

# Vzdialenostné analýzy pre trojrozmerné dynamické modelovanie

Milan Koreň<sup>1</sup>, Vladimír Papaj<sup>2</sup>, Ján Tuček<sup>3</sup>

Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta,  
Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24,  
960 53, Zvolen, Slovensko

<sup>1</sup>mkoren@vsld.tuzvo.sk

<sup>2</sup>vladopapaj@hotmail.com

<sup>3</sup>tucek@vsld.tuzvo.sk

**Abstrakt.** Príspevok sa zaoberá vzdialenostnými analýzami v dvoj a trojrozmerných rastroch. Zovšeobecnenie postupov pre trojrozmerné rastre vyžaduje efektívne algoritmy transformácie údajov, výpočtu vzdialeností, spracovania a zobrazovania výsledkov. Metódy boli aplikované pri výpočte dostupnosti a dopravných vzdialeností biomasy pre územie VÚC Banská Bystrica. Projekt bol realizovaný v spolupráci s Fínskym ústavom pre výskum lesa (METLA) a Národným lesníckym centrom (NLC) vo Zvolene.

**Kľúčová slova:** geografický informačný systém, vzdialenostná analýza, digitálny model reliéfu, cestná sieť, trojrozmerný temporálny raster, kritická výška bunky.

**Abstract.** The distance analysis for the three-dimensional dynamical modelling. The article deals with methods of distance analyses in two and three dimensional rasters. The generalization of procedures for three dimensional rasters requires effective algorithms of data transformation, distances calculation, data processing and visualization. Methods were applied on calculation of biomass availability in Banska Bystrica region. The project was implemented in cooperation with Finnish Institute for Forest Research (METLA) and National Forest Centre (NLC) in Zvolen.

**Keywords:** geographical information system, distance analysis, road network, digital elevation model, three dimensional temporal grid, critical cell height.

## 1 Úvod

V priebehu roku 2006 Technická univerzita vo Zvolene spolu s Fínskym lesníckym výskumným ústavom (METLA), NLC – Ústavom lesných zdrojov a informatiky, NLC – Lesoprojektom, Zvolen sa podieľala na vypracovaní štúdie o zdrojoch biomasy, ich dostupnosti a efektívnom využití v rámci banskobystrického kraja [2]. Štúdia bola vypracovaná pre potreby VÚC Banská Bystrica a Zvolenskej teplárenskej, a.s. Využitie biomasy ako alternatívneho zdroja energie prináša niekoľko výhod: znižovanie emisií CO<sub>2</sub> a produkcie popola, splnenie emisných limitov a napĺňanie záväzkov vyplývajúcich z Kjótskeho protokolu, cenovo výhodná výroba tepla

a elektrickej energie, zlepšovanie stavu životného prostredia, pozitívny vplyv na vývoj zamestnanosti a rozvoj dodávateľských a spracovateľských služieb v regióne.

Alokácia dostupných zdrojov biomasy, jej doprava na miesto využitia, stanovenie ekonomických nákladov je komplexná úloha na riešenie ktorej sa využívajú aj prostriedky geografických informačných systémov [4]. Geografická databáza, príprava a spracovanie údajov, tlač mapových výstupov boli urobené v prostredí systému ArcGIS. Dvoj a trojrozmerná vzdialenostná analýza bola realizovaná externým programom.

Hlavným cieľom spracovania geografických údajov a geografickej analýzy bolo pripraviť geografickú databázu regiónu VÚC Banská Bystrica, odvodiť informácie potrebné pre stanovenie objemu dostupnej biomasy, pripraviť podklady pre odhad ekonomických nákladov.

## 2 Vzdialenostná analýza

Funkcie vzdialenostnej a sieťovej analýzy patria spolu s operáciami nakladania tematických vrstiev k najpoužívanejším nástrojom geografických informačných systémov [3]. Sieťová a vzdialenostná analýza sa zvyčajne robí na vektorových tematických vrstvách s vytvorenou líniovou topológiou, ale v určitých prípadoch je realizovateľná aj na rastrových vrstvách.

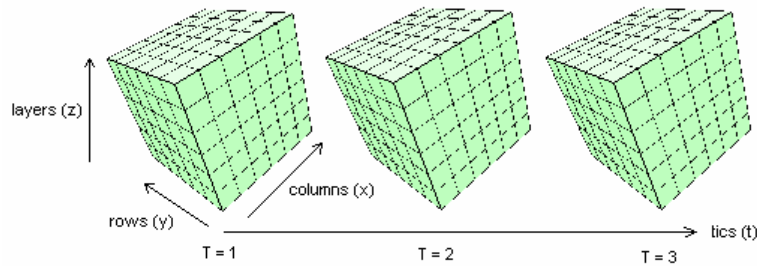
Na nakladanie máp sa používajú rastrové aj vektorové vrstvy, odlišujú sa však dostupnými operáciami. Vektorová reprezentácia sa používa pri objektovo-orientovanom prístupe k modelovaniu javov a procesov na zemskom povrchu. Objekty sú definované postupnosťami súradníc. Výsledkom ich vzájomného prekrytia sú nové objekty, vypočítané na základe vzájomnej polohy pôvodných objektov. Medzi základné operácie nakladania tematických vrstiev patria: orezanie, vymazanie, identita, prienik, spojenie, zjednotenie, aktualizácia.

Rastrová reprezentácia údajov sa používajú pri modelovaní prostredníctvom polí. Nie je založená na definovaní a manipulácii objektov ako pri vektorovej reprezentácii. Miesto toho je územie rozdelené na pravidelnú sieť tvorenú bunkami obdĺžnikového tvaru. Každý bunke je priradená hodnota vyjadrujúca vlastnosti danej časti územia. Pri operáciách nakladania sa potom nerieši vzájomná poloha objektov, ale sa kombinujú hodnoty prislúchajúce časti územia, ktoré je dané bunkou. Operácie nakladania rastrových vrstiev zahŕňajú hlavne aritmetické operácie (sčítanie, odčítanie, násobenie, delenie), výpočet minima, maxima, priemernej hodnoty a naloženie (stamp) vrstiev.

Sieťová analýza sa tradične realizuje na vektorových objektoch. Líniová sieť sa nahrádza orientovaným a ohodnoteným grafom, na riešenie problémov (hľadanie najkratšej cesty, problém obchodného cestujúceho, modelovanie zdrojov, alokácia zdrojov) sa používajú známe a overené algoritmy. V určitých prípadoch sieťovú analýzu môžeme vykonávať aj na rastrových údajoch a efektívne ju spojiť so vzdialenostnou analýzou.

Funkcie vzdialenostnej analýzy sa implementujú vo vektorových aj rastrových GIS. Najjednoduchšou formou sú vzdialenostné zóny (buffer), ktoré sa vytvárajú okolo bodov, línií, či polygónov. Rastrové GIS spravidla rozmanitejšie nástroje pre

vzdialenostnú analýzu ako vektorové. Dovoľujú zaviesť spresňujúce parametre (frikčný povrch, odpor v smere) a algoritmy sa dajú zovšeobecniť pre trojrozmerné temporálne rastre.



Obr. 2.1: Trojrozmerný temporálny raster

Trojrozmerný raster rozdeľuje ohraničenú časť trojrozmerného priestoru na pravidelné bunky tvaru kvádra. Vznikajú tak stĺpce (columns), riadky (rows) a vrstvy (layers). Bunky (niektorí autori ich nazývajú voxel) môžu mať rôzne rozmery pozdĺž súradnicových osí. Temporálny raster dostaneme zavedením času a rozdelením sledovaného časového úseku na rovnako veľké intervaly. Každému intervalu (tzv. tiku) prislúcha jeden trojrozmerný raster (Obr. 2.1). Všetky trojrozmerné rastre usporiadané do sekvencie tvoria štvorrozmerný raster. Relatívna poloha bunky v rastri je určená indexom

$$\mathbf{i} = (i_{col}, i_{row}, i_{lay}, i_{tic}).$$

Prepočet relatívnych súradníc na absolútne súradnice stredu bunky je priamočiary. K súradniciam stredu počiatočnej bunky rastra  $\mathbf{o}$  pripočítame posun bunky:

$$\mathbf{x} = \mathbf{o} + \mathbf{s} \cdot (i_{col} \cdot \mathbf{e}_x, i_{row} \cdot \mathbf{e}_y, i_{lay} \cdot \mathbf{e}_z, i_{tic} \cdot \mathbf{e}_t)^T,$$

kde  $\mathbf{s} = (s_x, s_y, s_z, s_t)$  je vektor veľkostí bunky a  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z, \mathbf{e}_t$  sú jednotkové vektory.

Pri vzdialenostných analýzach, vizualizácii, interpoláciách a ďalšom spracovaní trojrozmerných temporálnych rastrov sa musia rozlišovať priestorová a časová zložka súradníc. Časová zložka sa udáva v iných jednotkách ako priestorové súradnice, preto je potrebné stanoviť koeficient prevodu časových súradníc na priestorové a opačne. Tieto prepočty sú dôležité pri časo-priestorových aproximáciách, extrapoláciách aj pri vzdialenostných analýzach.

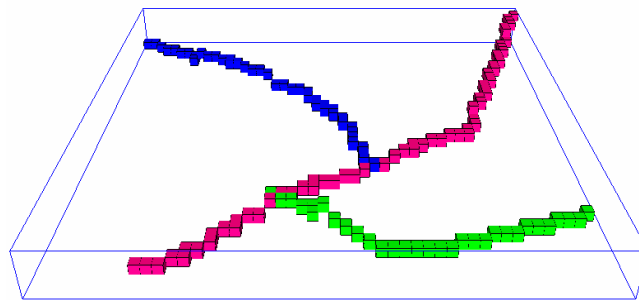
V praxi sa používajú dve hlavné metódy vzdialenostnej analýzy: euklidovské vzdialenosti (Euclidian distances) a sledovanie vzdialeností (track distances).

Metódy euklidovských vzdialeností pre každú bunku výstupného rastra vypočítajú euklidovskú vzdialenosť k najbližšiemu zadanému objektu. Okrem rastra vzdialeností výstupom je aj raster polôh, ktorý obsahuje kódované relatívne súradnice najbližšej bunky objektu.

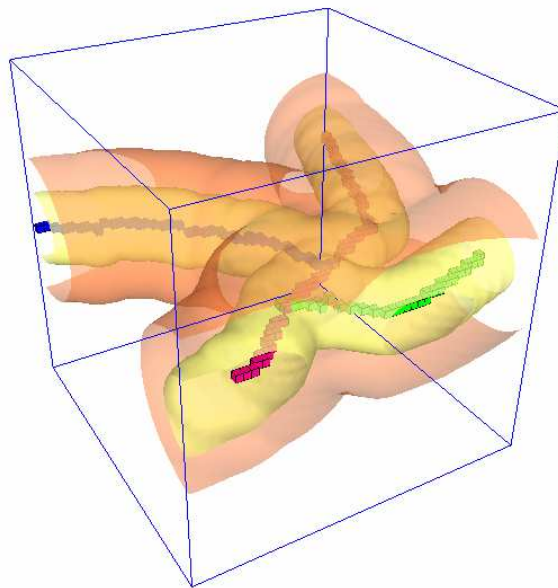
Algoritmus sledovania vzdialeností počíta vzdialenosti iteratívne. Začína od zadaných objektov, ktorým priraduje vzdialenosť 0. Potom postupne prechádza raster a priraduje vzdialenosti susedným bunkám. Proces pokračuje dokiaľ sa nenájde optimálne (minimálne) riešenie. Oproti euklidovským vzdialenostiam je výsledná trasa lomená a tým aj o niečo dlhšia. Výhodou trasovania je, že trasa sa dá

ovplyvňovať parametrami. Môže viesť len po určitých objektoch (napr. cestách, alebo povrchu digitálneho modelu reliéfu). Ďalšou výhodou je voliteľné použitie vrstvy nákladov, ktorá pre každú bunku stanovuje náklady na jej prejdienie. Výsledná minimálna vzdialenosť je potom kombináciou vzdialeností a nákladov obmedzených na vybrané objekty.

Reklasifikáciou vrstiev vzdialeností sa následne vytvárajú jednoduché alebo viacnásobné vzdialenostné zóny.



Obr. 2.2: Detail trojrozmerného rastra cestnej siete



Obr. 2.3: Trojrozmerné vzdialenostné zóny cestnej siete

Euklidovské vzdialenosti i dĺžky trás sa rátajú v rámci jednej časovej vrstvy (tiku), alebo voliteľne aj temporálne. Štruktúry údajov na reprezentáciu trojrozmerných temporálnych rastrov a príslušné algoritmy boli navrhnuté a implementované tak, aby sa výpočty dali realizovať aj pre dynamické modely s parametrami meniacimi sa v čase.

### 3 Výpočet dostupnosti a dopravných vzdialeností biomasy

Základným zdrojom údajov o lesoch na území VÚC Banská Bystrica boli lesné porastové mapy a databázy Národného lesníckeho centra vo Zvolene. Jednotka priestorového rozdelenia lesa (JPRL) sa môže skladať z viacerých oddelených polygónov. Tematická vrstva obsahovala 146 354 polygónov a 87 372 jednotiek priestorového rozdelenia lesa. Z databázových údajov bola odvodená zásoba dreva a plánovaná ťažba, veková štruktúra lesa, zastúpenie dreva, vlastnícke a užívateľské vzťahy a ďalšie parametre. Tieto boli priradené k JPRL v porastových mapách študijného územia. Celková dendromasa bola redukovaná na priemyselne využiteľný objem, pričom boli zohľadnené aj ekologické limity: požiadavky ochrany lesných ekosystémov, stanovištné pomery a dostupnosť lesných porastov.

Geografická databáza bola doplnená o údaje poskytnuté pre účely projektu Topografickým ústavom v Banskej Bystrici:

- Rastrový digitálny model reliéfu s priestorovým rozlíšením 10 metrov. Minimálna nadmorská výška územia je 115m, maximálna 2041m, priemerná hodnota nadmorskej výšky 516,4m.
- Vektorové tematické vrstvy: administratívno-správne hranice, cestná sieť, železnice, sídla, rieky, jazerá.

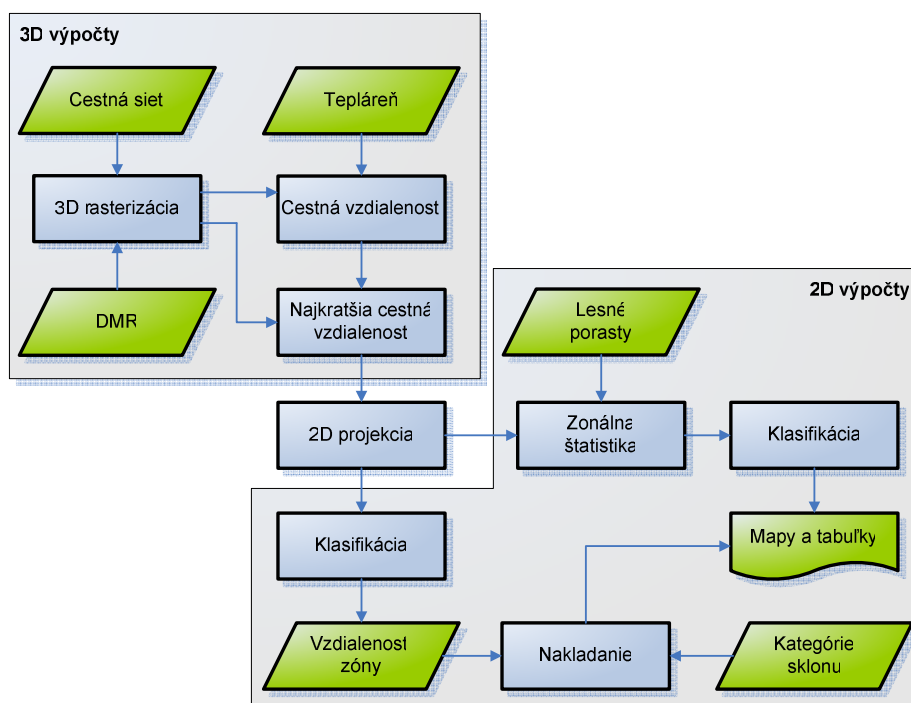


Obr. 3.1: Cestná sieť VÚC Banská Bystrica (podľa [2])

Všetky tematické vrstvy boli presnými kartografickými transformáciami prevedené do národného súradnicového systému S-JTSK. Bola skontrolovaná líniová a plošná topológia. Doplnujúce atribútové údaje poskytnuté NLC - Ústavom lesných zdrojov a informatiky boli naimportované z databázových súborov a prepojené s digitálnou mapou lesných porastov.

Dostupnosť biomasy a ekonomické náklady sú výrazne ovplyvnené dopravnými vzdialenosťami a nákladmi. Pre určenie dostupnosti a nákladovosti boli pre každý lesný porast vypočítané najkratšie dopravné vzdialenosti. Vstupná tematická vrstva cestnej siete obsahovala všetky kategórie ciest: diaľnice, cesty 1., 2. a 3. triedy, poľné a lesné cesty (Obr. 3.1).

Pretože výpočet dopravných vzdialeností pre lesné porasty vyžaduje určenie najkratšej vzdialenosti k teplárni pre každý bod územia, výpočty sa realizovali v rastrovom modeli s rovnakým referenčným rámcom ako DMR (rozlíšenie 10 metrov, 14 636 stĺpcov, 9 746 riadkov). Postup je zachytený na obrázku 3.2. Výsledné dopravné vzdialenosti aproximujú súčet vzdialenosti sústreďovania a odvozu biomasy a boli použité pri výpočte očakávaných finančných nákladov.



Obr. 3.2: Diagram výpočtu dopravných vzdialeností

Zvláštnu pozornosť treba venovať už príprave trojrozmerných údajov a konverziám dvojdimenzionálnej cestnej siete do trojrozmerného rastra. Cesty sú dané konečnými postupnosťami lomových bodov, pričom dĺžka segmentov je rôzna. Pohybuje sa v rozsahu od niekoľkých desiatok až po stovky metrov v prípade rovných úsekov. Ak by sme odčítali len nadmorské výšky lomových bodov a na ich základe rasterizovali línie na mnohých miestach by došlo k viditeľným odchýlkam ciest od povrchu DMR. V členitých oblastiach by dlhšie líniové segmenty mohli prechádzať v pomerne veľkej vzdialenosti pod alebo nad reliéfom. Dvojrozmerné línie je nutné postupne natiahnuť na reliéf, čo sa urobí klasickou konverziou línie do dvojrozmerného rastra a potom sa každej bunke rastrovej línie priradí nadmorská

výška zvlášť. Aj pri tomto postupe hrozí nebezpečenstvo roztrhnutia línie v miestach s vysokým sklonom. V mieste roztrhnutia línie sa preruší sledovanie vzdialenosti, výsledkom čoho budú nesprávne vypočítané minimálne vzdialenosti od objektov. Uvedený problém sa rieši dvoma spôsobmi: stanovením kritickej výšky bunky rastra, alebo dvojnásobnou rasterizáciou.

Pre určenie kritickej výšky bunky potrebujeme poznať maximálny sklon líniových segmentov, ktorých začiatkové a koncové body sú dané susednými bunkami dvojrozmernej rasterizovanej línie. Minimálna výška bunky je priamo úmerná veľkosti sklonu segmentu:

$$s_z \geq \max\{l_L \cdot tg(A_L)\}$$

kde  $l_L$  je dĺžka líniového segmentu a  $A_L$  jeho sklon. Dá sa ľahko vidieť, že ak výška bunky je menšia ako táto kritická výška, tak sklon segmentu je taký veľký, že línia má na dĺžku segmentu väčší prírastok ako je výška bunky rastra a dôjde k preskočeniu vrstvy a tým aj pretrhnutiu línie. Pre určenie kritickej výšky bunky by sme museli najskôr vytvoriť dvojrozmerný rastrový obraz cestnej siete, z digitálneho modelu reliéfu odvodiť nadmorskú výšku pre každú bunku cesty a nakoniec vypočítať maximálny prírastok jednotlivých líniových segmentov (daných susednými bunkami). Postup je výpočtovo náročný, preto na určenie kritickej výšky používame menej presný odhad:

$$s_z \geq \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \cdot \max\{tg(A_N)\}$$

kde  $s_x$  je šírka,  $s_y$  hĺbka bunky a  $\max\{tg(A_N)\}$  je maximálny sklon reliéfu v danom území. Odhad je dostačujúci, ale menej presný, pretože platí:

$$\sqrt{s_x^2 + s_y^2} \cdot \max\{tg(A_N)\} \geq \max\{l \cdot tg(A_L)\}$$

Menšia presnosť vyplýva z toho, že cesta nemusí prechádzať územím s najväčším sklonom. Cez tieto oblasti sa cesty väčšinou nebudujú. Odhad sa dá vylepšiť tým, že maximálny sklon budeme počítat len z územia pokrytého cestami. Napríklad, ak veľkosť bunky rastra je 10 metrov a maximálny sklon je 65° (215%), tak kritická veľkosť bunky je 21,5 m.

Členité územie s veľkými sklonmi vyžaduje väčšiu výšku bunky ( $s_z$ ), alebo zmenšenie jej šírky ( $s_x$ ) a hĺbky ( $s_y$ ). Z toho vyplývajú požiadavky na priestorové rozlíšenie rastra. Problém roztrhnutia línie sa stráca, keď použijeme dostatočne vysoké bunky, v najhoršom prípade vyššie ako celkové prevýšenie územia (raster bude mať len jednu vrstvu). Požiadavky na priestorové rozlíšenie rastra vyplývajúce z iných vlastností dynamického modelu môžu vyžadovať menšiu výšku bunky ako je kritická. V tomto prípade je potrebné použiť upravený algoritmus rasterizácie línie zaručujúci jej spojitosť. Pri dvojnásobnej rasterizácii sa najskôr vytvorí dvojrozmerný rastrový obraz línie, potom sa bunkám línie priradia nadmorské výšky odčítané z DMR a vzniknuté trojrozmerné líniové segmenty sa rasterizujú do trojrozmerného rastra.

Po rasterizácii cestnej siete boli najskôr určené najkratšie cestné vzdialenosti k teplárni pre všetky bunky cestnej siete. Každéj bunke reprezentujúcej cestu bola priradená najkratšia vzdialenosť po ceste k teplárni. Algoritmus začal počítat od teplárne a postupne iteratívnym procesom sa spracovali všetky okolité bunky. Výpočet bol ukončený po dosiahnutí globálneho optima.

V druhom kroku sa vyhľadali najkratšie dopravné vzdialenosti pre ostatné bunky rastra. Procedúra začala počítať od buniek ciest a pokračovala o povrchu digitálneho modelu reliéfu pokiaľ neboli vypočítané najkratšie cestné dopravné vzdialenosti pre každú bunku DMR.

Následne bola urobená projekcia výsledných dopravných vzdialeností do dvojrozmerného rastra. Raster bol prekrytý s digitálnou mapou lesných porastov a zonálnou štatistikou určené priemerné dopravné vzdialenosti pre každý porast. Výsledné hodnoty boli uložené v databázových tabuľkách pre ďalšie spracovanie. Raster dopravných vzdialeností bol klasifikovaný do požadovaných desať-kilometrových vzdialenostných zón pre ktoré bola navyše vypočítaná výmera a zastúpenie kategórií sklonu reliéfu. Výsledky boli reprezentované vo forme krostabuliek, tlačových zostáv a mapových výstupov.

Výsledná geografická databáza obsahovala všetky údaje potrebné k záverečným analýzám a vypracovaniu finálnych výstupov: digitálna mapa lesných porastov, dopravné vzdialenosti a obmedzujúce prvky. Údaje boli vyexportované do databázy NLC – Ústavom lesných zdrojov a informatiky, v ktorej boli urobené záverečné výpočty objemu dostupnej biomasy.

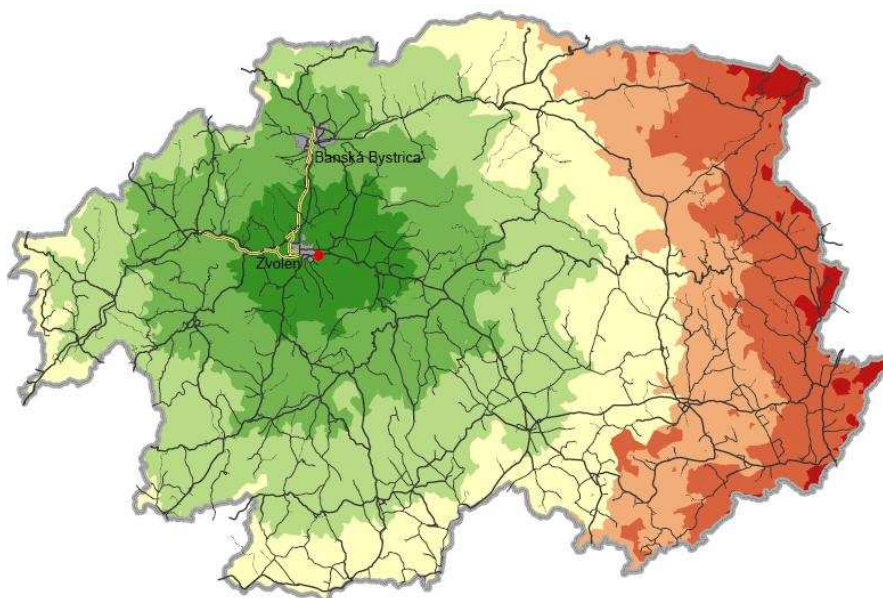
## 4 Výsledky a záver

Geografický informačný systém bol v rámci projektu použitý na import, kontrolu a prípravu geografických údajov, výpočet dopravných vzdialeností a zón v dvoj a trojrozmerných rastroch (Obr. 4.1, Tab. 4.1), spracovanie digitálneho modelu reliéfu územia a odvodenie jeho morfometrických parametrov, určenie obmedzujúcich faktorov, nakladanie máp a stanovenie objemu dostupnej biomasy vo vzdialenostných zónach. Tieto výsledky slúžili ako podklady pre zhodnotenie dostupnosti biomasy v regióne a odhad finančných nákladov.

Vzdialenostná analýza bola úspešne realizovaná v trojrozmerných temporálnych rastroch, pričom sa použili kombinované prostriedky a metódy pre spracovanie dvoj a trojrozmerných geografických údajov. Trojrozmerná vzdialenostná analýza poskytuje presnejšiu aproximáciu dopravných vzdialeností, ktorá odráža aj lokálnu rozmanitosť reliéfu. Rozdiely sa prejavujú najmä v členitých oblastiach s veľkým sklonom. Spracovanie trojrozmerných temporálnych rastrov je náročnejšie na objem údajov i rýchlosť spracovania. Vyžaduje použitie počítačových systémov s dostatočnou kapacitou pamäti, vyššou priepustnosťou údajov a rýchlym prístupom na pevný disk. Výrazné zrýchlenie výpočtov možno dosiahnuť vhodným nastavením a využitím diskovej medzipamäte (disk cache).

Temporálne rastre navyše umožňujú vytvorenie modelov dopravných vzdialeností so vstupnými parametrami meniacimi sa v čase. Dynamický model zohľadňuje sezónne zmeny a podmienky, ako napr. neprejazdnosť niektorých úsekov ciest v zimnom období, výstavba a otvorenie nových ciest. Výstupy dynamických modelov prispievajú k zvýšeniu efektívnosti využívania dostupných zdrojov, podporia plánovanie výrobných kapacít a množstva zásob, objem dopravy, tvorbu časových harmonogramov a platobných kalendárov.





Obr. 4.1: Cestné vzdialenostné zóny pre VÚC Banská Bystrica (po 20km, 2D)

Tab. 4.1: Vzdialenostné zóny (2D) k areálu teplárne

Vzdialenosť (km)	Výmera (km <sup>2</sup> )	Zastúpenie (%)	Kumulatívna výmera (km <sup>2</sup> )	Kumulatívne zastúpenie (%)
0 – 20	617.8	6.5	617.8	6.5
20 – 40	1 853.9	19.6	2 471.7	26.2
40 – 60	2 543.7	26.9	5 015.4	53.1
60 – 80	1 956.3	20.7	6 971.7	73.8
80 – 100	1 146.8	12.1	8 118.5	85.9
100 – 120	1 219.9	12.9	9 338.3	98.8
120 – 140	112.3	1.2	9 450.7	100.0

## Referencie

1. Frank, A., U. - Raubal, M. - Vlugt, M. *Využitie GI a GIS*. Preklad. Inco Copernicus 977136, EU 2000, CETRA, Žilinská univerzita, 169 str.
2. Ilavský, J. – Laitila, J. – Tahvanainen, T. – Žiaková, M. – Bavlšík, J. – Tuček, J. – Koreň, M. – Papaj, V. *Štúdiá o dostupných zdrojoch biomasy a ich efektívnom*

*zabezpečení na výrobu energie vo Zvolenskej teplárenskej, a.s.* Finnish Forest Research Institute – Joensuu Research Unit, Joensuu, Finland, Národné lesnícke centrum – Ústav lesných zdrojov a informatiky, Zvolen, Národné lesnícke centrum – Lesoprojekt, Zvolen, Technická univerzita – Lesnícka fakulta – Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Zvolen, september 2006, 72 str.

3. Tuček, J. *Geografické informační systémy – principy a praxe*. Computer Press Praha, 1998, 424 str.
4. Tuček, J. – Suchomel, J. *Geoinformatika v sprístupňovaní lesov a optimalizácii ťažbovo-dopravných technológií – možnosti, stav a perspektívy*. Vedecké štúdie 5/2003/B, Technická univerzita vo Zvolene, 2003, 166 str.