailní porovnání různých rozlišení DMT (1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 30 m, 90 m) a byl posouzen jejich vliv na odvozený sklon terénu v definovaných výškových pásmech. Hlavní metodické postupy zahrnovaly přípravu DMT do uvedených šesti variant prostorového rozlišení rastrů, odvození příslušných rastrů sklonu terénu, jejich porovnání a identifikaci rozdílů mezi všemi variantami rozlišení v rámci obou zájmových lokalit. Výsledky ukázaly významný vliv prostorového rozlišení na odvozený sklon terénu. Vyšší rozlišení poskytlo detailnější informace o průběhu terénu, s čímž souvisí také vyšší dosažené hodnoty sklonu. Jednou ze základních metrik pro posouzení rozdílů ve sklonu odvozeného z uvedených variant rozlišení DMT byl průměrný sklon v zájmových lokalitách. Vzájemné rozdíly mezi těmito průměrnými sklony se pohybovaly v menších jednotkách procent; maximálně až 7 % v oblasti Benešovska a až 2,5 % v oblasti Nymburska – v obou případech při srovnání variant rozlišení 1 m a 90 m. Lokální odchylky sklonů mezi rastry s nejpodrobnějším a nejhrubším rozlišením však dosahují i desítek procent. Přínos práce spočívá v pochopení této variabilní dynamiky terénu v různých regionech, což má potenciál pro optimalizaci plánování a rozhodovacích procesů v oblasti územního plánování, ochrany přírody a dopravní infrastruktury. Tento výzkum může přispět k lepšímu porozumění terénní dynamiky a k využití moderních technologií získávání dat o terénním reliéfu.

Klíčová slova: DMT, prostorové rozlišení, sklon terénu, Benešovsko, Nymbursko.

Abstract: This bachelor's thesis examines the impact of spatial resolution of DTMs on derived terrain slope in the Benešovsko and Nymbursko regions of the Czech Republic. A detailed comparison of various DTM resolutions (1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 30 m, 90 m) was conducted to assess their influence on derived terrain slope within defined elevation bands. The main methodological procedures included preparing the DTM into the six specified spatial resolution variants, deriving the corresponding terrain slope rasters, comparing them, and identifying differences among all resolution variants and the areas of interest. The results demonstrated a significant influence of spatial resolution on derived terrain slope. Higher resolutions provided more detailed information about the terrain profile, resulting in higher slope values. One of the key metrics for assessing differences in slope derived from the specified DTM resolution variants was the average slope in the areas of interest. The mutual differences among these average slopes ranged within smaller percentage units, reaching a maximum of 7 % in the Benešovsko area and up to 2.5 % in the Nymbursko area when comparing the 1 m and 90 m resolution variants. However, local discrepancies in slopes between the most detailed and coarsest resolution rasters reached up to tens of percentage points. The contribution of this work lies in understanding this variable terrain dynamics in different regions, which has the potential for optimizing planning and decision-making processes in territorial planning, nature conservation, and transportation infrastructure. This research can contribute to better understanding of terrain dynamics and the utilization of modern technologies for terrain relief data acquisition.

Key words: DTM, spatial resolution, terrain slope, Benešov, Nymburk.

OBSAH	
1 ÚVOD	1
2 CÍLE	2
3 LITERÁRNÍ REŠERŠE	3
3.2 TYPY STRUKTUR DIGITÁLNÍCH MODELŮ TERÉNU	3
3.2.1 VRSTEVNICE.....	3
3.2.2 TRIANGULATED IRREGULAR NETWORKS (TIN)	4
3.2.3 RASTROVÝ MODEL TERÉNU.....	5
3.3 METODY SBĚRU DAT	6
3.3.1 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ	6
3.3.2 RTK-GPS	7
3.3.3 METODA LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ (LIDAR).....	7
3.3.4 PROSTOROVÁ ANALÝZA (INTERPOLACE).....	8
3.4 ZDROJE VÝŠKOPISNÝCH DAT ČR	9
3.4.1 ZABAGED	9
3.4.2 DMR 4G	9
3.4.3 DMR 5G	10
3.4.4 DMR 1G	11
3.4.5. GLOBÁLNÍ DIGITÁLNÍ MODELY TERÉNU	11
3.5 INTERPOLAČNÍ METODY	12
3.5.1 IDW	12
3.5.2 SPLINE	12
3.5.3 KRIGING.....	13
3.5.4 METODA PŘIROZENÉHO SOUSEDA (NATURAL NEIGHBOUR)	13
3.5.5 TOPO TO RASTER.....	14
3.5.6 SKLON (SLOPE)	15
3.6 METODY ZÍSKÁNÍ SKLONU	16
4 METODIKA	18
4.1 ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ	18
4.1.1 Benešovsko	18
4.1.2 Nymbursko.....	19
4.2 POPIS VSTUPNÍCH DATOVÝCH ZDROJŮ DMT	20
4.2.1 DMR 5G.	20
4.3 PREPROCESSING DAT	21

4.3.1 RESAMPLE.....	21
4.3.2 RECLASSIFY.....	22
4.3.3 RASTER TO POLYGON.....	23
4.3.4 DISSOLVE.....	23
4.3.5 ZONAL STATISTICS AS TABLE	24
5 VYSLEDKY.....	25
5.1 VÝŠKOPIS ZÁJMOVÝCH OBLASTÍ	25
5.2 SKLONITOSTNÍ POMĚRY	26
5.3 ANALÝZA SKLONŮ	29
6 DISKUSE	37
7 ZÁVĚR.....	39
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
8 PŘÍLOHY	44
8.1 Příloha 1	44
8.2 Příloha 2	49
8.3 Příloha 3	50

1 ÚVOD

Digitální model terénu (DMT) představuje klíčový prvek v geoinformatice a geografických analýzách. Jeho prostorové rozlišení, tedy velikost pixelu nebo buňky, hraje významnou roli při analýzách reliéfu, zejména při určování sklonitosti terénu. V současné době je stále více věnována pozornost vlivu prostorového rozlišení DMT na přesnost a spolehlivost výsledků analýzy sklonu.

V době, kdy digitalizace a geoinformační technologie hrají klíčovou roli ve zpracování geografických dat, je důležitějším úkolem přesná a spolehlivá reprezentace terénních útvarů. DMT se stává nepostradatelným nástrojem pro analýzu a vizualizaci topografických vlastností krajiny. Jednou z klíčových proměnných, ovlivňujících kvalitu digitálního modelu terénu, je prostorové rozlišení. S rostoucím množstvím dostupných dat ze satelitních misí, leteckých snímků a terénních měření se výzkumníci a praktici v oblasti geoinformatiky stále více zaměřují na otázku, jak volba prostorového rozlišení DMT ovlivňuje interpretaci terénních charakteristik. Vědecké a praktické komunity se zaměřují na optimalizaci prostorového rozlišení DMT pro analýzu sklonitosti terénu. Dosavadní výzkumy naznačují citlivý vztah mezi prostorovým rozlišením DMT a přesností výsledných informací sklonů. Nižší rozlišení může způsobit ztrátu detailů a vyhlazení terénních tvarů, zatímco vyšší rozlišení může vést k nadměrnému množství dat a případnému náhodnému šumu. Prostorové rozlišení DMT má zásadní vliv na analýzy spojené s vodními toky, erozí a ekologickými procesy. Příliš hrubý DMT může přehlédnout drobné vodní toky, ale zároveň příliš detailní DMT může vést k nesprávným interpretacím erozních procesů.

Tato práce se zaměřuje na problematiku vlivu prostorového rozlišení DMT na přesnost a spolehlivost odhadu sklonitosti terénu. Sklon terénu je zásadním faktorem pro různé disciplíny, včetně geomorfologie, hydrologie, urbanismu a environmentálního inženýrství. Porození vlivu prostorového rozlišení DMT na sklonitost terénu má zásadní význam pro správnou interpretaci a aplikaci těchto dat v různých oborech.

2 CÍLE

Tato práce má za cíl podrobně analyzovat vliv prostorového rozlišení DMT na přesnost měření sklonitosti terénu v oblastech Benešovska a Nymburska. Záměrem je zkoumat, jak různá rozlišení digitálních modelů terénu (1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 30 m, 90 m) ovlivňují výsledky analýzy sklonitosti terénu v těchto konkrétních oblastech.

V teoretické části práce bude provedeno obecné úvodní seznámení s digitálními modely terénu, zejména se ZABAGED, DMR 4G, DMR 5G, DMR 1G, a jejich významem v geografických analýzách. S ohledem na praktickou realizaci bude také popsán postup sběru dat, který může zahrnovat laserové skenování, dálkový průzkum země a další metody. Dále budou zdůrazněny klíčové nástroje, jež byly použity k výpočtu sklonu pro následující provedení analýzy sklonitosti terénu. Území Benešovska a Nymburska bude detailně rozebráno s ukázkami map.

Pracovní postup bude následně metodologicky stanoven tak, aby odrazil specifika zkoumaných regionů. Bude popsáno, jaké data byly sbírány, a jaké metody analýzy sklonitosti terénu byly použity.

Aplikace zvolených metod na konkrétní území Benešovska a Nymburska bude klíčovou fází práce. Výsledky analýzy sklonitosti terénu budou získány při různých rozlišeních DMT. Tyto výsledky budou podrobeny detailní interpretaci a srovnání, s důrazem na odhalení potenciálních odchylek v závislosti na rozlišení.

Ve závěrečné části práce budou prezentována hlavní zjištění a závěry, včetně diskuse nad dosaženými výsledky. Tímto způsobem přispěje tato práce k hlubšímu porozumění vlivu prostorového rozlišení na geografické analýzy terénu, s důrazem na konkrétní lokality Benešovska a Nymburska.

3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU

V následující kapitole bude popsán termín digitální model terénu. Zemský povrch je matematicky nevyjádřitelná plocha, je třeba ji generalizovat (zjednodušit). Digitální model terénu (DMT) má za úkol tento povrch popsat v digitální podobě a umožnit další operace nad výsledkem. Vstupem jsou body v prostoru a případně další údaje (např. definice hran apod.) Zemský povrch je z větší části hladký (běžné hladké plochy, ve zjednodušení), ale také ostrý (zlomy, zářezy, hrany, umělé terénní tvary).

Existují tři druhy DMT:

- Digitální model reliéfu (Digitální reprezentace reliéfu zemského povrchu v paměti počítače, složená z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů (Terminologický slovník ČUZK, ©2001)).
- Digitální model povrchu (Zvláštní případ digitálního modelu reliéfu konstruovaného zpravidla s využitím automatických prostředků (např. obrazové korelace ve fotogrammetrii) tak, že zobrazuje povrch terénu a vrchní plochy všech objektů na něm (střechy, koruny stromů apod.) (TS ČUZK, ©2001)).
- Digitální výškový model, angl. digital elevation model (DEM), je obecnější pojem než předchozí dva, a je jím také nadřazený. DEM může být jak digitální model terénu, respektive reliéfu (DTM nebo DMR), tak digitální model povrchu (DSM) (TS ČUZK, ©2001).

3.2 TYPY STRUKTUR DIGITÁLNÍCH MODELŮ TERÉNU

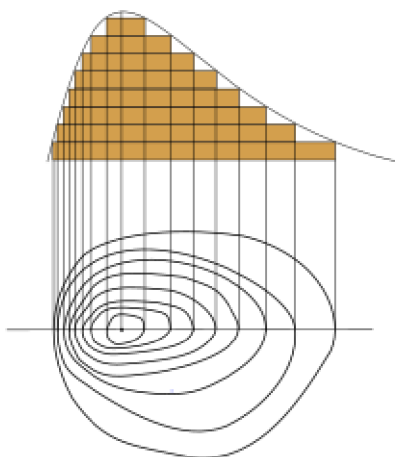
3.2.1 VRSTEVNICE

Vrstevnice jsou neodmyslitelně spjaté s tradiční kartografií jako způsob vyjádření výškopisu. Jsou však i datovou reprezentací výškopisu, která si našla místo v GIS, které umožnily automatizaci tvorby vrstevnic v digitálním prostředí. Těmito metodami jsou interpolační algoritmy, které odvozují průběh vrstevnic z množiny výškových bodů (tedy bodů s x, y, z souřadnicemi).

Lineární interpolační algoritmus – algoritmus vychází ze skutečnosti, že spád terénu mezi dvěma body, mezi kterými je interpolace prováděna, je konstantní. Tedy i rozstup vrstevnic mezi dvěma body je konstantní. Metoda je jednoduchá a výpočetně

rychlá, reálný průběh vrstevnic však vystihuje ve většině případů nevhodně (obrázek 1 zobrazuje, jak vypadá vrstevnice).

Nelineární interpolační algoritmy – tato varianta se snaží vystihnout skutečné tvary terénu. Nepředpokládá konstantní rozestup vrstevnic mezi dvěma interpolovanými body, nicméně předpokládá plynulou změnu tohoto rozestupu (tedy předpoklad plynulé změny sklonu terénu). Tento přístup je též označován jako geomorfologická interpolace, využívá kvadratické či kubické interpolace. Jedná se o postup obtížněji algoritmitizovatelný (Brůha, 2016).



Obrázek 1: Terén a odpovídající vrstevnice (Wikipedie)

3.2.2 TRIANGULATED IRREGULAR NETWORKS (TIN)

Představují souvislé povrchy, jako je nadmořská výška terénu nebo teplotní gradient. Povrch je reprezentován jako sada faset vytvořených spojením datových bodů v uzlech za účelem vytvoření sousedních trojúhelníků. Typicky zobrazujete TIN pomocí barevně stínovaného reliéfu k zobrazení nadmořské výšky. Stínovaný reliéf simuluje sluneční osvětlení zemského povrchu (obrázek 2). Přidání barvy vám umožní snadno vidět hřebeny, údolí a svahy, stejně jako jejich příslušné výšky. Zobrazení dat tímto způsobem může pomoci vysvětlit, proč jsou ostatní prvky mapy tam, kde jsou.

Plošky jsou nepravidelné trojúhelníky, společná je nejvýše hrana. Síť trojúhelníků vytvořena za použití triangulačních algoritmů. Proložením rovin vrcholy jednotlivých trojúhelníků vznikne nepravidelný mnohostěn (tzv. polyedr), který se přimyká k terénu. V trojúhelnících pak lineární interpolace. Tvar území může být konvexní i nekonvexní, s otvory (místa bez vrstevnic) či bez. Lze zadat povinné spojnice

(hřbetnice, údolnice, spádnice), které zlepšují jeho aproximační vlastnosti. Pro konstrukci používána Constrained Delaunay Triangulation.

Vyhovující Delaunayova triangulace se doporučují před omezenými triangulacemi. Je to proto, že výsledná čísla TIN budou pravděpodobně obsahovat méně dlouhých tenkých trojúhelníků (trojúhelníky s velmi malým minimálním vnitřním úhlem), které jsou pro analýzu povrchu nežádoucí. Navíc interpolaci přirozeného souseda a generování polygonu lze provádět pouze na vyhovujících Delaunayových triangulacích.



Obrázek 2: Výsledný TIN model terénu (Bayer, 2016)

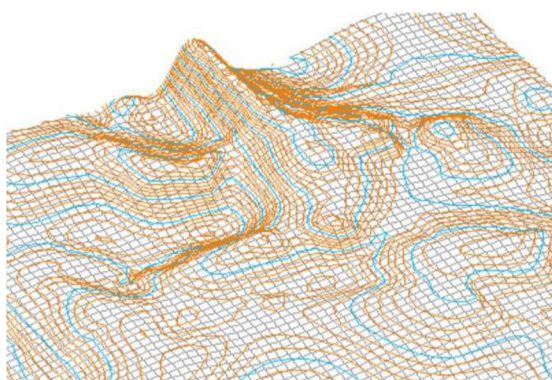
3.2.3 RASTROVÝ MODEL TERÉNU

Tvořen pravidelnými ploškami se společnými hranami (grid). Plošky představují zborcené čtyřúhelníky, lze je rozdělit na trojúhelníky (obrázek 3). Vlastnosti rastrového modelu: Body mají mezi sebou konstantní rozestupy, snadná manipulaci s buňkami rastru. Lépe se nad ním realizují výpočty (interpolace). Volba bodů se nepřizpůsobuje skutečnému tvaru terénu, v některých místech může být jejich počet nadbytečný, jinde naopak nedostatečný. Rastrový model DMT poskytuje ve většině případů horší výsledky než polyedrický model (Bayer, 2016)

Výhoda rastrového modelu spočívá v tom, že pracuje s pravidelnou maticí uzlových bodů, jejichž hodnoty lze relativně snadno vypočítat, nadto není nutné o nich udržovat všechna data (relativně snadná možnost komprese). Zmíněná pravidelnost je též výhodou pro implementaci a rychlost prováděných analýz.

Rastrové DMT lze získat buď přímým měřením (metody fotogrammetrie, DPZ atp.) nebo odvozením od již vytvořené jiné formy DMT. Pro převod existujícího DMT buď ve formě bodů, vrstevnic, čar terénní kostry nebo z trojúhelníkové sítě se používá

interpolačních technik, které dopočítávají výšku dle zvolené metody pro aproximaci terénu. Nejjednodušší aproximací je již zmíněná lineární funkce, která však nedostatečně vystihuje změny v průběhu terénu. Věrnějších výsledků lze dosáhnout následujícími nelineárními interpolacemi (Brůha, 2016).



Obrázek 3: Každá buňka rastru má svou indikační adresu (Brůha, 2016)

3.3 METODY SBĚRU DAT

3.3.1 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ

Dálkový průzkum Země vychází ze skutečnosti, že každý fyzikální objekt jistým způsobem ovlivňuje okolní fyzikální pole a vlnění přirozeného nebo umělého původu. Sledováním jejich charakteristik je možné zjistit údaje o objektu bez přímého kontaktu s ním. Tento princip je dlouhodobě známý a využívaný. Vždyť každý z nás získává poznatky o svém okolí dálkově svým zrakem, sluchem a čichem. Existuje mnoho definic DPZ (dálkového průzkumu Země). Podle knihy Lillesanda a Kiefera (1987) je „dálkový průzkum věda a umění získání informace o objektu, oblasti nebo jevu analýzou dat získaných zařízením, které není v kontaktu se zkoumaným objektem, oblastí nebo jevem“. Pravděpodobně nejobecnější definici uvádí Charles Elachi v knize *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing* (1987): „dálkový průzkum je definován jako získávání informace o objektu bez fyzického kontaktu s ním.“ Jednoduše řečeno, dálkový průzkum Země představuje získávání informací o objektech a jevech na zemském povrchu a v dolních vrstvách atmosféry na dálku, bez přímého kontaktu s nimi. Je nutno si uvědomit, že jde také o zkoumání jevů a procesů, které zde probíhají. Data vznikají zaznamenáváním jednoho nebo několika intervalů

vlnových délek elektromagnetického záření. Výstupem jsou obrazové snímky nebo data v neobrazové podobě (př. grafy). Pro snímkování zemského povrchu se rovněž používají nosiče zařízení na snímání elektromagnetického záření. Nejčastěji jsou to letadla a družice, ale snímač může být umístěn i na pozemní stanici, nepilotovaném modelu, balónu nebo raketoplánu. Dálkový průzkum Země představuje systém, který se skládá ze dvou základních subsystémů. První tvoří sběr a přenos dat, což představuje především technickou stránku, druhý subsystém se zabývá analýzou a interpretací.

3.3.2 RTK-GPS

Tato progresivní metoda určí polohu měřeného bodu v reálném čase, tudíž není nutné následné zpracování jako tomu bylo u statické metody. Je to díky tomu, že měřická stanice je pomocí nějakého datového přenosu přímo spojena s jednou referenční stanicí, která v reálném čase zasílá korekce, které ihned opravují naměřené hodnoty, a tím zpřesní výsledné souřadnice. Aby se dosáhlo co nejlepších výsledků, měla by být anténa referenční stanice umístěna na místě pokud možno bez vedlejších odrazů a co nejvýše, aby se maximalizovalo pokrytí daty. Některé RTK (Real Time Kinematic) instalace používají přijímače s kombinací GPS (Globální polohový systém) / GLONASS (Globální družicový Navigační Systém) na referenčním a měřickém stanovišti (Luňák, 2007).

RTK měření určuje polohu pomocí fáze nosné vlny. Pro přesné určení polohy musí metoda simultánně pracovat s dalším přijímačem GPS, který je umístěn na bodě o známých souřadnicích (pokud přijímač nezískává korekce z referenční stanice znamená to, že pracuje v tzv. stand alone režimu). Pomocí radiomodemu nebo bezdrátového datového přenosu se přenáší diference z referenční stanice na měřicí stanici a ty jsou poté zpracovány metodou nejmenších čtverců kvůli určení relativních souřadnic antény přijímače (Luňák, 2007).

3.3.3 METODA LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ (LIDAR)

LiDAR je technologie dálkového průzkumu Země. Technologie LiDAR využívá k měření pulsy z laseru. Ty se používají k vytváření 3D modelů objektů, terénu a obecně celého prostředí.

Laserové skenování, nebo také LIDAR (z angl. Light Detection And Ranging) 3D prostorové laserové skenování je zcela unikátní metodou pro získávání prostorové informace o objektech. Jedná se o bezkontaktní určování prostorových souřadnic s

mimořádnou rychlostí, přesností, komplexností a bezpečností. Následuje zpracování takto získaných údajů ve specializovaných SW – prostorové modelování a vizualizace 3D modelů objektů.

3D modely jsou téměř dokonalým obrazem reality. Laserové skenery jsou schopny zachytit i ty nejdrobnější detaily. Přesnost samozřejmě záleží na typu přístroje (Mikita, 2014).

V závislosti na použitém senzoru mohou skenovací jednotky LiDAR odpalovat stovky tisíc pulzů za sekundu. Tyto světelné vlny se odrážejí od předmětů a vracejí se zpět k senzoru LiDAR. Senzor používá k výpočtu vzdálenosti (doby letu) čas, který trvá každému impulsu k návratu. Každé z těchto pulzních laserových měření nebo návratů lze zpracovat do 3D vizualizace známé jako „mračno bodů“. Takto funguje senzor LiDAR.

Údaje získané pomocí laserového skenování se používají pro sledování a analýzu nejen terénu, ale také zdravotních stavů lidí, stavebních a přírodních objektů. Laserové skenery jsou relativně nezávislé na slunečním světle, což je značnou výhodou oproti klasické fotogrammetrii. Laserové systémy lze rozdělit na letecké, pozemní a mobilní laserové skenery (Luňák, 2007).

3.3.4 PROSTOROVÁ ANALÝZA (INTERPOLACE)

Prostorová analýza je proces manipulace prostorové informace k získání nové informace a smyslu z původních dat. Obvykle se prostorová analýza provádí pomocí geografického informačního systému (GIS). GIS obvykle poskytuje nástroje prostorové analýzy pro výpočet vlastností statistik a vykonávání činností geoprocessingu jako datové interpolace. V hydrologii, budou pravděpodobně uživatelé zdůrazňovat význam analýzy terénu a hydrologického modelování (modelování pohybu vody na zemi i pod zemi). Vzhledem k vysokým nákladům a omezených zdrojů, sběr dat se obvykle provádí pouze v omezeném počtu a na vybraných místech. Prostorová interpolace z těchto bodů, může být v GISu použita k vytvoření rastrového povrchu s odhadem pro všechny buňky rastru.

K vytvoření plynulé mapy, například digitální mapa nadmořských výšek z výškových bodů měřených pomocí GPS zařízení, musí být použita vhodná metoda interpolace, pro optimální odhad hodnot v těch místech, kde nebyla provedena žádná měření.

Výsledky interpolační analýzy, pak mohou být použity pro analýzy, které pokrývají celou oblast a pro modelování (QGIS, ©2009).

3.4 ZDROJE VÝŠKOPISNÝCH DAT ČR

3.4.1 ZABAGED

Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED®) je digitální geografický model území České republiky (ČR). Výškopisnou část ZABAGED® tvoří 3 typy objektů vrstevnic se základním intervalem 5, 2 nebo 1 m v závislosti na charakteru terénu. Součástí ZABAGED® je také výškopis ve formě 3D vrstevnic a odvozeného digitálního modelu terénu - grid 10 x 10 m. Obsah datové sady ZABAGED® – výškopis – 3D vrstevnice je doplněn vybranými dalšími výškopisnými prvky – klasifikovanými hranami a body, které byly vyhodnoceny stereofotogrammetrickou metodou při zpřesňování vrstevnicového výškopisu a jsou uživatelům nabízeny k případnému dalšímu využití. Všechny objekty jsou reprezentovány troj – rozměrnou vektorovou prostorovou složkou. Polohopisná část – v současné době 123 typů geografických objektů sídel, komunikací, rozvodných sítí a produktovodů, vodstva, územních jednotek a chráněných území, vegetace a povrchu, terénního reliéfu a vybrané údaje o geodetických bodech; objekty jsou reprezentovány dvourozměrnou vektorovou prostorovou složkou a popisnou složkou, obsahující kvalitativní a kvantitativní informace o objektech (Kubátová, 2008).

3.4.2 DMR 4G

Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G) vznikl pod společným projektem „Projekt tvorby nového výškopisu České republiky“ Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (ČÚZK), Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství, jež započal v roce 2008. DMR 4G byl zpracováván pomocí leteckého laserového skenování v období 2009–2013 z průměrné výšky 1200 nebo 1400 m nad střední rovinou terénu. Pro více informací o metodách a použitých přístrojích a programech je vhodné nahlédnout do technické zprávy k DMR 4G. Samotný DMR je tvořen gridem o velikosti 5 x 5 m (Brázdil, 2012).

DMR 4G je model dodávaný ve formě pravidelné mříže (GRID) s rozlišením 5 x 5 m se střední chybou určení výšky 0,30 m v odkrytém terénu a 1,00 m v terénu pokrytém vegetací.

DMR 4G je určen k analýzám terénních poměru regionálního charakteru a rozsahu, např. Při projektování rozsáhlých dopravních a vodohospodářských záměrů, modelování přírodních jevů apod. Dosavadní ověřovací zkoušky parametrů přesnosti DMR 4G potvrzují, že garantovaná úplná střední chyba výšky tohoto generalizovaného modelu georeliéfu (0,30 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 1 m v terénech pokrytých hustou vegetací) je dosažena (ČÚZK, ©2010).

3.4.3 DMR 5G

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) vznikl taktéž v rámci stejného projektu stejných institucí jako DMR 4G. DMR 5G byl zpracováván ze stejného leteckého laserového skenování jako DMR 4G. Rozdíl je však v procesu zpracování těchto dat a také ve výsledném DMR, který není grid o velikosti buňky 5 m, ale nepravidelná trojúhelníková síť (TIN) (ČÚZK, ©2010).

DMR 5G je vytvářen z dat, která projdou po automatické filtraci detailní manuální kontrolou a editací. Finální DMR 5G je po manuální editaci odvozen ve třech krocích “vyhlazování” modelu. V prvním kroku je vybrán nejnižší bod v pravidelné mříží 1 x 1 m, čímž je zredukován počet bodů v místech styku několika bloků a je odstraněn zbytkový šum vyrovnaní měřických pásů. V druhém kroku jsou redukovány nežádoucí lokální nerovnosti (např. ornice), čímž je model vyhlazen. V třetím kroku je původní mračno bodů zředěno při dodržení stanovené střední výškové chyby. Dosavadní ověřovací zkoušky parametrů přesnosti DMR 5G potvrzují, že deklarovaná úplná střední chyba výšky tohoto mírně generalizovaného modelu reliéfu (0,18 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 0,3 m v terénech pokrytých hustou vegetací) je dosažena. Vzhledem ke značné podrobnosti je distribuovaný model DMR 5G poměrně datově objemný. S ohledem na výkonnost současného hardware se proto doporučuje zpracovávat najednou pouze úlohy lokálního charakteru. V případě zpracování větších územních celků je vhodné území rozdělit do dílčích částí. Při užívání DMR 5G je též nutné vzít v úvahu skutečnost, že se reliéf terénu mohl v období od provedení LLS i výrazně změnit, ať již v důsledku přírodních jevů nebo lidské činnosti (Beránková, 2020).

3.4.4 DMR 1G

DMP 1G neboli první verze digitální modelu povrchu představuje síť nepravidelných bodů (TIN) dostupnou v souřadnicovém systému S-JTSK Křovák EN. Přesnost je dána tím, jak dobře jsou dané objekty vymezené. Budovy dosahují hodnoty střední chyby výšky 0,4 metru. Metoda aktualizace dat z laserového skenování zatím nebyla vyvinuta, současná data pochází z let 2009 až 2013 (ČÚZK, ©2010).

Tvorbou DMR 1G je předzpracování leteckých laserových dat stejné jako v DMR 4G. Výběr reprezentativního uzlového výškového bodu pro tvorbu DMP 1G ve čtvercové síti 5x5 m a 1x1 m, opět ve dvou polygony vymezených typech oblastí v zemědělsky obhospodařovaných oblastech (polygony dle databáze LPIS) a v ostatních areálech stejně jako u DMR 5G.

Interpolace výškového modelu terénu v oblastech neobsahujících naměřená data stejně jako u DMR 5G. Zjednodušení modelu reliéfu při zachování maximální úplné výškové chyby.

Distribuovaný model DMP 1G je poměrně datově objemný. Při užívání DMP 1G je též nutné vzít v úvahu skutečnost, že jak terénní reliéf, tak i výška staveb a rozsah vzrostlé vegetace se mohly v období od provedení LLS i výrazně změnit, ať již v důsledku přírodních jevů nebo lidské činnosti (Beránková, 2020).

3.4.5. GLOBÁLNÍ DIGITÁLNÍ MODELY TERÉNU

Globální digitální modely terénu (GDEM) jsou digitální modely terénu velkého rozsahu. Obvykle pokrývají buď téměř celý svět nebo jeho velkou část (narozdíl např. od DMR5G, který je omezen jen na území České republiky). Jsou získávány metodami dálkového průzkumu Země. Kromě globálního pokryvu Země je další výhodou i fakt, že tyto GDEM jsou často volně ke stažení, čímž se vyhneme nákladnému pořizování dat. Nevýhodou je jejich hrubší rozlišení a všeobecná nižší přesnost; předmětem mnoha studií jsou jejich validace.

Prvním publikovaným GDEM byla datová sada Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), podrobná dokumentace viz Farr et al. (2007). Jde o radarový digitální model povrchu (DSM), tedy model povrchu Země včetně vegetace, budov a dalších artefaktů. Jeho originální rozlišení bylo 3 úhlové sekundy, což odpovídá cca 90 x 90 m na rovníku. Pak z něj byly odvozeny další GDEMs: MERIT DEM (Yamazaki et al. (2017), Copernicus DEM GLO30 (ve verzi v2020-02 od Airbus, 2020), CoastalDEM

(Kulp and Strauss, 2019). Radarové GDEMs jsou dále také TanDEM-X (Rizzoli et al., 2017), NASADEM v1 (Crippen et al., 2016).

FABDEM (Hawker et al., 2022) a již zmíněný CoastalDEM v 2.1 (Kulp and Strauss, 2019) jsou výsledkem kombinace machine-learning algoritmu/filtrace radarových dat a optických dat ICESat-2 (spaceborn LiDAR data), kde ICESat-2 se používá k eliminaci vegetace, tedy ke transformaci DSM na digitální model terénu (DTM) mapující holý povrch Země zbavený vegetace, budov a dalších artefaktů. ICESat-2 ATL03 a ATL08 a GEDI jsou mise, jejichž výsledkem jsou optická data – spaceborn LiDAR.

3.5 INTERPOLAČNÍ METODY

3.5.1 IDW

Interpolace s Inverse distance weighted (inverzní vážená vzdálenost) určuje hodnoty buněk pomocí lineárně vážené kombinace sady bodů vzorku. Interpolovaný povrch by měl být povrch lokálně závislé proměnné. Tato metoda předpokládá, že vliv mapované proměnné klesá se vzdáleností od místa odběru vzorků.

Mimoto IDW se spoléhá hlavně na inverzní vzdálenost umocněnou na matematickou mocninu. Parametr Power umožňuje řídit význam známých bodů na interpolovaných hodnotách na základě jejich vzdálenosti od výstupního bodu.

Takže IDW má možnost používání bariér. Bariéra je datová sada křivky používaná jako linková čára, která omezuje vyhledávání vstupních vzorových bodů. Křivka může představovat útes, hřeben nebo jiné přerušení v krajině. V úvahu budou brát pouze vstupní vzorkové body na stejné straně bariéry jako současná zpracovatelská buňka (ArcGIS Help, ©2022).

3.5.2 SPLINE

Nástroj Spline používá interpolační metodu, která odhaduje hodnoty pomocí matematické funkce, která minimalizuje celkové zakřivení povrchu, což vede k hladkému povrchu, který přesně prochází vstupními body. Jednoduše řečeno spline je interpolace vektorových dat metodou minimální křivosti (Klimánek, 2007).

Základní technika minimálního zakřivení se také označuje jako interpolace tenkých desek. Zajišťuje hladký (spojitý a diferencovatelný) povrch spolu se spojitými povrchy prvních derivací. V blízkosti datových bodů může dojít k rychlým změnám gradientu

nebo sklonu. Existují dva typy spline: Regularized a Tension. Typ Regularized vytváří hladký, postupně se měnící povrch s hodnotami, které mohou ležet mimo rozsah vzorových dat. Typ Tension řídí tuhost povrchu podle charakteru modelovaného jevu. Vytváří méně hladký povrch s hodnotami, které jsou více omezeny rozsahem dat vzorku (ArcGIS Help, ©2022).

3.5.3 KRIGING

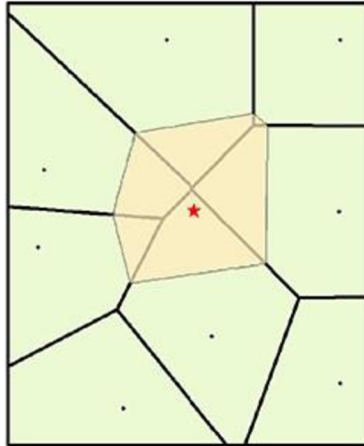
Nástroje IDW (inverzní vážená vzdálenost) a Spline interpolace jsou označovány jako deterministické interpolační metody, protože jsou přímo založeny na okolních naměřených hodnotách nebo na specifikovaných matematických vzorcích, které určují hladkost výsledného povrchu. Druhá rodina interpolačních metod se skládá z geostatistických metod, jako je kriging, které jsou založeny na statistických modelech, které zahrnují autokorelaci - tj. Statistické vztahy mezi měřenými body. Z tohoto důvodu mají geostatistické techniky nejen schopnost vytvářet predikční povrch, ale také poskytují určitou míru jistoty nebo přesnosti předpovědi.

Kriging je pokročilý geostatistický postup, který generuje odhadovaný povrch z rozptýlené sady bodů s hodnotami z . Na rozdíl od jiných interpolačních metod v sadě nástrojů Interpolace efektivní použití nástroje Kriging zahrnuje interaktivní zkoumání prostorového chování jevu reprezentovaného hodnotami z před výběrem nejlepší metody odhadu pro generování výstupní plochy (ArcGIS Help, ©2022).

3.5.4 METODA PŘIROZENÉHO SOUSEDA (NATURAL NEIGHBOUR)

Interpolace přirozeného souseda najde nejbližší podmnožinu vstupních měřených bodů k interpolované lokalitě a aplikuje na ně váhy založené na proporcionálních oblastech pro interpolaci hodnoty (Sibson, 1981). Metoda přirozeného souseda využívá pro určení vah Thiessenovy polygony. Vložení interpolovaného bodu do sítě Thiessenových polygonů způsobí její přebudování v okolí tohoto bodu (obrázek 4). Nyní máme dvě sítě polygonů – původní a novou, která vznikla přidáním určovaného bodu. Polygon nového bodu překrývá určité části původních polygonů známých bodů. Tyto body, kterým se říká přirození sousedé, budou zahrnuty do interpolace bodu nového. Váhy přirozených sousedů jsou plochy, které jsou odděleny z původních polygonů jednotlivých sousedů.

Metoda je velice efektivní, pokud jsou měřené hodnoty umístěny pravidelně. Výsledná struktura modelovaného jevu je spojitá a vyhlazená, bez extrapolovaných hodnot (Křikavová, 2009).



Obrázek 4: Příklad Thiessenového mnohoúhelníku vytvořeného kolem interpolačního bodu (ArcGIS Help)

3.5.5 TOPO TO RASTER

Topo to raster je specifickou metodou programu ArcGIS, která je určena pro tvorbu hydrologicky korektního digitálního modelu terénu. Metoda je založena na programu ANUDEM verze 4.6.3. Je modifikací metody spline TPS, přičemž dovoluje modelovat náhlé změny povrchu. Topo to raster je metoda, která používá iterativní způsob výpočtu. Je optimalizována tak, aby byla výpočetně účinná jako lokální interpolační metody (např. IDW) a zároveň aby výsledný povrch neztratil spojitost, jakou mají globální interpolační metody (např. spline) (Křikavová, 2009).

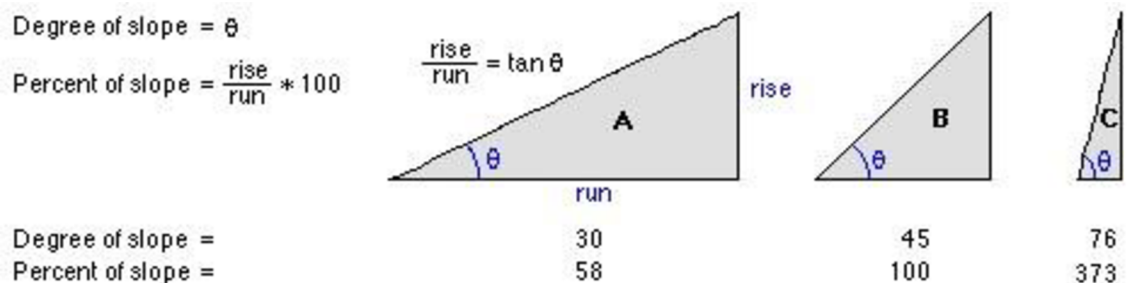
Voda je primární erozivní silou určující obecný tvar většiny krajiny. Z tohoto důvodu má většina krajiny mnoho kopců (místní maxima) a málo propadů (místní minima), což vede k propojenému odvodňovacímu vzoru. Topo to Raster využívá tuto znalost povrchů a klade omezení na interpolační proces, který vede k propojené odvodňovací struktuře a správnému zobrazení hřebenů a potoků. Tato uložená podmínka odvodnění vytváří povrchy s vyšší přesností s menším množstvím vstupních dat (ArcGIS Help, ©2022).

3.5.6 SKLON (SLOPE)

Sklon svahů patří, stejně jako orientace svahů, mezi analýzy modelů terénu. Jeho výsledkem je číslo udávající poměr převýšení k určité vzdálenosti neboli míra změny souřadnice z v rastru (například výškový model). Pro každou buňku se určí sklon jako maximální míra změny hodnot mezi touto buňkou a jejími sousedy. Je možné počítat buď přímé sousedy (pouze 4), nebo i sousedy diagonální (celkem 8). Ve většině případů se počítá se všemi osmi sousedními buňkami, protože tato metoda dává přesněji výsledky. Zjednodušeně se počítá velikost průměrného převýšení sousedních buněk vůči buňce aktuální (Hupšil, 2008)

Pro triangulovanou nepravidelnou síť (TIN) se jedná o maximální gradient změny výšky v každém trojúhelníku (ArcGIS). Tato funkce se nepočítá lokálně ale fokálně, je nutné řešit počítání u okrajů rastru. To lze řešit buď tak, že hodnota stoupání na okraji se vynechá úplně, nebo se vypočte průměr tak, že hodnota buněk, které neznáme, se nastaví na stejnou hodnotu, jako má buňka ve středu matice 3x3. Obě metody se chovají podivně a na okrajích rastrů vznikají hodnoty, které neodpovídají realitě, což je při pohledu na rastr okamžitě vidět (obarvený rastr jasně ukáže, že tyto hodnoty se velmi liší od vedlejších hodnot a vzniká tak viditelný okraj) (Hupšil, 2008).

Vypočítání sklonu. Rastr výstupního sklonu lze vypočítat ve dvou typech jednotek, stupních nebo procentech (procentní nárůst). Procentuální nárůst lze lépe porozumět, pokud jej uvážíte jako převýšení dělené vodorovnou vzdáleností vynásobený 100. Zvažme trojúhelník B níže. Když je úhel 45 stupňů, převýšení se rovná vodorovné vzdálenosti a procento stoupání je 100 procent. Když se úhel sklonu blíží vertikále (90 stupňů), jako v trojúhelníku C, procentuální sklon se začíná blížit nekonečnu (obrázek 5 porovnání hodnot sklonu).



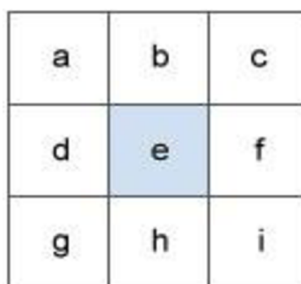
Obrázek 5: Porovnání hodnot sklonu ve stupních versus procenta (ArcGIS Help)

3.6 METODY ZÍSKÁNÍ SKLONU

Pro výpočet sklonu jsou k dispozici dvě metody. Můžete si vybrat mezi prováděním planárních nebo geodetických výpočtů.

Pro **planární metodu** se sklon měří jako maximální rychlost změny hodnoty od buňky k jejím bezprostředním sousedům. Výpočet se provádí na promítnuté ploché rovině pomocí 2D kartézského souřadnicového systému (Cartesian coordinate system). Hodnota sklonu se vypočítá pomocí odhadu konečného rozdílu třetího řádu (ArcGIS Help, ©2022).

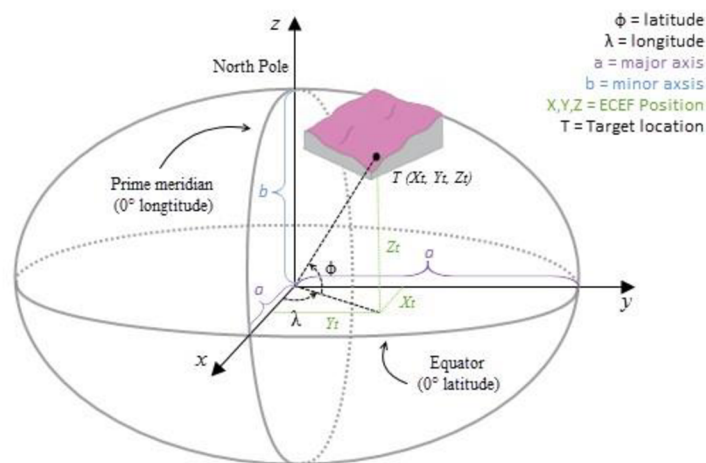
Sklon se vypočítá jako rychlost změny (delta) povrchu v horizontálním (dz/dx) a vertikálním (dz/dy) směru od středové buňky ke každé sousední buňce (obrázek 6). Hodnoty středové buňky a jejích osmi sousedů určují horizontální a vertikální delty. Sousedé jsou identifikováni jako písmena od *a* do *i*, přičemž *e* představuje buňku, pro kterou se vypočítává sklon.



Obrázek 6: Okno skenování povrchu (Mademlis, 2021)

Pomocí geodetické metody bude výpočet proveden v 3D kartézském souřadnicovém systému (Cartesian coordinate system) s uvažováním tvaru země jako elipsoidu. Hodnota sklonu se vypočítá změřením úhlu mezi topografickým povrchem a referenčním datem.

Geodetická metoda měří sklon v geocentrickém 3D souřadnicovém systému - nazývaném také souřadnicový systém ECEF (Earth Centered, Earth Fix) - tím, že považuje tvar Země za elipsoid. Výsledek výpočtu nebude ovlivněn tím, jak se datová sada promítá. Geodetická metoda vytváří přesnější sklon než rovinná metoda. Obrázek číslo 7 znázorňuje geodetickou metodu výpočtu sklonu.



Obrázek 7: Plošný rastr je transformován ze vstupního souřadnicového systému do 3D geocentrického souřadnicového systému

Planární i geodetické výpočty se provádějí pomocí sousedství 3 x 3 buňky. Pokud je v každé okolní buňce okolo středové buňky hodnota NoData, výstup je NoData.. Výpočet také vyžaduje, aby alespoň sedm buněk sousedících s buňkou zpracování mělo platné hodnoty. Pokud existuje méně než sedm platných buněk, výpočet se neprovede a výstupem v této buňce zpracování bude NoData. Buňky v nejvzdálenějších řádcích a sloupcích výstupního rastru budou NoData. Je to proto, že podél hranice vstupní datové sady tyto buňky nemají dostatek platných sousedů (ArcGIS Help, ©2022).

Studie sklonu zahrnuje kromě rozpoznání místa a volby mechanických charakteristik zeminy i stabilní výpočet pro určení zaprvé křivky porušení, podél níž je riziko skluzu nejvyšší, zadruhé odpovídající hodnoty bezpečnostního faktoru (Chang, 2002).

4 METODIKA

4.1 ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

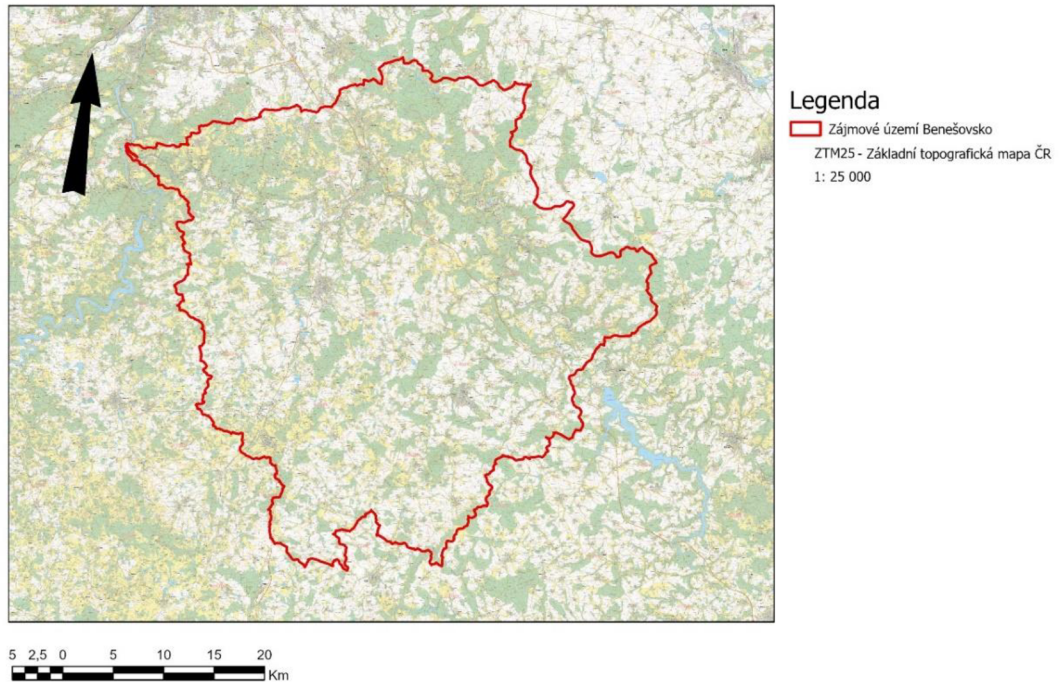
Jako zájmové území byly vybrány dvě oblasti, které se vzájemně liší podstatou terénu: první oblastí je pahorkaté Benešovsko, druhou pak rovinnaté Nymbursko (obrázky 8 a 9). Důvodem takové volby je co největší rozmanitost srovnávaných sklonitostních poměrů.

4.1.1 Benešovsko

První zájmové území, pracovní nazvané jako „Benešovsko“, je vymezeno povodním III. řádu s číslem hydrologického pořadí 1-09-03. Nachází se ve Středočeském kraji, rozkládá se v jeho jihovýchodní části. Rozloha oblasti je 1 558 km². Obrázek 8 znázorňuje zobrazení území Benešovsko.

Krajina Benešovska by se pro svůj charakter dala označit jako „typicky česká“. Najdeme zde mírně zvlněnou pahorkatinu s nadmořskými výškami od 200 do 700 m, většina území se však nachází v nadmořské výšce přibližně 350–550 m. Nápadnou dominantou krajiny je pověstmi opředená hora Blaník (632 m) nad obcí Louňovice pod Blaníkem. Nejvyšší oblastí okresu je tzv. Česká Sibiř v jeho jižní části (mezi Voticemi a Meznem). V této oblasti najdeme také nejvyšší bod okresu – Mezivrata (713 m) s televizním vysílačem. K Benešovsku také částečně patří členité údolí Vltavy – konkrétně část východních břehů vodní nádrže Slapy. Mimoto oblast spadá do povodí III. Řádu. Na území Benešovsko protéká několik vodních tocích, jako Sázava, Blanice. Sázava odvodňuje část Českomoravské vrchoviny a severní oblast Středočeské pahorkatiny. Vodáci a trampové ji často nazývají Zlatá řeka. Délku toku v našem území má přibližně 60 kilometrů ve východo-západním směru. Hydrologické pořadí řeky Sázava je 1-09-01-001. Blanice, označovaná též jako Vlašimská Blanice, je řeka protékající převážně Středočeským krajem. Je to největší přítok řeky Sázavy v našem zájmovém území, který má délku toku zhruba 30 kilometrů. Hydrologické pořadí řeky Sázava je 1-09-03-022.

Zobrazení zájmového území Benešovska.

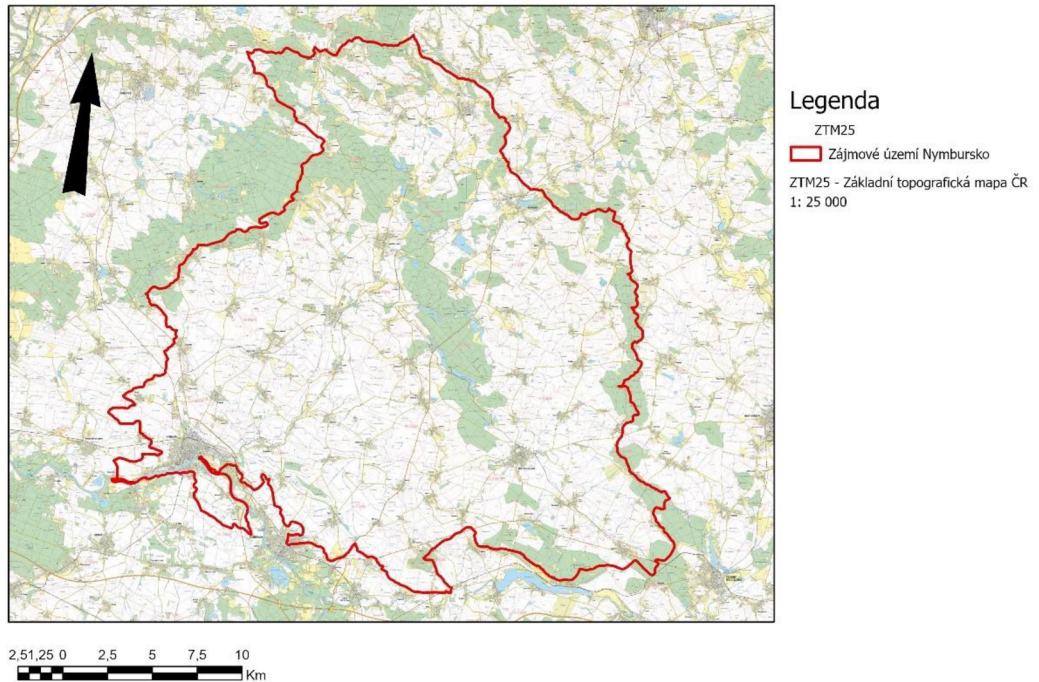


Obrázek 8: Zobrazení zájmového území Benešovska

4.1.2 Nymbursko

Druhé zájmové území, nazvané pracovníě jako „Nymbursko“, je hydrologicky vymezeno povodím III. řádu 1-04-05. Nachází se ve východní části Středočeském kraji. Obrázek 9 zobrazuje území Nymborsko. Rozloha zájmové oblasti je 582 km². Povrch oblasti je převážně rovinný, větší část se nachází v nížině Labe. Území má ráz ploché pahorkatiny, tvořené horninami svrchní křída a místy jejich odkrytého krystalinického, proterozoického a permského podloží. Představuje erozně až strukturně denudační a akumulací relíef plošinného, kotlinného a ploše pahorkatinného rázu se zarovnanými povrchy, suky, říčními terasami, údolními nivami a tvary na spraších a vátých píscích. Na území Nymbursko protéká několik vodních tocích, hlavním je Labe kousek na jihu a přítok Mrlina. Mimoto na území protéká mnoho menších vodních toků: potok Štítarský, Seletický, Leděčský, Záhornický, Křenická Blatnice, Velenický potok atd. Délka řeky Labe v zájmovém území je 5 kilometrů na jihu města Nymburk. Délka řeky Mrlina v zájmovém území přibližně činí 30 kilometrů, teče v severovýchodním směru.

Zobrazení zájmového území Nymburska.



Obrázek 9: Zobrazení zájmového území Nymburska

4.2 POPIS VSTUPNÍCH DATOVÝCH ZDROJŮ DMT

V této práci je využívána jedna datová výškopisná sada. Jedná se o digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G), který bude představen v několika variantách prostorového rozlišení: 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 30 m, 90 m.

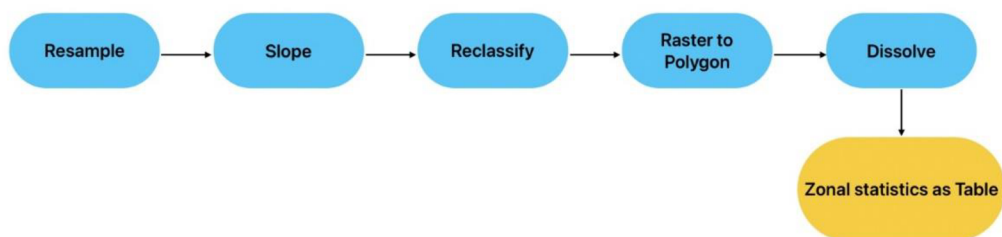
4.2.1 DMR 5G.

Základní sadou v této práci byl rastr DMR s rozlišením 1x1 m. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu.

Pro tuto práci pomocí funkce Resample jsem modifikoval DMR s rozlišením 1x1 do dalších pěti variant: 2x2, 5x5, 10x10, 30x30, 90x90 m.

4.3 PREPROCESSING DAT

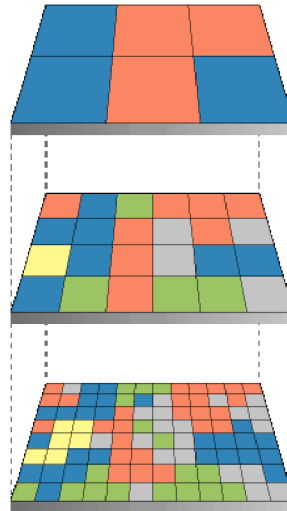
Metodický postup práce s výškovými daty shrnuje grafické schéma na obrázku 10. V prvním kroku byla použita funkce Resample, pomocí které byla vstupní datová sada DMR5G převedena do šesti variant s různým prostorovým rozlišením. V následujícím kroku byla na všechny varianty DMR aplikována funkce Slope pro vyhodnocení sklonitosti území. Ve třetím kroku byl sklon vyhodnocen, a to v rámci jednotlivých výškových pásem. Pro tento účel byly postupně aplikovány funkce Reclassify, Raster to Polygon, Dissolve a nakonec Zonal Statistics as Table; jak bude popsáno níže.



Obrázek 10: Grafický schémat procesu

4.3.1 RESAMPLE

Funkce Resample Změní prostorové rozlišení rastrové datové sady a nastaví pravidla pro agregaci nebo interpolaci hodnot napříč novými velikostmi obrazových bodů. Vstupem do této funkce byla datová sada DMR5G (její popis je uveden v kapitole 3.4.1). Postupně byla vstupní datová sada s rozlišením 1x1 m převedena do pěti dalších variant s prostorovým rozlišením 2x2, 5x5 10x10, 30x30 a 90x90 m. Tato funkce je užitečná pro převod rastrových datových sad a mozaikových datových sad na běžnou velikost pixelů nebo projekci (obrázek 11) (GISGeography, ©2022).



Obrázek 11: Změna velikosti buněk pomocí Resample (ArcGIS Help)

4.3.2 RECLASSIFY

Nástroj Reclassify byl použit pro výběr a vymezení oblastí spadajících do výškových pásem a bylo to určeno za účelem analýzy sklonů v těchto výškových pásmech, důvodem tohoto rozdělení do výškových pásem je hypotéza, že sklon terénu bude mít jiné vlastnosti v nížinách (reprezentovaných výškovými pásmy 100–200 m n. m., 200–300 m n. m.) a jiné v pahorkatinách (pásma nad 500 m n. m.). Reclassify (reklasifikace) slouží pro nahrazení hodnot buněk vstupního rastru novými hodnotami. Jedná se o selekci a klasifikaci buněk, které splňují podmínku kladenou na jejich atributové hodnoty (obr. 11). Lze tím dosáhnout například sloučení původních kategorií buněk do kategorií nových. Reklasifikační funkce mění hodnoty buněk použitím různých metod.

Přiřazení nových hodnot buňkám se provádí na základě reklasifikační tabulky. Ta může obsahovat některé nebo všechny možné hodnoty buněk v rastru, případně může slučovat několik původních hodnot do jedné nové. Takto lze dosáhnout záměny konkrétních hodnot za jiné (Hupšil, 2008).

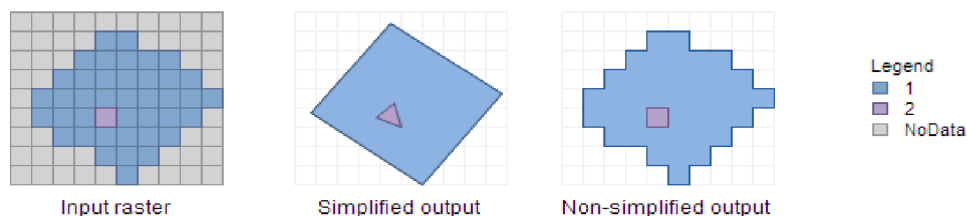
Pomocí reklasifikaci rastrové mapy vznikají nová rastrová data na základě interpretace původních hodnot rastrových buněk. V rámci této bakalářské práce byl nástroj Reclassify použit pro výběr a vymezení oblastí spadajících do předem definovaných výškových pásem. Pásma byla stanovena jako intervaly 100–200 m n. m., 200–300 m n. m. atd (tabulka 1).

Tabulka 1: Příklad reklasifikaci

Č. pásma	Interval (m n. m.)	Reklasifikovaná hodnota (třídní znak, m n. m.)
1	100-200	150
2	200-300	250
3	300-400	350
4	400-500	450
5	500-600	550
6	600-700	650

4.3.3 RASTER TO POLYGON.

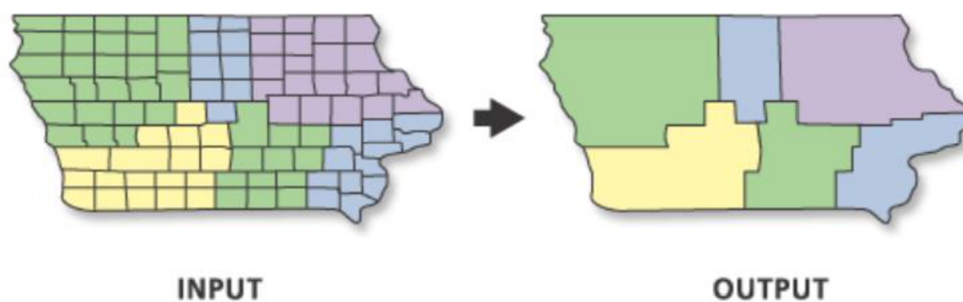
Funkce Raster to Polygon byla použita pro účely převedení výškových pásem vymezených funkcí Reclassify v rastrovém formátu do formátu vektorového (obrázek 12). Výšková pásma je totiž nezbytné mít vymezena vektorově, a to z důvodu následujícího zpracování dat.



Obrázek 12: Porovnání výstupu (ArcGIS Help)

4.3.4 DISSOLVE

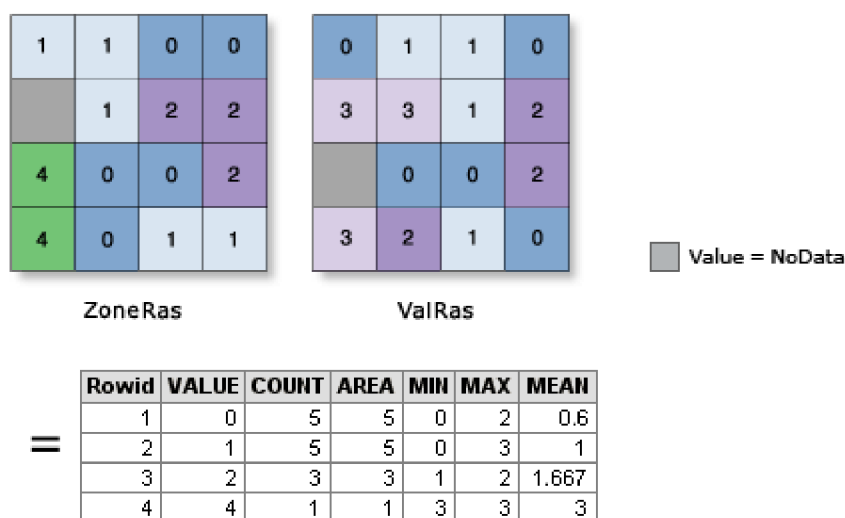
Nástroj Dissolve byl použit za účelem sloučení stejných reprezentativních hodnot, které byly vytvořeny v předchozím kroku s pomocí funkce Raster to Polygon. Dissolve – sloučí prvky vstupní vrstvy na základě shodné hodnoty vybraného atributu a vytvoří novou vrstvu. Vstupní vrstva může být bodová, liniová nebo polygonová, výstupní vrstva bude vždy stejného typu geometrie jako vrstva vstupní (ArcGIS Help, ©2022). Výsledek aplikace funkce Dissolve je patrný z obrázku 13.



Obrázek 13: Princip funkce Dissolve. (ArcGIS Help).

4.3.5 ZONAL STATISTICS AS TABLE

Funkce Zonal Statistics as Table umožňuje nám zjistit informace (výsledky) sklonitosti ve výškových pásmech ve formě atributové tabulky. Zonal Statistics as Table byl použit na základě vstupní vrstvy sloučených polygonů (Dissolve), poté pomocí hodnotové vrstvy (Slope) a na základě vytvořených výškových pásem přes reklasifikací (Reclassify). Na obrázku 14 je vidět, jak se rozkládá informace rastru do tabulky (ArcGIS Help, ©2022).



Obrázek 14: Ukázka výsledné tabulky z funkce Zonal Statistics as Table. (ArcGIS Help)

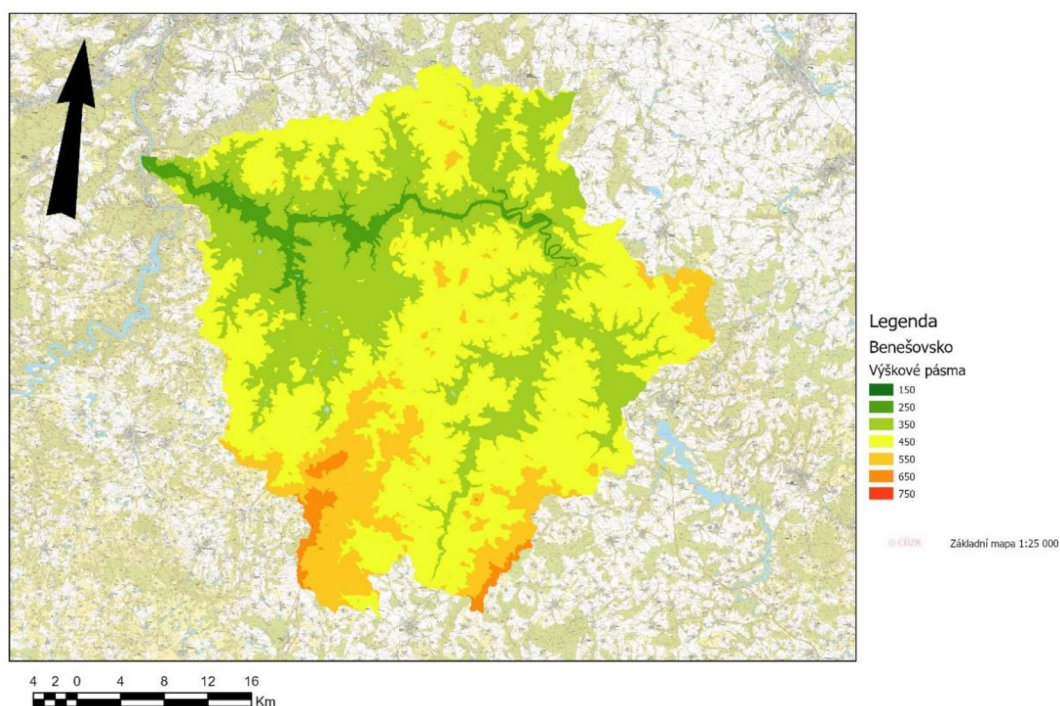
5 VYSLEDKY

Na počátku této kapitoly budou prezentovány digitální modely terénu obou zájmových lokalit, jejichž podrobnost byla prostřednictvím odvozeného sklonu analyzována. V další části budou zobrazeny rastry sklonu a v poslední části bude uvedena popisná statistika se zobrazením histogramů rastrů sklonitosti dle příslušných rozlišení.

5.1 VÝŠKOPIS ZÁJMOVÝCH OBLASTÍ

Vstupem této práce byly digitální modely terénu (DMT) Benešovska a Nymburska pro analýzu a zhodnocení vlivu podrobnosti (prostorového rozlišení gridu) digitálního modelu terénu na sklonitost terénu (viz obrázky 31-32 v příloze 2). Území lze vidět na obrázku 15 a 16 s rozdělením do výškových pasem.

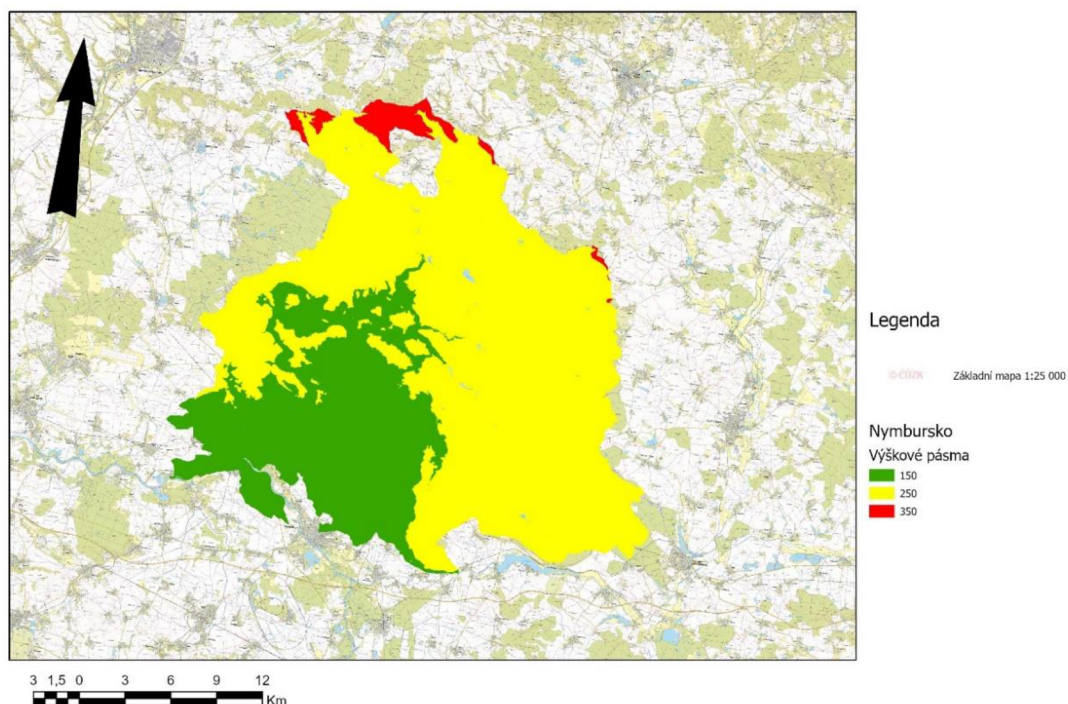
Rozdělení do výškových pásem Benešovsko.



Obrázek 15: Výšková pásma Benešovska (hodnoty v legendě reprezentují střední hodnoty výškových intervalů a jsou uvedeny v m n. m.)

Najdeme v oblasti Benešovska mírně zvlněnou pahorkatinu s nadmořskými výškami od cca 100 do cca 800 m, Většina území se však nachází v nadmořské výšce přibližně 350–550 m. Nejvýše položené polohy se nachází na jihu území. Nejnižší položené území se nachází podél řeky Sázavy.

Rozdělení do výškových pásem Nymbursko.



Obrázek 16: Výšková pásma Nymburska (hodnoty v legendě reprezentují prostřední hodnoty výškových intervalů a jsou uvedeny v m n. m)

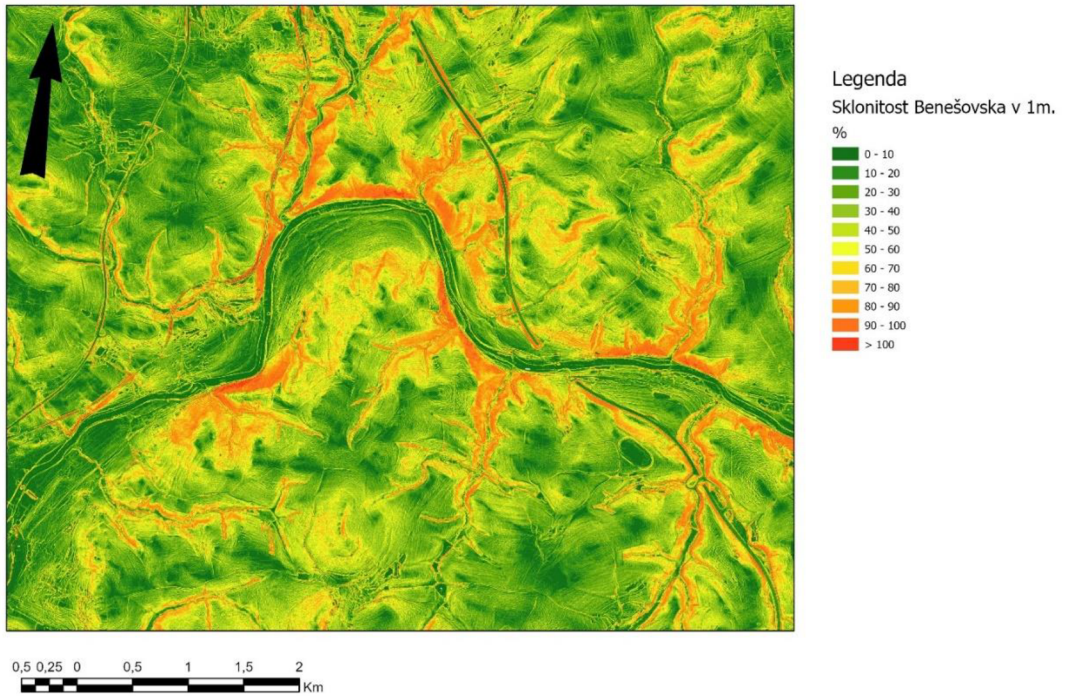
Povrch oblastí Nymburk je převážně rovinatý, nejvyšší polohy se nachází na severu oblasti. Nejnižší naopak kolem města Nymburk, kde protéká řeka Labe.

5.2 SKLONITOSTNÍ POMĚRY

V této bakalářské práci vstupem byly postupně zmíněné čtyři sady DMR v podrobném rozlišení, lišící se rozlišením pixelů ve variantě 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, a DMR s hrubším rozlišením 30 m a 90 m. Tyto varianty zobrazují sklon terénu v rastrové formě s příslušným prostorovým rozlišením definujícím podrobnost dat.

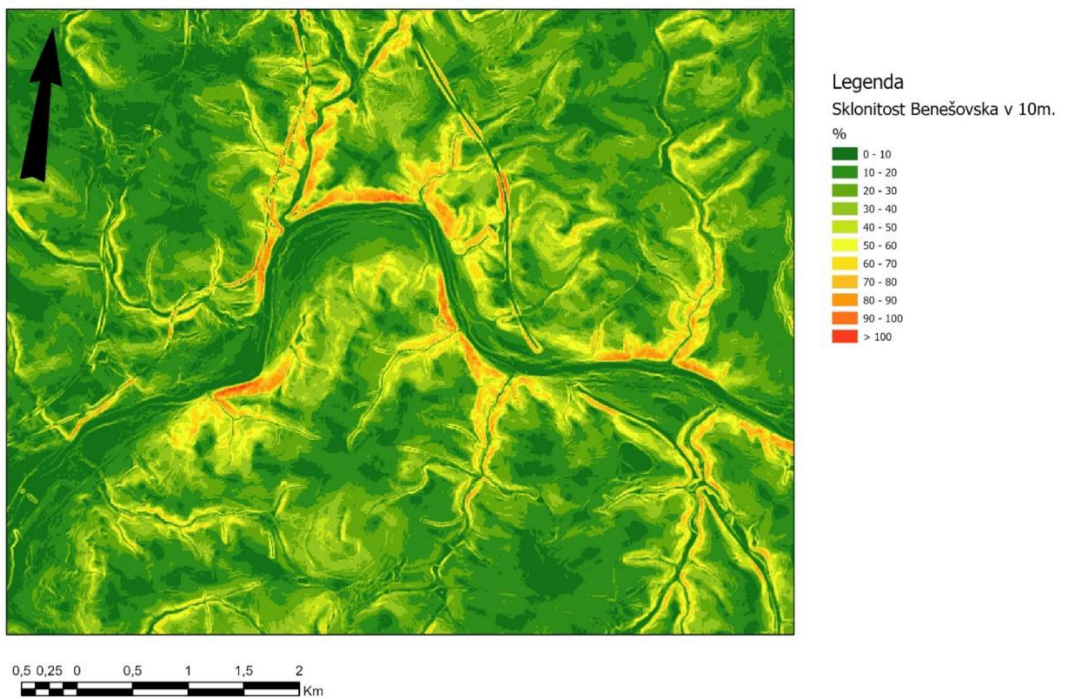
Následující obrázky 17 a 18 znázorňují pro lepší názornost pouze vybranou část zájmového území Benešovska v rozlišení 1 a 10 m. Mapy znázorňující rozlišení ve variantě 2 m, 5 m se nacházejí v příloze 3 (viz obrázky 33-34).

Zobrazení sklonitosti území Benešovska.



Obrázek 17: Vybraná část území pro lepší názornost sklonitosti v rozlišení 1 m

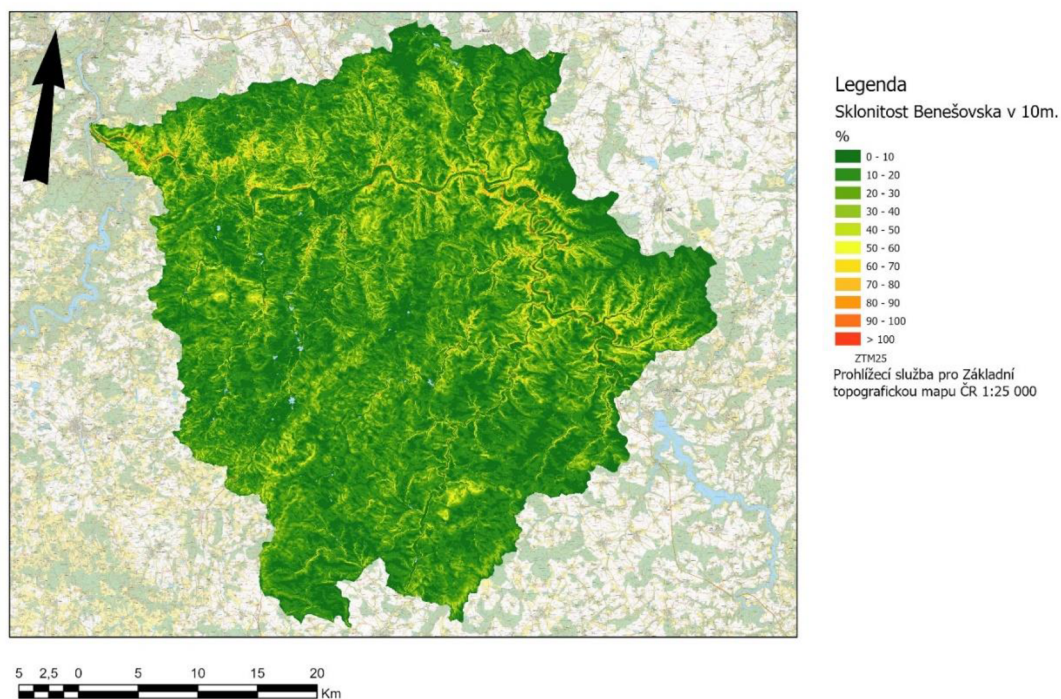
Zobrazení sklonitosti území Benešovska.



Obrázek 18: Vybraná část území pro lepší názornost sklonitosti v rozlišení 10 m

Na první pohled lze na mapách vidět, že u podrobného rozlišení jsou více zastoupeny vyšší hodnoty sklonů. Následující mapa číslo 19 zobrazuje celé zájmové území v malém měřítku s rozlišením 10 metrů.

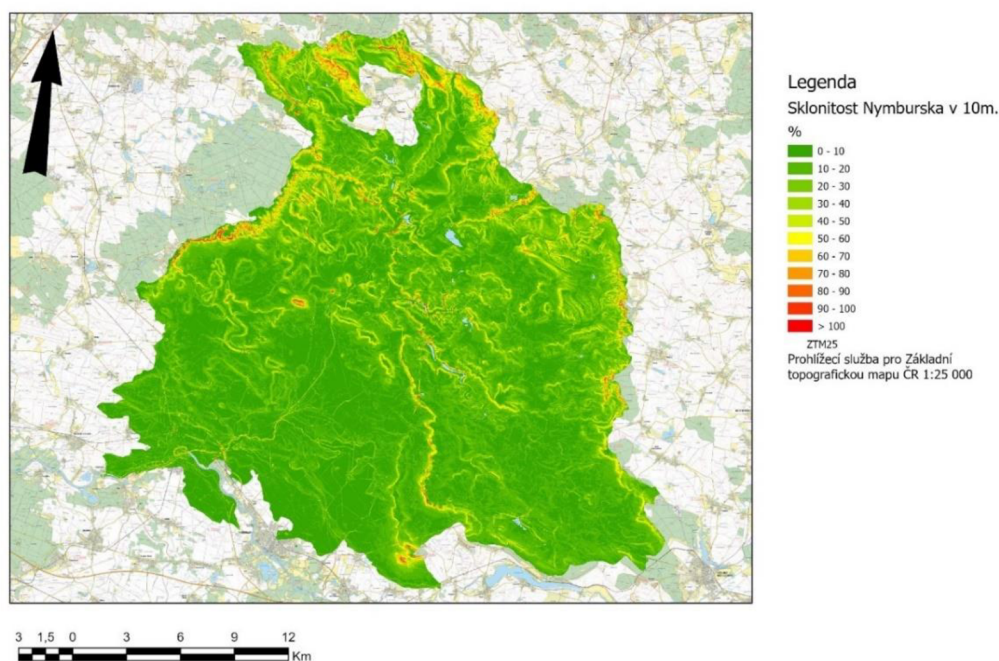
Zobrazení sklonitosti území Benešovska.



Obrázek 19: Zobrazení mapy v rozlišení 10 metrů v malém měřítku

Pro Nymbursko vstupem bylo také postupně zmíněných šest sad DMR lišících se rozlišením pixelů v 1, 2, 5, 10, 30, 90 metrů. Mapy znázorňující rozlišení ve variantě 1 m, 2 m, 5 m, 10 m se nacházejí v příloze 3, kde rozlišení 1 m a 10 m znázorňují pouze vybranou část zájmového území Nymburska (viz obrázky 35-38). Dále obrázek 20 zobrazuje rozlišení v 10 m ve malém měřítku.

Zobrazení sklonitosti území Nymburska.

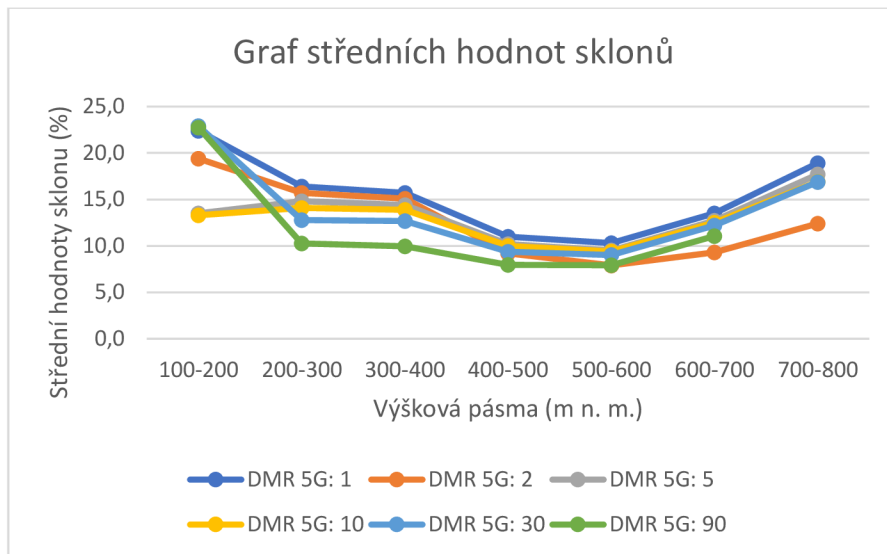


Obrázek 20: Zobrazení mapy v rozlišení 10 metrů v malém měřítku

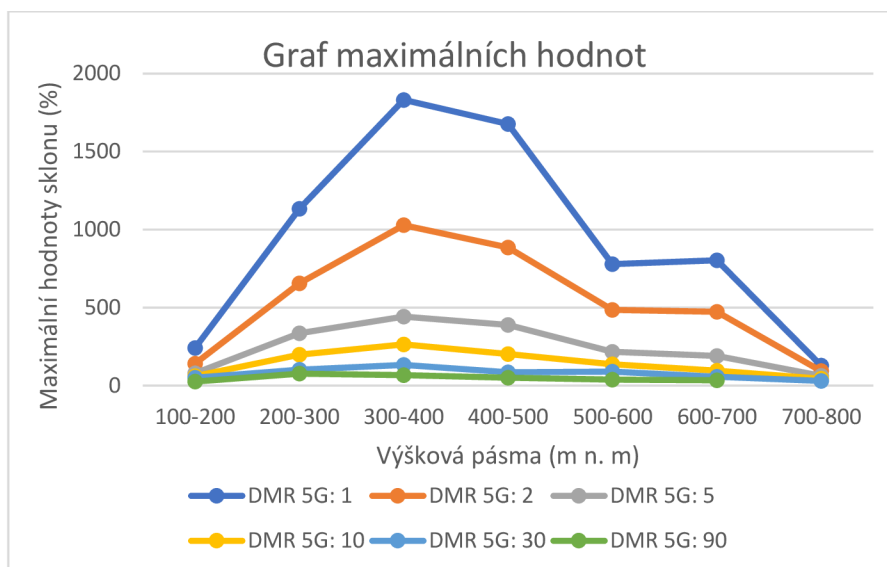
5.3 ANALÝZA SKLONŮ

Analýza sklonu byla provedena pro výše uvedená rozlišení (1, 2, 5, 10, 30, 90 m) v rámci výškových pásem definovaných v tabulkách 2 až 13 užitím popisné statistiky. Pro lepší názornost a rozdíl hodnot sklonu v různých rozlišeních byly vytvořeny grafy středních, maximálních, minimálních hodnot a směrodatné odchylky. Na následujících obrázcích 21–24 jsou zobrazeny hodnoty sklonu (osa y) pro jednotlivá výšková pásma (osa x) pro Benešovsko a na obrázcích 25–28 pro Nymbursko. Veškeré ukazatele popisné statistiky jsou uvedeny také v tabulkách 2 až 13.

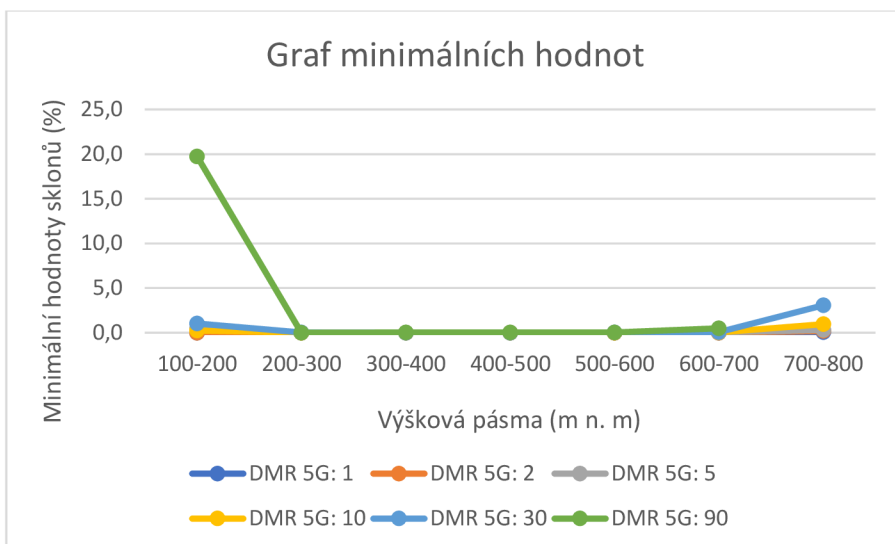
Benešovsko



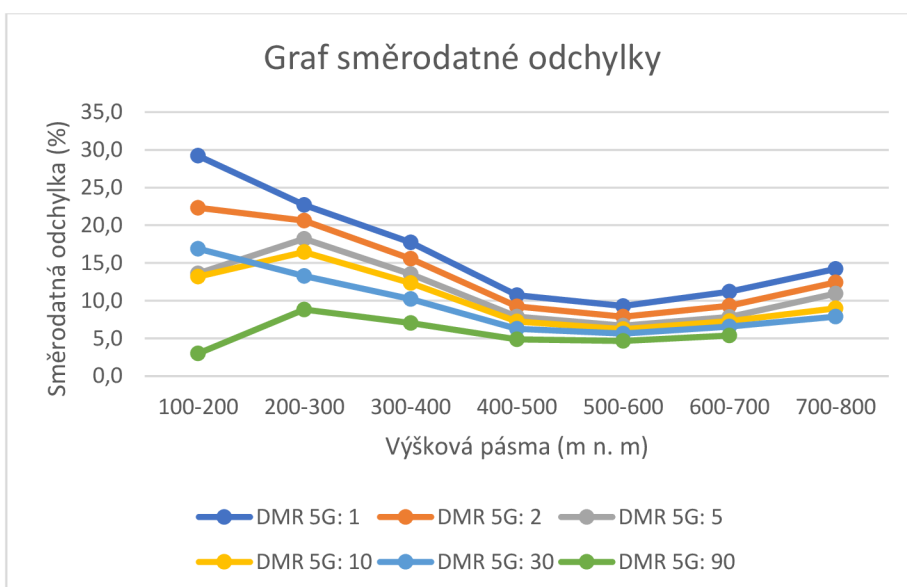
Obrázek 21: Střední hodnota sklonu Benešovska



Obrázek 22: Maximální hodnota sklonu Benešovska



Obrázek 23: Minimální hodnota sklonu Benešovska



Obrázek 24: Směrodatná odchylka Benešovska

Na první pohled lze vidět, že rastr sklonu odvozený z DMT s nejpodrobnějším rozlišením (1 m) nabývá nejvyšších průměrných hodnot (obrázek 21) napříč všemi výškovými pásmy. Obdobně je tomu také v případě maximálních sklonů (obrázek 22) a směrodatných odchylek sklonu (obrázek 24).

Vzájemné rozdíly hodnot průměrných sklonů (obrázek 21) mezi jednotlivými rozlišeními rastrů napříč všemi výškovými pásmy se pohybují v menších jednotkách procent, zpravidla do 6 % sklonu, relativně jde až o 35% rozdíl (např. pro výškové pásmo 300–400 m n. m. je průměrný sklon rastru s rozlišením 1 m 15,7 %, zatímco u rastru s rozlišením 90 m je průměrný sklon jen 10,0 %).

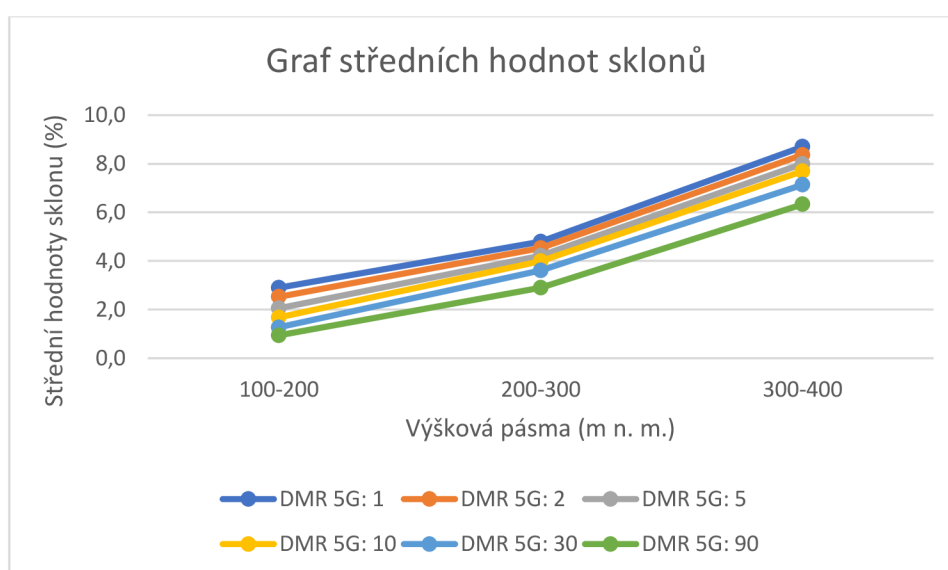
U maximálních hodnot sklonů (obrázek 22) jsou rozdíly mnohem markantnější: posuneme-li se z 90m na 30m rozlišení, maximální sklon vzroste zhruba 2krát napříč všemi výškovými pásmy. Obdobně je tomu při přechodu ze 30m a na 10m rozlišení atd.

Z grafů maximálních hodnot sklonů (obrázek 22) a minimálních hodnot (obrázek 23) lze dále vyčíst i rozsahy hodnot, kterých sklony v jednotlivých rozlišeních nabývají. Lze konstatovat, že se snižujícím se rozlišením rastrů se snižuje i rozsah hodnot, a to poměrně markantně. Lépe toto dokumentují histogramy na obrázcích 29 až 30. S tím korespondují i směrodatné odchylky.

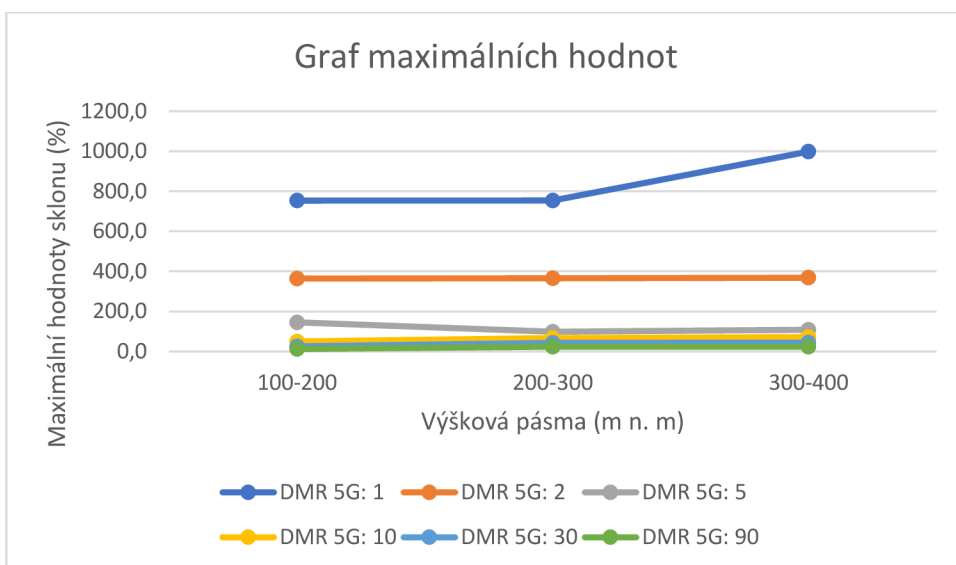
V případě minimálních sklonů není situace na první pohled tak jednoznačná. U velmi podrobných rozlišení (1 m, 2 m) byly analyzovány i hodnoty sklonu rovny 0, zatímco u hrubších rozlišení je minimální zanalyzovaná hodnota sklonu většinou nenulová hodnota (viz tabulky 2–7 v příloze 1).

Pokud zhodnotíme sklony v závislosti na výškových pásmech, je situace velice individuální a nelze z ní vyvodit žádný jednoznačný závěr, nicméně nejvyšších sklonů je průřezově dosahováno ve vyšších polohách z důvodu přítomnosti svahů kopců, ale i v těch nejnižších, kde to může být vysvětleno častou přítomností vodních toků zaříznutých v kaňonech s příkrými svahy.

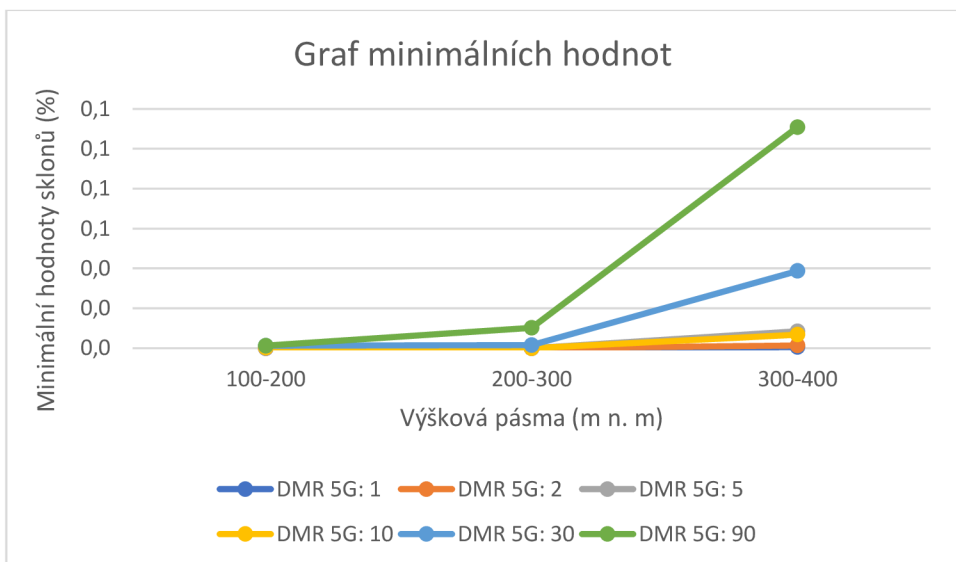
Nymbursko



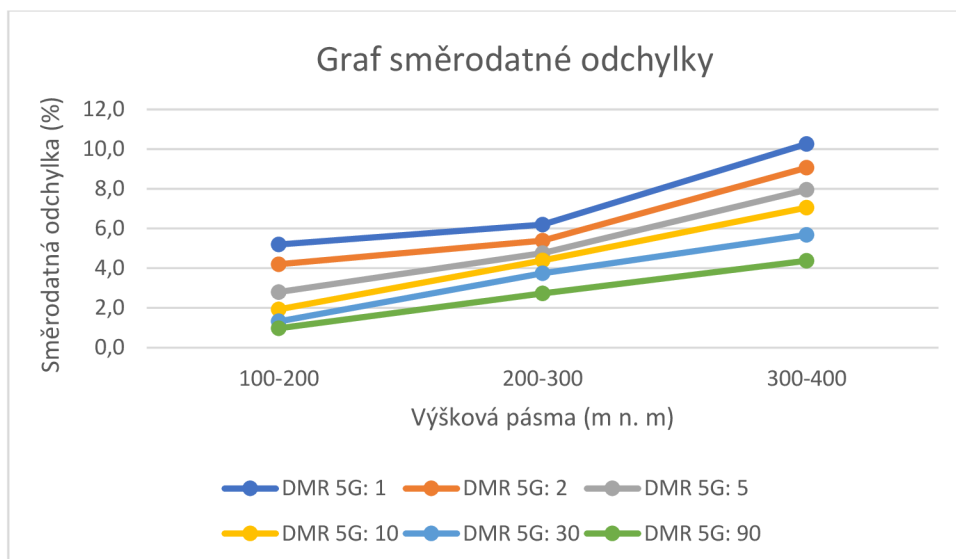
Obrázek 25: Střední hodnota sklonu Nymburska



Obrázek 26: Maximální hodnota sklonu Nymburska



Obrázek 27: Minimální hodnota sklonu Nymburska



Obrázek 28: Směrodatná odchylka Nymburska

Analýza území Nymburska ukazuje obdobné výsledky: rastr sklonu s nejpodrobnějším rozlišením (1 m) dosahuje nejvyšších průměrných hodnot napříč všemi výškovými pásmy (viz obrázek 25). Podobně je tomu také u maximálních hodnot sklonů (obrázek 26) a směrodatných odchylek (obrázek 28).

Průměrná hodnota sklonu postupně roste od nejnižšího výškového pásma k nejvyššímu (viz obrázek 25), kde střední hodnota sklonu v pásmu 100-200 m n.m. činí pro 1m variantu rozlišení rastru přibližně 3 %, ve výškovém pásmu 200-300 m n. m. kolem 5 %, a v pásmu 300-400 m n. m. dosahuje střední hodnota přibližně 9 %.

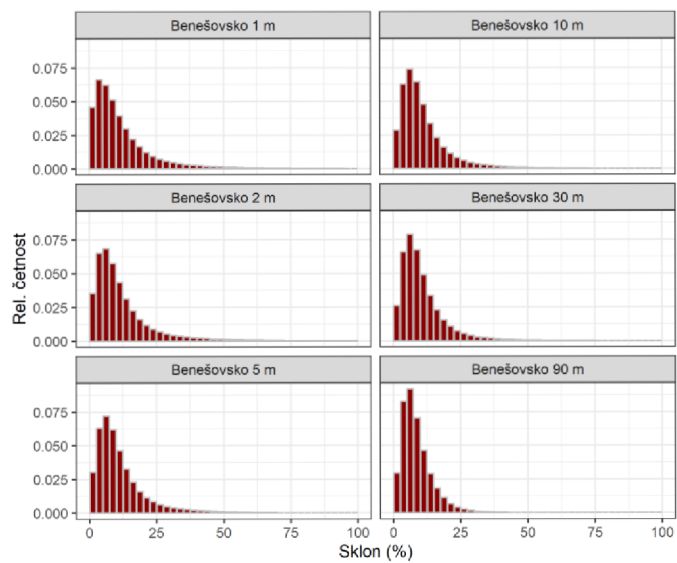
Je zřejmé, že rastry s nejpodrobnějším rozlišením (1 m, 2 m) poskytují největší maximální hodnoty sklonu (obrázek 26 – řádově vyšší stovky %). Naopak, rastry s hrubším rozlišením (30 m, 90 m) nabízejí poměrně nízké maximální hodnoty sklonu (obrázek 27 – řádově nižší desítky %).

Rozdíly v maximálních hodnotách sklonu jsou tedy opět zcela zásadní při změnách ve velikosti rozlišení rastrů. Při přechodu z rastru s rozlišením 90 m na rastr s rozlišením 30 m se maximální sklon zhruba zdvojnásobí napříč všemi výškovými pásmy. Podobný vzor je pozorován i při dalších přechodech na podrobnější rozlišení, například při přechodu z 30m na 10m (viz tabulky 8–13 v příloze 1). Situace ohledně minimálních hodnot sklonů na Nymbursku je obdobná jako v oblasti Benešovska. Při použití velmi podrobných rozlišení (1 m, 2 m) byly analyzovány i hodnoty sklonu rovny 0. Na rozdíl od toho, u hrubších rozlišení 30 a 90 metrů je

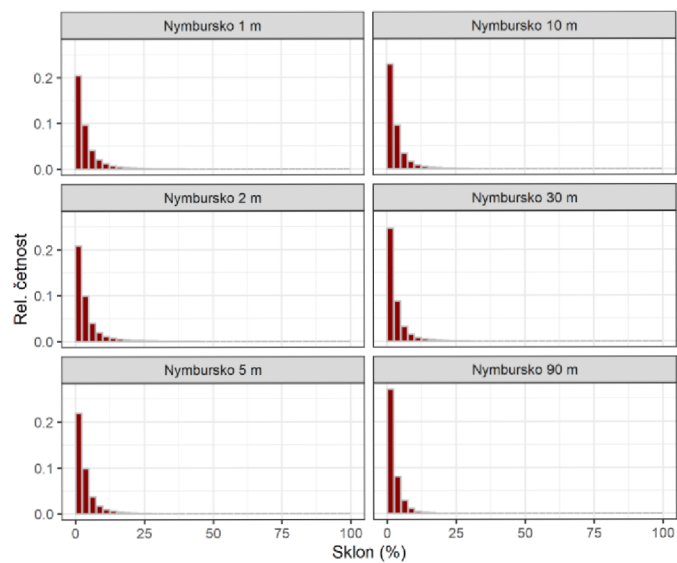
minimální zanalyzovaná hodnota sklonu většinou nenulová (viz tabulky 8-13 v příloze 1).

Sklony byly vizualizovány také pomocí histogramů jejich hodnot (obrázky 29-30). Dle těchto histogramů se na první pohled může zdát, že není výrazný rozdíl mezi jednotlivými rozlišeními (od 1metrového směrem k 90metrovému rozlišení). Při bližším zkoumání se však potvrzují výsledky uvedené výše u grafů průměrných, maximálních a minimálních hodnot a směrodatných odchylek sklonů. S poklesem podrobnosti rozlišení dochází k určitému nárůstu četnosti nižších hodnot sklonu, přičemž se současně snižuje zastoupení vyšších hodnot sklonů. Hrubší rozlišení způsobuje, že terénní nerovnosti jsou více vyhlazené, vypadají méně výrazně a jsou spojeny s okolím. Naopak vyšší rozlišení zachycuje detaily v terénních nerovnostech, což vede k většímu zastoupení strmějších sklonů.

Z histogramů je rovněž patrný významný rozdíl mezi Benešovskem a Nymburskem. Na Nymbursku jsou pozorovány mnohem nižší sklony, což může být interpretováno jako charakteristický prvek tamního geografického reliéfu Polabí. Oblast Benešovska je naopak převážně pahorkatá vysočina. Výše uvedené skutečnosti znázorňují obrázky 29-30.



Obrázek 29: Histogramy hodnot sklonů Benešovska



Obrázek 30: Histogramy hodnot sklonů Nymburska

6 DISKUSE

Získané výsledky ukazují, že rastry s nejpodrobnějším rozlišením (1 m) poskytují nejvyšší průměrné hodnoty sklonu napříč výškovými pásmy v obou regionech. Vzájemné rozdíly v průměrných sklonech se v příslušných výškových pásmech pohybují v jednotkách procent, v převážné míře do 7 %, přičemž DMT s nejpodrobnějším rozlišením převážně poskytuje nejvyšší průměrné hodnoty sklonu v rámci obou regionů. Ve studii Michalopoulou et al. (2022) autoři došli k podobnému závěru. Podle jejich výsledků v západním Řecku, bylo porovnáno DMT s různým rozlišením (5, 30 a 90 m). DMT s nejpodrobnějším rozlišením 5 m má nejlepší přesnost při srovnávací analýze sklonu, a proto je považován za nejvhodnější DMT pro odvození sklonu za účelem modelování půdní eroze. Tento výsledek má velký význam pro účinnost modelování půdní eroze, protože sklon terénu je jedním z klíčových faktorů ovlivňujících erozní procesy.

Kromě průměrné hodnoty sklonu je však důležité podívat se také do prostoru na lokální rozdíly mezi sklony v jednotlivých pixelech, které se v průměrné hodnotě nemusí projevit. Lokální odchylky sklonů mezi rastrem s nejpodrobnějším a nejhrubším rozlišením často dosahují i desítek procent. Tuto skutečnost dokumentují i výsledky maximálních hodnot sklonů. Největší rozdíly byly zaznamenány u maximálních hodnot sklonu Benešovska i Nymburska. Při přechodu z hrubšího na podrobnější rozlišení (například z 90 m na 30 m) došlo k výraznému, až dvojnásobnému nárůstu zjištěných maximálních hodnot sklonu v celém spektru výškových pásem, což může mít důležité důsledky pro různé aplikace, jako je hodnocení eroze nebo plánování infrastruktury.

Schlögel et al. (2018) provedli zonaci náchylnosti území k sesuvům na svazích pomocí tří sad DMT s prostorovým rozlišením 5 m, 10 m, 25 m v jihofrancouzských Alpách. Mapa sesuvů odvozená z DMT s rozlišením 10 m byla porovnáním se zdrojovými oblastmi sesuvů vyhodnocena jako statisticky nejspolehlivější, a tedy i optimální. Mapa s rozlišením 25 m v této oblasti nebyla optimální. Tato zjištění jsou klíčová pro situace, kde extrémní sklon může hrát roli. Analýza také ukázala, že u velmi podrobných rozlišení mohou být minimální hodnoty sklonu rovny nule. Při hrubším rozlišení jsou minimální hodnoty obvykle nenulové. To může být klíčové při hodnocení nížinných a obecně plochých oblastí.

Hodnocením rizika sesuvů se zabývali také Saleem et al. (2019), a to prostřednictvím parametrů odvozených z DMT. Parametry odvozené z DMT jsou většinou propojené a závislé na rozlišení DMT. Právě sklon terénu je asi nejtypičtějším takovým parametrem. Za ideální rozlišení DMT používané pro studie hodnocení rizika sesuvu půdy Saleem et al. (2019) považují rozlišení menší než 10 metrů. Hrubé rozlišení DMT snižuje úroveň detailu a přesnosti při reprezentaci terénních útvarů v digitálním prostoru. Čím hrubší rozlišení, tím méně detailní je model. Tyto výsledky tak korespondují s výsledky autorů Schlögel et al. (2018) i s výsledky této bakalářské práce.

Výběr správného rozlišení je klíčovým faktorem pro přesnou interpretaci a modelování topografických vlastností terénu. Studie autorů Goulden et al. (2016) zkoumala citlivost náhodné chyby měření primárních pozorování LiDAR na odvozený DMT, stejně jako na primární topografické atributy (sklon, poměr stran) a atributy povodí (plocha, délka a poloha toku) odvozené z tohoto DMT. DMT, sklon, rozloha, plocha povodí a délka odtokové sítě představují důležité charakteristiky pro parametrizaci hydrologických modelů. Vzhledem k tomu, že výsledky mohou být citlivé na změny v rozlišení, je nutné vždy pečlivě zvážit vhodnou úroveň detailu v závislosti na konkrétních potřebách a cílech práce; bez toho nelze určit optimální variantu prostorového rozlišení.

Variabilita sklonů v závislosti na výškových pásmech ukázala spíše jen individuální charakteristiky jednotlivých regionů Benešovska a Nymburska. Nejvyšší sklony byly průřezově dosahovány ve vyšších i nižších polohách, což lze vysvětlit různorodou morfologií terénu – ve vyšších polohách jde o svahy vrcholových partií, zatímco v nižších polohách o svahy příkrých kaňonů vodních toků.

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zaměřila na analýzu sklonu terénu v různých rozlišeních (1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 30 m, 90 m) a provedla detailní porovnání vlivu prostorového rozlišení DMT na analýzu sklonu terénu v rámci definovaných výškových pásem. Byly porovnány dva regiony v České republice, Benešovsko a Nymbursko.

Prostorové rozlišení DMT se ukázalo jako faktor s významným vlivem na odvozený sklon terénu. Čím podrobnější je rozlišení, tím větší míra detailu terénu je zobrazena a tím vyšší sklony jsou pozorovány – došlo k nárůstu průměrných a maximálních hodnot sklonu a k rozšíření rozsahu hodnot. Naopak, hrubší rozlišení rastrů vede ke snížení vyhodnocených sklonů a vyhlazení terénních nerovností.

Byly také identifikovány rozdíly ve sklonu mezi Benešovskem a Nymburskem. Benešovsko vykazuje vyšší a strmější sklonitostní poměry, což je charakteristické pro pahorkatou vysočinu. Naopak, Nymbursko má nižší sklony, což odpovídá oblasti Polabí. Nicméně při porovnání Benešovska a Nymburska je také patrné, že vyhodnocené sklony v obou regionech reagují na změny v rozlišení rastrů DMT obdobně.

Vysoké rozlišení DMT je obecně důležité pro aplikace, které vyžadují detailní analýzu terénních vlastností, jako je hodnocení eroze, rychlosti odtoku vody z povodí nebo projektování liniových staveb. Naopak, hrubší rozlišení rastrů obecně poskytuje nižší hodnoty sklonu a může být vhodné pro méně náročné aplikace nevyžadující takovou přesnost a obecně pro aplikace menších měřítek.

Celkově lze říci, že pochopení sklonu terénu a jeho variabilita v různých regionech jsou klíčové pro efektivní plánování a řízení lidských aktivit v daných oblastech.

Pro budoucí výzkum by bylo užitečné zkoumat, jaký vliv má prostorové rozlišení na další terénní charakteristiky a aplikace. Dále by bylo vhodné zkoumat vzájemné interakce mezi sklonem terénu a dalšími faktory, jako jsou srážky a vegetace, abychom získali komplexnější porozumění terénní dynamice. Dalším užitečným zaměřením by mohla být analýza dalších aspektů terénního reliéfu, jako je například expozice svahu, identifikace erozních oblastí nebo modelování vodního toku. Je také důležité sledovat vývoj technologií získávání dat o terénním reliéfu a jejich aplikaci v geografických informačních systémech.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Bayer T., 2016: Digitální modely terénu. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Přírodovědecká fakulta Univerzita Karlova, 2016. [Online] citace: 6.1.2023. https://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GEY2/pred_4_Metrologie_DMT.pdf.

Beránková K., 2020: Digitální modely terénu. [Online] citace: 15.1.2023. <https://docplayer.cz/201524355-Dmt-digitalni-modely-terenu-dmt-dmr-dem-dmp-dmk-dmu-odvozene-charakteristiky-dmt-zakladni-analyzy-vyuzivajici-dmt.html>.

Brázdil K., 2012: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace. [Online] citace: 15.1.2023. <https://geoportal.cuzk.cz/>.

Brůha L., 2016: Digitální modely terénu. Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 2016. [Online] citace: 5.1.2023. <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/projekty/moderni-geoinformacni-metody-ve-vyuce-gis-kartografie-a-dpz/digitalni-modely-terenu/>.

Crippen R., et al., 2016: NASADEM global elevation model: methods and progress. The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Str. 125-128.

ČÚZK, 2010: Digitální model reliéfu 4. generace. [Online] citace: 15.1.2023. <https://geoportal.cuzk.cz/>.

ČÚZK, 2010: Digitální model reliéfu 5. generace. [Online] citace: 15.1.2023. <https://geoportal.cuzk.cz/>.

ČÚZK, 2010: Digitální model reliéfu 1. generace. [Online] citace: 17.1.2023. <https://geoportal.cuzk.cz/>.

ESRI. 2022: How IDW works. *ArcGIS Pro*. [Online] citace: 17. 1. 2023. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-idw-works.htm>.

ESRI. 2022: How Spline works. *ArcGIS Pro*. [Online] citace: 17.1. 2023. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm>.

ESRI. 2022: How Kriging works. *ArcGIS Pro*. [Online] citace: 17. 1. 2023.

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-kriging-works.htm>.

ESRI. 2022: How Slope works. *ArcGIS Pro*. [Online] citace: 18. 1. 2023.

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.1/tool-reference/spatial-analyst/how-slope-works.htm>.

ESRI. 2022: How Dissolve works. *ArcGIS Pro*. [Online] citace: 22. 1. 2023.

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.1/tool-reference/data-management/h-how-dissolve-data-management-works.htm>.

ESRI. 2022: Zonal Statistics as Table. *ArcGIS Pro*. [Online] citace: 22. 1. 2023.

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.1/tool-reference/spatial-analyst/zonal-statistics-as-table.htm>.

ESRI. 2022. How Topo to Raster works. *ArcGIS Pro*. [Online] citace: 18. 1. 2023.

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.1/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>.

Farr Tom G., et al. 2007: The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*. Sv. 45, str. 33. 8755-1209.

Goulden T et al. 2016: Sensitivity of DEM, slope, aspect and watershed attributes to LiDAR measurement uncertainty. *Remote Sensing of Environment*. Sv. 179, str. 23-25.

Hawker L., et al., 2022: A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*. Sv. 17, str. 2.

Hupšil R., 2008: Rastrová analýza pro GIS nástroj ArcGIS. [Online] citace: 18.1.2023. <http://hdl.handle.net/11012/53120>.

Chang M., 2002: A 3D slope stability analysis method assuming parallel lines of intersection and differential straining of block contacts. Sv. 39, str. 4. 799-811.

Kubátová E., 2008: Význam státního mapového díla pro státní geoinformační politiku, 2008. [Online] citace: 12.1.2023. <https://www.cuzk.cz/O-resortu/Nemoforum/Akce-Nemofora/Seminare/Jednotne-digitalni-technicke-mapy/09-Kubatova.aspx>.

Kulp S., Strauss B., 2019: New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*. Sv. 10, str. 1.

Kulp S., Strauss B., 2018: CoastalDEM: A Global Coastal Digital Elevation Model Improved from SRTM Using a Neural Network. *Remote Sensing of Environment*. Sv. 206, str. 231-239.

Křikavová L., 2009: Interpolace bodových dat v GIS. [Online] citace: 18.1.2023.

https://maps.fsv.cvut.cz/diplomky/2009_BP_Krikavova_Interpolace_bodovych_dat_v_GIS.pdf.

Luňák T., 2007: Testování přesnosti měření GPS metodou RTK. Plzeň: Západočeská univerzita. Fakulta aplikovaných věd. [Online] citace: 7.1.2023.

http://gis.zcu.cz/studium/ZaverecnePrace/2007/Lunak__Testovani_presnosti_mereni_GPS_metodou_RTK__BP.pdf.

Michalopoulou M., et al. 2022: The Significance of Digital Elevation Models in the Calculation of LS Factor and Soil Erosion. *University of Patras*. Sv. 11.

Míkita T., 2014: Letecké laserové skenování. Brno: lesnická a dřevařská fakulta, 2014. [Online] citace: 11.1.2023.
http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/vgdp/vgdp_gis4.pdf .

QGIS, 2009: Prostorová analýza (interpolace). [Online] citace: 12.1.2023.
https://docs.qgis.org/2.18/cs/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html#:~:text=Prostorov%C3%A1%20interpolace%20je%20proces%20pou%C5%BE%C3%ADv%C3%A1n%C3%AD,stanic%2C%20aby%20pokryly%20cel%C3%BD%20region.

GIS Geography, 2022: Raster Resampling for Discrete and Continuous Data. [Online] citace: 22.1.2023. <https://gisgeography.com/raster-resampling/>.

Rizzoli P., et al., 2017: Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. Sv. 132, str. 119-139.

Saleem N. et al. 2019: Parameters Derived from and/or Used with Digital Elevation Models (DEMs) for Landslide Susceptibility Mapping and Landslide Risk Assessment: A Review. Sv. 8.

Sibson R., 1981: A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. Interpreting Multivariate Data. New York: str. 21-36.

Schlögel B. et al. 2018: Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models. Geomorphology. Sv. 301, str. 10-20.

Terminologický slovník ČÚZK, 2001: Digitální model terénu, [Online] citace: 5.1.2023. [https://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?tid=1050&l=digitalni-model-reliefu--digitalni-model-terenu-\(dmr--dmt\)](https://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?tid=1050&l=digitalni-model-reliefu--digitalni-model-terenu-(dmr--dmt)).

Terminologický slovník ČÚZK, 2001: Digitální model povrchu, [Online] citace: 5.1.2023. <https://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?&tid=1049&l=digitalni-model-povrchu>.

Terminologický slovník ČÚZK, 2001: Digitální výškový model, [Online] citace: 5.1.2023. <https://www.slovníkcuzk.eu/termin.php?&tid=1053&l=digitalni-vyskovy-model>.

Yamazaki D., et al. 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. Reviews of Geophysics. Sv. 44, str. 11. 5844-5853.

8 PŘÍLOHY

8.1 Příloha 1

Tabulky popisné statistiky sklonů území Benešovska a Nymburska.

Tabulka 2 - Benešovsko v rozlišení 1 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	13 248	0	240,96	240,96	22,4	29,2
200-300	57 146 034	0	1 133,27	1 133,27	16,37	22,68
300-400	501 769 071	0	1 831,74	1 831,74	15,67	17,73
400-500	798 436 320	0	1 677,91	1 677,91	11,04	10,73
500-600	179 214 866	0	778,69	778,69	10,28	9,29
600-700	21 693 542	0	802,47	802,47	13,49	11,17
700-800	20 782	0,06	128,55	128,5	18,87	14,22

Tabulka 3 - Benešovsko v rozlišení 2 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	12 940	0	140,05	140,05	19,44	22,32
200-300	57 130 396	0	656,15	656,15	15,74	20,62
300-400	501 711 232	0	1 028,16	1028,16	15,09	15,57
400-500	798 306 024	0	885,36	885,36	10,63	9,23
500-600	179 159 696	0	485,34	485,34	9,89	7,86
600-700	21 669 912	0	473,37	473,37	13,03	9,33
700-800	20 516	0,2	92,96	92,77	18,28	12,4

Tabulka 4 - Benešovsko v rozlišení 5 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	12 375	0,45	79,82	79,37	13,54	13,62
200-300	57 109 525	0	336,2	336,2	14,82	18,2
300-400	501 545 800	0	442,02	442,02	14,42	13,54
400-500	797 916 725	0	389,39	389,39	10,22	7,9
500-600	178 991 950	0	215,78	215,78	9,54	6,68
600-700	21 599 600	0,02	189,56	189,54	12,66	7,86
700-800	19 600	0,31	62,59	62,28	17,71	10,93

Tabulka 5 - Benešovsko v rozlišení 10 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	11 400	0,25	60,19	59,94	13,27	13,16
200-300	57 056 700	0,01	197,15	197,14	14,07	16,45
300-400	501 283 800	0	264,17	264,17	13,88	12,33
400-500	797 282 000	0	201,8	201,8	9,96	7,24
500-600	178 723 600	0	136,31	136,31	9,36	6,21
600-700	21 478 800	0,02	96,23	96,21	12,5	7,28
700-800	18 300	0,95	43,67	42,72	16,92	8,97

Tabulka 6 - Benešovsko v rozlišení 30 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	9 000	1,04	51,3	50,26	22,9	16,89
200-300	56 920 500	0,01	102,58	102,57	12,77	13,27
300-400	500 412 600	0	132,53	132,53	12,66	10,2
400-500	794 660 400	0,01	85,98	85,97	9,37	6,28
500-600	177 685 200	0,01	89,35	89,33	9,01	5,63
600-700	21 011 400	0,08	56,51	56,43	12,2	6,57
700-800	13 500	3,07	29,76	26,69	16,89	7,86

Tabulka 7 - Benešovsko v rozlišení 90 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	16 200	19,74	25,73	5,99	22,74	2,99
200-300	56 748 600	0,01	76,47	76,46	10,25	8,82
300-400	497 842 200	0,01	66,42	66,4	9,96	7,04
400-500	787 814 100	0,01	50,11	50,09	7,94	4,88
500-600	174 968 100	0,04	38,77	38,73	7,91	4,64
600-700	19 755 900	0,51	34,6	34,09	11,04	5,37

Tabulka 8 - Nymbursko v rozlišení 1 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	173 616 570	0	753,46	753,46	2,86	5,20
200-300	394 558 289	0	754,53	754,53	4,85	6,19
300-400	14 088 086	0,00	998,08	998,08	8,75	10,26

Tabulka 9 - Nymbursko v rozlišení 2 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	173 560 340	0	364,11	364,11	2,52	4,20
200-300	394 437 900	0	365,05	365,05	4,53	5,39
300-400	14 066 588	0,00	368,15	368,15	8,37	9,06

Tabulka 10 - Nymbursko v rozlišení 5 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	173 410 950	0	145,47	145,47	2,05	2,80
200-300	394 071 600	0	98,43	98,43	4,21	4,76
300-400	13 993 225	0,01	107,83	107,82	8,00	7,95

Tabulka 11 - Nymbursko v rozlišení 10 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m ²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	173 139 200	0,00	49,82	49,82	1,68	1,93
200-300	393 483 000	0	67,31	67,31	3,99	4,40
300-400	13 880 500	0,01	71,35	71,34	7,70	7,05

Tabulka 12 - Nymbursko v rozlišení 30 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	172 134 900	0,00	25,67	25,67	1,27	1,32
200-300	391 197 600	0,00	42,39	42,39	3,61	3,75
300-400	13 428 900	0,04	43,68	43,65	7,13	5,68

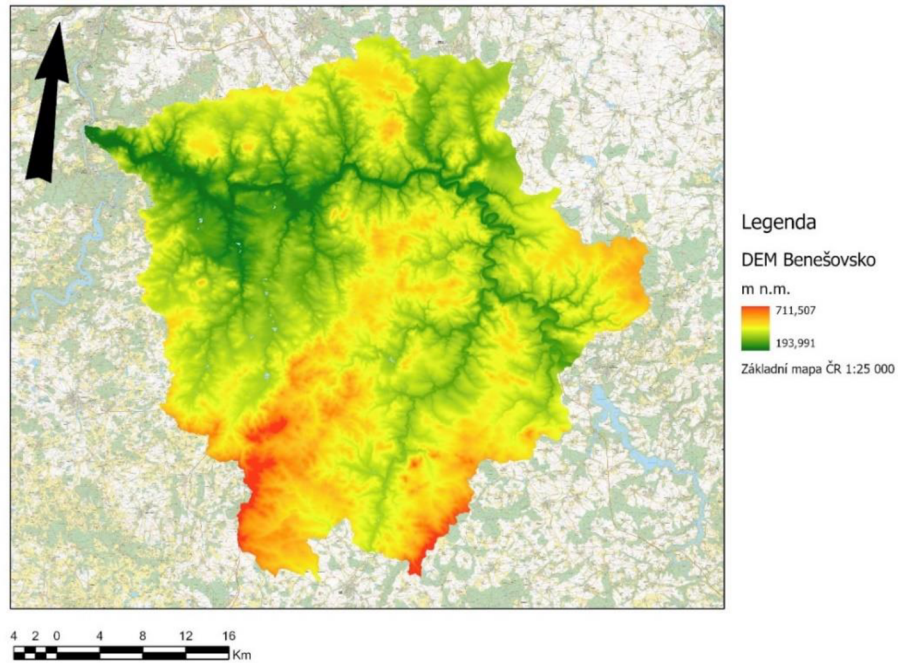
Tabulka 13 - Nymbursko v rozlišení 90 m

Výšková pásma (m n. m.)	Rozloha (m²)	Minimum (%)	Maximum (%)	Rozpětí (%)	Průměr (%)	Směrodatná odchylka (%)
100-200	169 419 600	0,00	12,62	12,62	0,94	0,98
200-300	385 041 600	0,01	23,81	23,80	2,90	2,74
300-400	12 125 700	0,11	23,49	23,38	6,33	4,38

8.2 Příloha 2

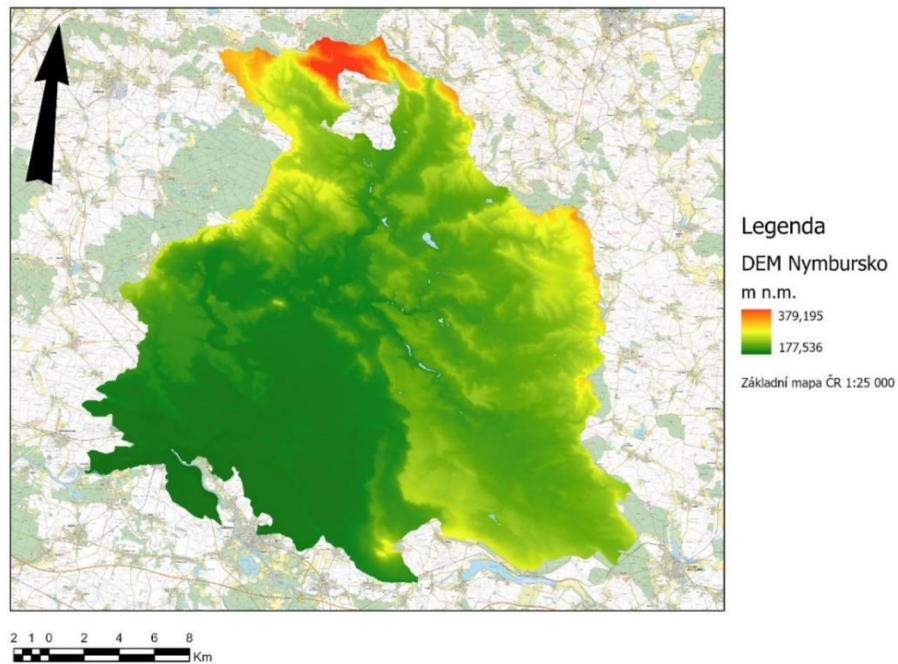
Mapy zobrazující území digitálního modelu terénu Benešovska a Nymburska.

Zobrazení území digitálního modelu terénu Benešovska.



Obrázek 31: Zobrazení vstupních DEM Benešovska

Zobrazení území digitálního modelu terénu Nymburska.

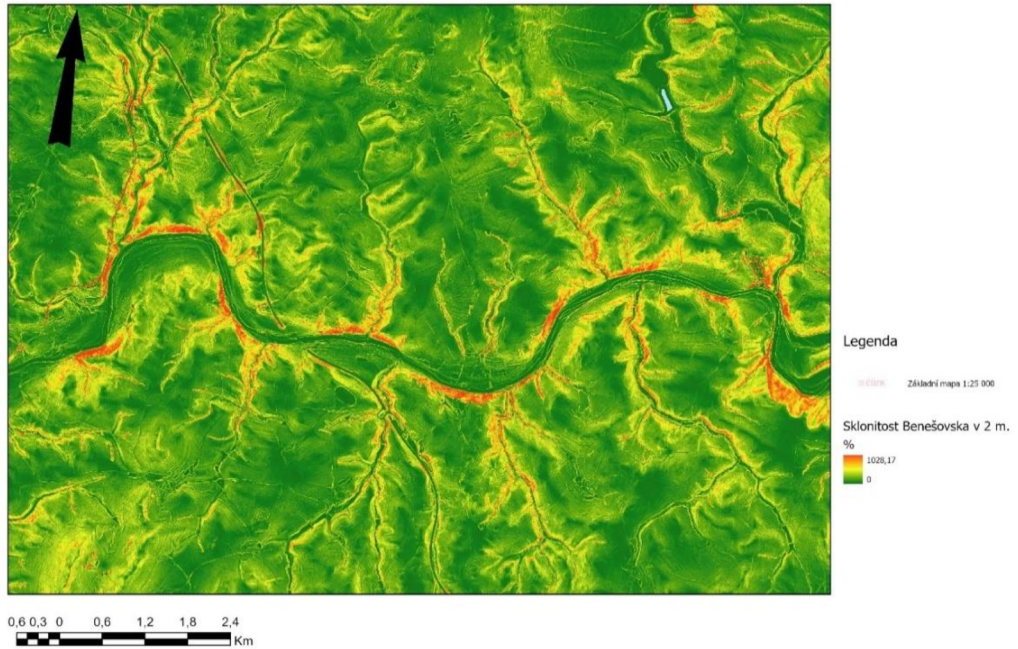


Obrázek 32: Zobrazení vstupních DEM Nymburska

8.3 Příloha 3

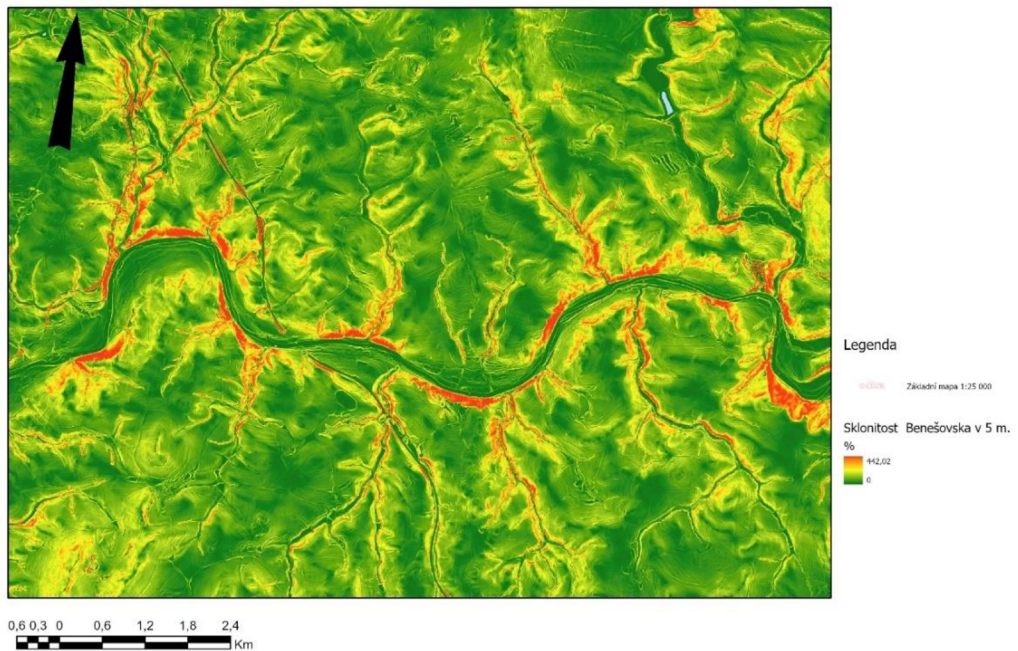
Mapy zobrazující sklonitost území Benešovska a Nymburska.

Zobrazení sklonitosti území Benešovska.



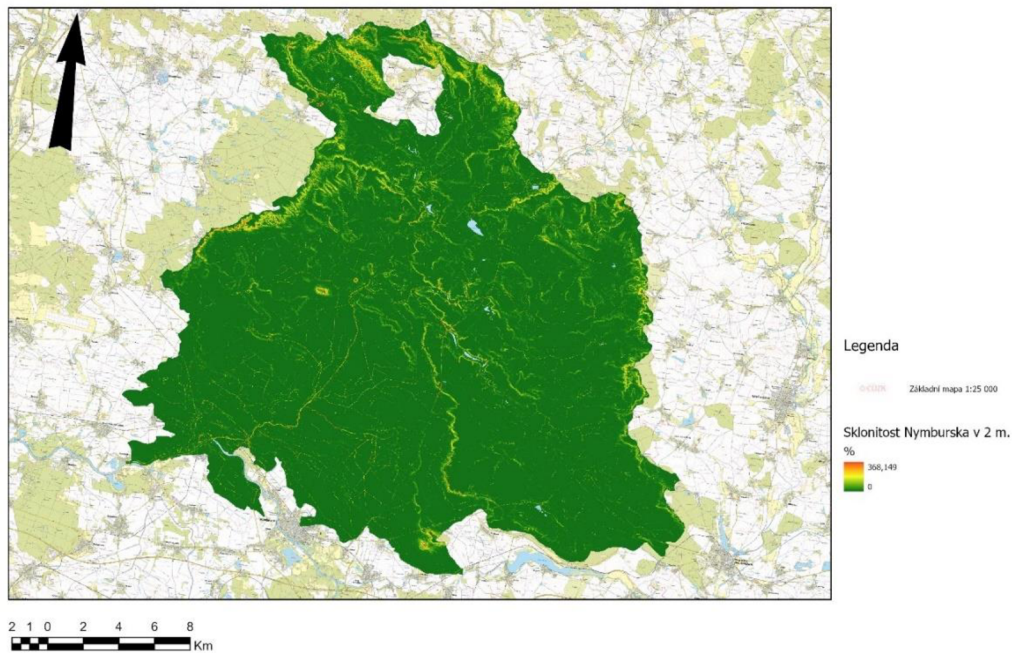
Obrázek 33: Sklonitost v rozlišení 2 m

Zobrazení sklonitosti území Benešovska.



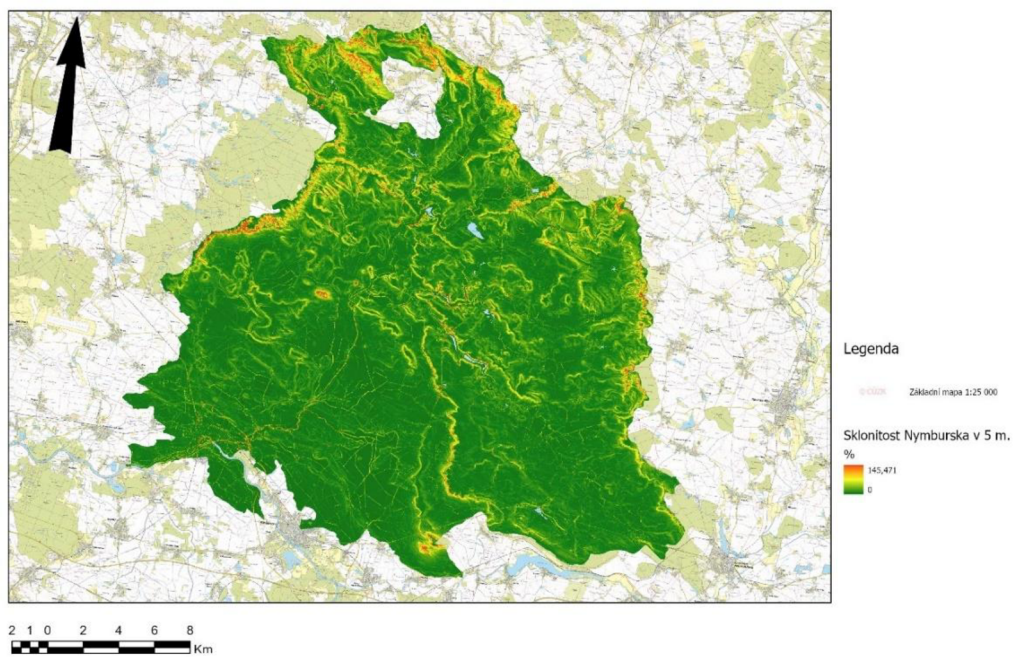
Obrázek 34: Sklonitost v rozlišení 5 m

Zobrazení sklonitosti území Nymburska.



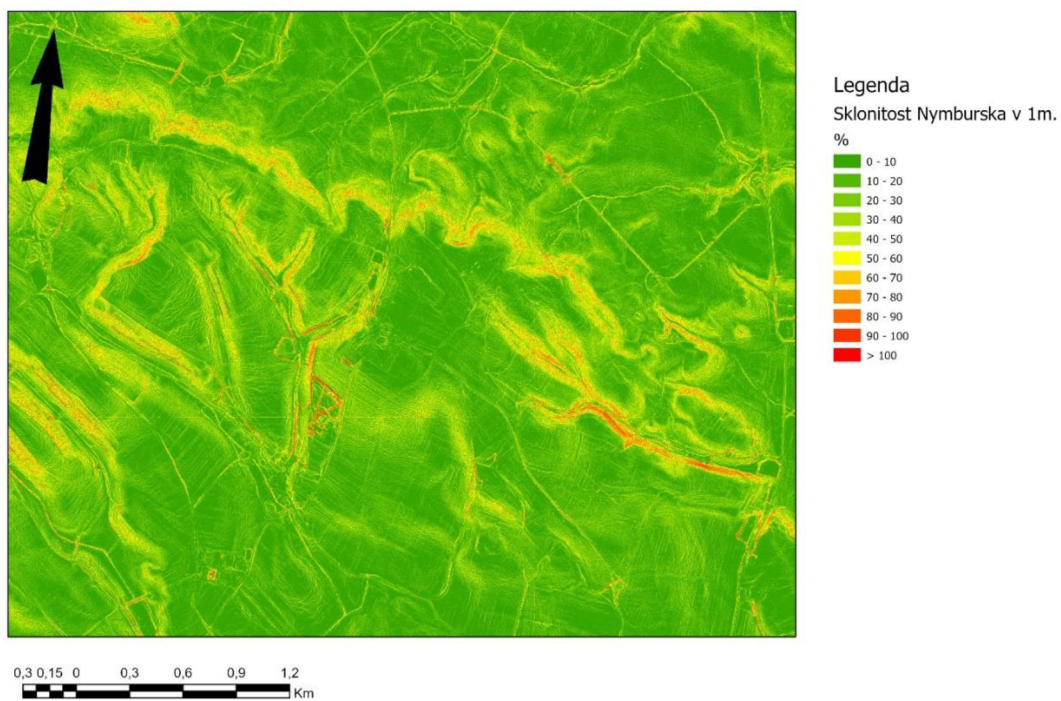
Obrázek 35: Mapa v 2 m

Zobrazení sklonitosti území Nymburska.



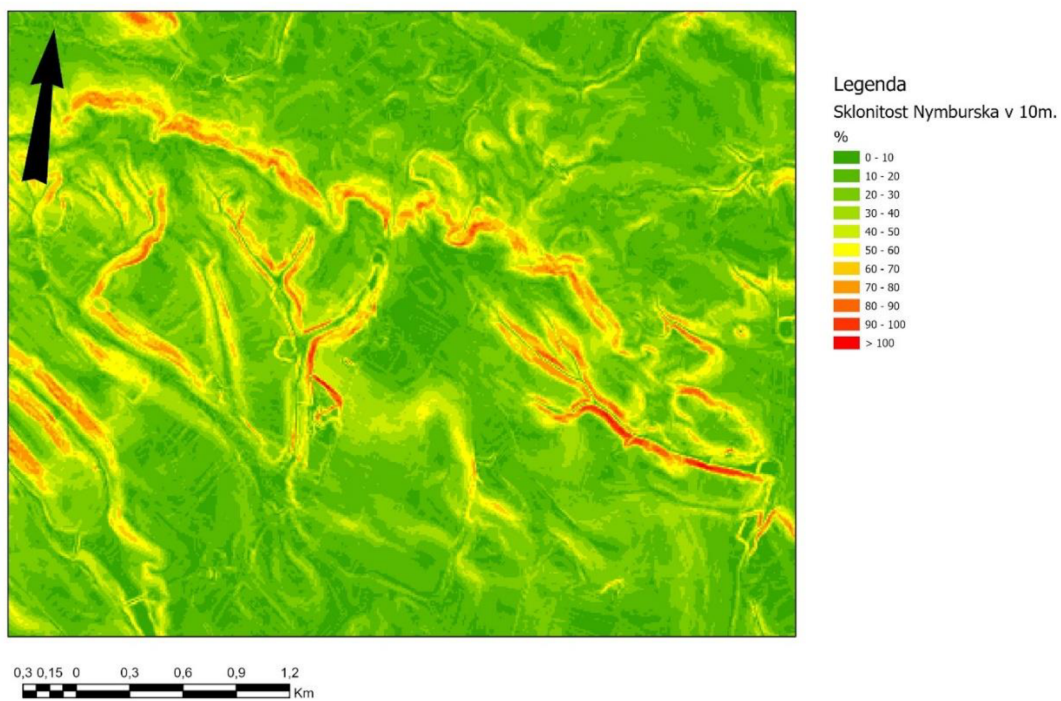
Obrázek 36: Mapa v 5 m

Zobrazení sklonitosti území Nymburska.



Obrázek 37: Vybraná část území pro lepší názornost sklonitosti v rozlišení 1 m

Zobrazení sklonitosti území Nymburska.



Obrázek 38: Vybraná část území pro lepší názornost sklonitosti v rozlišení 10 m