



Západočeská univerzita

Fakulta aplikovaných věd

Katedra matematiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Plzeň, 2008

Tomáš Řehák



Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra matematiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analytické možnosti GIS nad rastrovými daty

Plzeň, 2008

Tomáš Řehák

Zadání Diplomové práce (vložený list)

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr navazujícího magisterského studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Rokycanech 22. 7. 2008

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Karlovi Jedličkovi za metodické vedení a věcné připomínky.

Zároveň děkuji Krajskému úřadu v Plzni za poskytnutí dat. Poděkování patří také mojí rodině za morální a finanční pomoc během celého studia.

Klíčová slova:

GIS, digitální model reliéfu, dynamická segmentace, mapová algebra, povrch nákladů, povrch vážené vzdálenosti, nejlevnější cesta.

Abstrakt:

Předmětem této práce je vytvoření vhodného algoritmu, který metodami mapové algebry nalezně nejméně náročnou cestu mezi dvěma body nad rastrovým povrchem a digitálním modelem reliéfu. K vytvoření analýzy je použit vylepšený digitální model reliéfu, do nějž byly začleněny kosterní hrany s výškovou informací. Výšky kosterních hran byly získány postupem dynamické segmentace. Výsledný funkční GIS byl vytvořen pomocí software společnosti ESRI.

Keywords:

GIS, digital elevation model, dynamic segmentation, map algebra, cost surface, cost weighted, cost path.

Abstract:

This dissertation aims to develop an algorithm that will find, by using the methods of map algebra, the easiest way between two points above a screen surface and a digital elevation model. To set up the analysis, an improved digital elevation model, with integrated slope crest carrying the elevation information, is used. The slope crest elevations were obtained by the dynamic segmentation process. The resultant GIS was created by the software of ESRI Company.

Obsah:

1	ÚVOD	7
2	DIGITÁLNÍ MODEL RELIÉFU	9
2.1	Druhy DMR a způsoby jeho uložení	11
2.1.1	Vektorové znázornění výškopisu	11
2.1.2	DMR jako TIN	13
2.1.3	Grid reprezentace	16
2.1.4	Datový model lattice	18
2.1.5	Plátový model	20
2.2	Postup tvorby DMR	21
2.2.1	Triangulace	22
2.3	Interpolační metody pro tvorbu DMR	23
2.3.1	Interpolace z TIN do rastrové podoby DMR	24
2.3.2	Interpolace z vektorových prvků na rastr.....	26
3	MOŽNOSTI VYLEPŠENÍ DMR	28
3.1	Začlenění kosterních hran jako nových povinných hran do DMR	30
3.2	Požadavky výpočetního algoritmu	32
3.3	Popis algoritmu	33
3.3.1	Procedura „Vynuluj Rozvodnice“.....	34
3.3.2	Procedura kontrolující správnost dat	34
3.3.3	Procedura „DoplňZPrusecikum“	35
3.3.4	Procedura výpočtu dynamickou segmentací.....	36
3.4	Zhodnocení a přínos začlenění nových hran do DMR.....	37
4	PRÁCE S RASTROVÝMI DATY	40
4.1	Mapová algebra.....	41
4.2	Porovnání rozšířených GIS software používajících mapovou algebru.....	43
4.2.1	Mapová algebra v GIS GRASS	43
4.2.2	SAGA GIS a mapová algebra	44
4.2.3	Práce s mapovou algebrou v ArcGIS	45
4.2.4	Volba GIS software pro analýzu hledání nejlevnější cesty.....	47
5	TVORBA VYBRANÉ ANALÝZY NAD RASTROVÝMI DATY	48
5.1	Zdroj dat pro analýzu	50
5.2	Povrch nákladů.....	51
5.2.1	Faktor rovinné vzdálenosti.....	51
5.2.2	Horizontální faktory povrchu nákladů	51
5.2.3	Faktor terénního reliéfu.....	52
5.2.4	Vertikální faktor povrchu nákladů	52
5.2.5	Stanovení hodnot povrchu nákladů.....	53
5.2.6	Postup tvorby povrchu nákladů v ArcGIS	55
5.3	Povrch vážené vzdálenosti	59
5.4	Povrch vážených směrů	61
5.5	Rastr alokací (Cost Allocation).....	62
5.6	Tvorba povrchu vážené vzdálenosti, vážených směrů a rastru alokací v ArcGIS	62
5.7	Nalezení nejlevnější cesty	64
5.8	Využití analýz nad rastrovými daty	64
5.8.1	Srovnání analýzy s rastry a vektory při hledání nejlevnější cesty	66
6	ZÁVĚR	69
7	SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ A LITERATURY	71
8	SEZNAM PŘÍLOH	74

1 Úvod

Když jsem přemýšlel nad tématem, které by bylo hodno diplomové práce, ujednotil jsem si nejprve cíle, které by měla práce splňovat. Chtěl jsem napsat práci, která bude dále využitelná a přinese něco nového do oblasti, jíž se věnuji. Zároveň jsem také chtěl vytvořit práci uplatnitelnou i v jiných oblastech, než jsou geografické informační systémy a mapování obecně. Rozhodl jsem se tedy pro téma, jehož náplní je hledání nejrychlejší, nejsnadnější, chcete-li nejlevnější cesty v terénu. Toto je významným způsobem využitelné v mnoha oborech a jiných aplikacích, a proto mě dané téma oslovilo natolik, že jsem se rozhodl věnovat mu část této práce.

Každý z nás jistě v přírodě uvažoval nad problémem, jak se z určitého bodu dostat do bodu cílového tak, aby se musel co nejméně namáhat. Určitě mnozí řešili otázku, jestli bude vzhledem k okolním podmínkám lepší jít ke stanovenému cíli po zpevněné cestě, nebo přímo přes les a ostatní přírodní živly. Není jednoduché vzít v potaz všechny okolní faktory a vybrat skutečně optimální trasu a často se může stát, že naše volba bude nesprávná. Uvažujme ještě závažnější případ, kdy nejde jen o pěší turistiku, ale například o to, aby se záchranná služba dostala co nejrychleji ze svého výjezdového místa na místo, kde se nachází zraněný. Pak může být aplikace, která určí nejlevnější cestu, životně důležitá.

Cílem práce je tedy vytvořit pomocí nástrojů geografických informačních systémů (GIS) postup pro výpočet nejlevnější cesty mezi dvěma body v terénu. Nalezení takovéto cesty má být uskutečněno na základě analýzy digitálního modelu reliéfu a polohopisu v rastrové podobě. Práce je na základě zadaných úkolů a cílů rozvržena do následujících částí:

V první kapitole se zaměříme na problematiku digitálního modelu reliéfu (DMR), jakožto určujícího činitele při analýzách v oblasti GIS, jako je například hledání nejlevnější cesty. Jeho věrohodnost je nutnou podmínkou k vytvoření správné analýzy.

V navazující praktické části práce se budeme věnovat otázce, jak digitální model reliéfu vylepšit. Začleněním dalších informací do modelu zhotovíme korektní DMR. K tomuto účelu vytvoříme skript v programu Visual Basic for Application, který k nadefinovaným kosterním hranám přiřadí výšky a vytvoří z nich trojrozměrné linie začlenitelné do DMR.

Následuje teoretická část práce, která se zabývá GIS nástroji pro práci s rastry a způsoby určení nejlevnější cesty. Seznámíme se zde s pojmy jako mapová algebra, povrch nákladů, povrch vážené vzdálenosti a dalšími. Vytvoříme postup pro nalezení nejlevnější cesty, který bude podrobně popsán.

Na tuto část již plynule přechází část praktická, ve které si nad daty z Plzeňského kraje ukážeme funkčnost algoritmu a jak konkrétní nejlevnější cestu najít. Vytvoříme zajímavé mapové výstupy, jako například mapu dostupnosti záchrany za určitý čas, či mapu oblastí působnosti jednotlivých výjezdových míst záchranných sborů.

V závěru práce zhodnotíme cíle, kterých práce dosáhla, a nastíníme také možnosti dalšího využití práce a použití výsledků v praxi.

2 Digitální model reliéfu

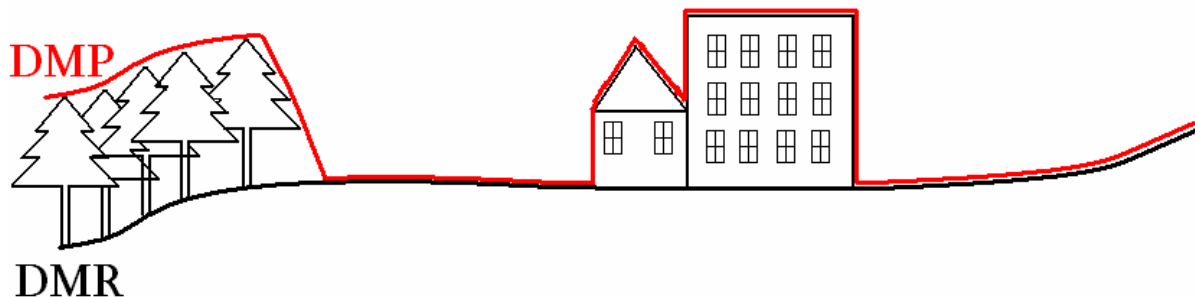
Při analytických výpočtech nad rastrovými daty, jako je určení nejlevnější cesty mezi dvěma body, vstupují do výpočtu dvě digitální mapová díla. Prvním z nich je rastrová mapa zobrazující polohopis terénu a druhou velmi podstatnou složkou je digitální model reliéfu (DMR). Podklad polohopisu v rastrové podobě je mapa znázorňující námi požadované prvky polohopisu, které vstupují do výpočtu povrchu nákladů (viz. kap.5.2). Tato data byla převzata ze Základní báze geografických dat (ZABAGED), ve které jsou uložena jako data vektorová. Jedná se o státní mapové dílo, jehož přesnost odpovídá přesnosti mapy 1:10 000. Do požadované rastrové podoby byla převedena rasterizací (viz kapitola 5.2.6). Mapou polohopisu a její přesností se nebudeme dále zabývat.

Větší pozornost budeme věnovat postupu tvorby DMR, ke kterému různé GIS software přistupují odlišnými způsoby.

Ještě než se více rozepíšeme o DMR, je třeba zavést správnou terminologii a ujasnit si rozdíly mezi podobnými reprezentacemi digitálních výškových modelů. Podle definic z [24] rozlišujeme tyto výškové modely:

- **Digitální model terénu** (Digital terrain model - DMT) je digitální reprezentace terénního reliéfu zemského povrchu v paměti počítače skládající se z dat a algoritmu, který umí interpolovat výšky mezilehlých bodů.
- **Digitální model reliéfu** (Digital elevation model – DEM), známý v češtině pod zkratkou DMR, je digitální model terénu, který pracuje s výškami nad hladinou moře. V některých publikacích [11] jsou DMT a DMR brány jako významově shodné termíny.
- **Digitální model povrchu** (Digital surface model - DSM) je speciální digitální model terénu vytvořený zpravidla použitím automatických prostředků (například obrazové korelace ve fotogrametrii) tak, že zobrazuje povrch terénu a vrchní plochy všech objektů na něm, jako například střechy, koruny stromů apod. V češtině se označuje zkratkou DMP a jeho ukázka je vyobrazena společně s DMR na obrázku 2.1.

Ukázka rozdílů mezi digitálním modelem povrchu (DMP) a digitálním modelem reliéfu (DMR)



Obr. 2.1 Porovnání DMR a DMP. Zpracováno podle [10].

Další ze zdrojů literatury [18] této práce používá definici, která charakterizuje DMR následovně: Digitální model reliéfu je digitální reprezentace reliéfu terénu složená z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje odvozovat nadmořské výšky v libovolných bodech nacházejících se uvnitř modelované oblasti. Jednodušeji řečeno, DMR je počítačová trojrozměrná reprezentace reliéfu Země, která vznikne měřením na několika (významných) bodech reliéfu. Ostatní body, jež vytvoří kontinuální povrch terénu, jsou vypočteny deterministicky – interpolací zvoleným algoritmem. Ten se ovšem v různém software může lišit.

Dvě výše zmíněné definice DMR jsou podobné, jen s tím rozdílem, že specifikují daný problém z jiného pohledu. Zatímco [18] více rozepisuje strukturu dat modelu a naznačuje způsob tvorby DMR, definice [24] se věnuje způsobu uložení DMR v paměti počítače.

DMR nachází široké uplatnění v nejrůznějších sférách lidské činnosti: především v geografických informačních systémech a v geovědách obecně (vzdálenostní-, hydroanalýzy aj.). Ve stavebnictví je využíván při tvorbě profilu terénu, při územním plánování apod. V armádě jsou například na základě DMR vytvářeny analýzy viditelnosti, průchodnosti, dostupnosti radarového signálu, nebo slouží k navádění zbraňových systémů. Fotogrammetrie využívá DMR při produkci ortofot, kresbě vrstevnic a při tvorbě topografických map. Trojrozměrný model reliéfu je využíván také v oblastech jako je lesnictví, pedologie, klimatologie a dalších.

Na digitální model části zemského povrchu jsou proto velmi často kladeny vysoké požadavky týkající se jeho přesnosti, a je tedy třeba, aby DMR vstupující do rozsáhlejší analýzy byl co nejspolehlivější.

2.1 Druhy DMR a způsoby jeho uložení

Způsobů, kterými může být reliéf Země v paměti počítače uložen a následně vykreslen na monitor, je více. Možností, v jaké podobě budeme pracovat s informací o tvaru reliéfu, máme pět, ale skutečně využitelné v geovědách jsou čtyři. Jedná se vlastně o způsoby tvorby DMR samotného, na jehož počátku je prostorově nehomogenně uspořádaná množina dat. Níže uvedené datové struktury jsou 2,5 D reprezentace, protože požadovaná výška (Z) je funkcí polohy (X, Y) v prostoru (tj.: $Z = f(X, Y)$).

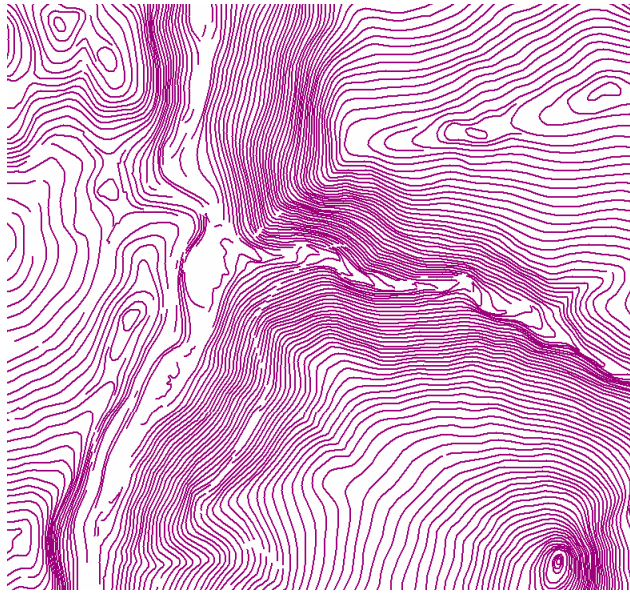
Při tvorbě DMR dochází k uspořádání množiny vstupních dat a nalezení vhodné interpolační funkce umožňující odvozovat výšky v neznámých bodech. To vše při použití minimálního množství dat, které ještě zabezpečí odpovídající reprezentaci reliéfu v geoinformačním systému [18]. Jak už jsme zmínili, data se ukládají do vhodných datových struktur s využitím různých datových modelů:

- vektorová reprezentace
- TIN
- grid (rastr)
- lattice (mřížka)
- plátový model

Každý ze způsobů reprezentace má své přednosti i nevýhody. Uveďme nejzákladnější vlastnosti každé z nich.

2.1.1 Vektorové znázornění výškopisu

Nejnámějším znázorněním výškopisu pro běžného člověka pracujícího s mapou zůstanou vrstevnice, se kterými se setkáme na běžných turistických mapách. Na turistických mapách nalezneme také bodové výškové údaje v podobě kót a často také nadmořskou výšku jezer (ploch). Tento typ znázornění 3D povrchu je tedy velmi rozšířený a dostupný pro většinu území na Zemi. Nejdůležitějším parametrem vektorové reprezentace je výškový rozestup vrstevnic, neboli ekvidistance (krok, po kterém jsou vrstevnice vykresleny), protože jsou největším nositelem výškové informace.



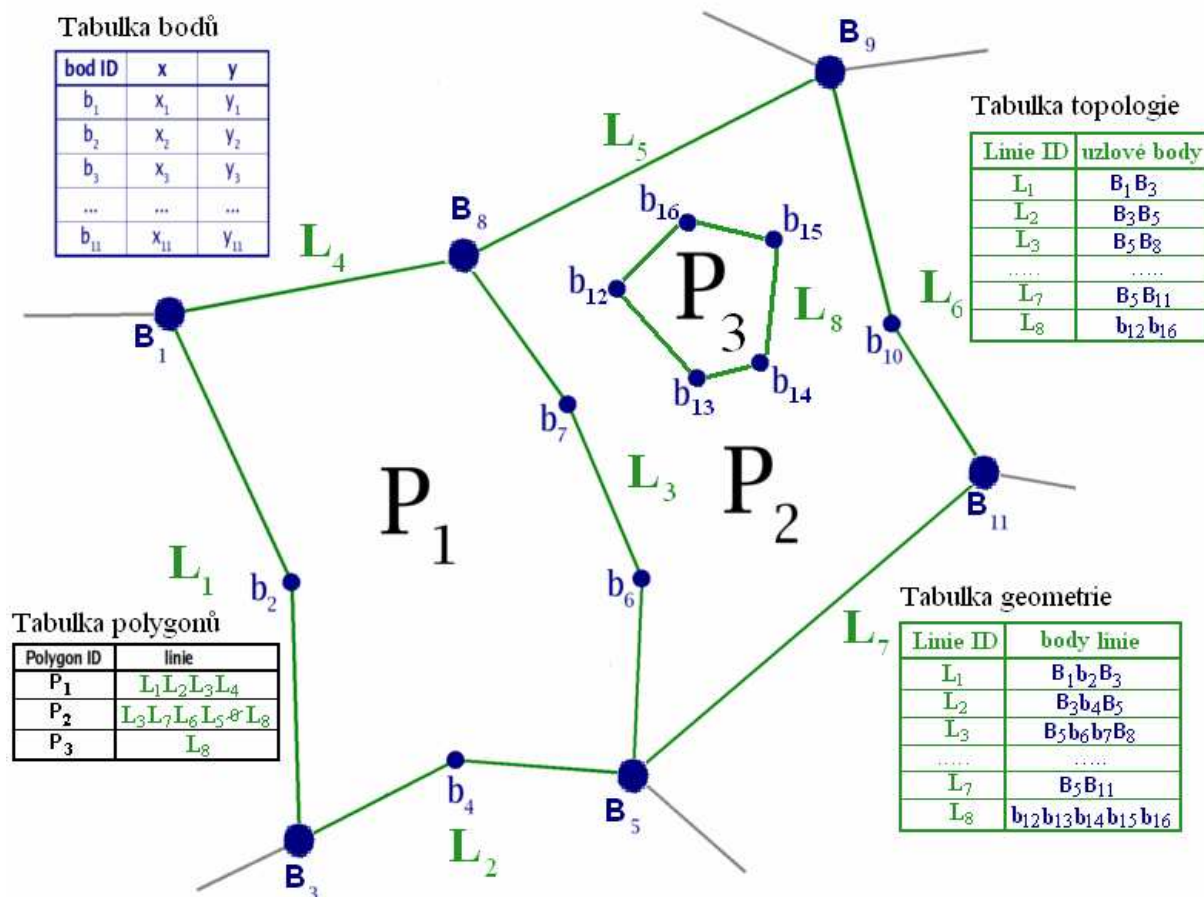
Obr. 2.2 Znáznornění výškopisu pomocí vrstevnic. Data převzata ze ZABAGED.

Přeneseme-li se do světa GIS, mluvíme o výškopisu z vektorových prvků (body, linie a polygony s výškovou informací). Průběh reliéfu je reprezentován jen podél vrstevnic, ve výškovém bodě a v místě výškově určených vodorovných ploch. Mezi těmito prvky musí být DMR interpolován. Tvar DMR vystihují především vrstevnice (obr. 2.2).

Je třeba zmínit, že analytické nástroje přímo nad vektorovými prvky výškopisu nejsou obvykle k dispozici. Proto je povrch znázorněný vrstevnicemi převáděn do formátů uvedených v následujících kapitolách.

Body, linie a polygony, ze kterých se model skládá, jsou stavebními prvky vektorových GIS. Existuje mnoho modelů určených k reprezentaci geografických objektů pomocí vektorové grafiky, které se liší jak ve složitosti struktury, tak i v možnostech využívání topologických vztahů. Topologie je matematický způsob, jak explicitně vyjádřit prostorové vztahy mezi jednotlivými geometrickými objekty. Existují tři základní topologické koncepty [11]:

- **Konektivita** - dvě linie se na sebe napojují v uzlech.
- **Definice plochy** - linie, které uzavírají nějakou plochu, definují polygon.
- **Sousednost (princip okřídlené hrany)** - linie mají směr a nesou informaci o objektech napravo a nalevo od nich.

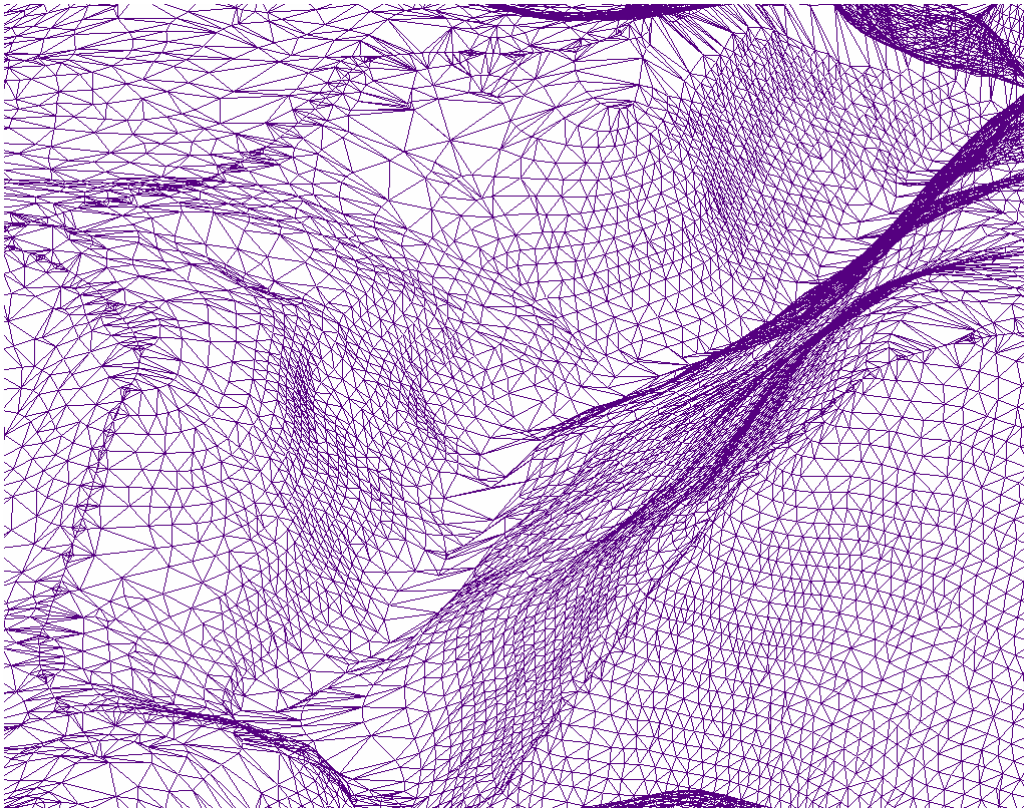


Obr. 2.3 Hierarchický datový model uložení vektorových dat. Zpracováno podle [11]

Mezi neznámější vektorové datové modely patří: „špagetový“ model, základní topologický model, hierarchický model (obr. 2.3) a rozšířený topologický model. Více se o uvedených modelech dozvíme například v [11].

2.1.2 DMR jako TIN

Dalším ze způsobů uchování 3D modelu reliéfu je nepravidelná trojúhelníková síť, známá pod zkratkou TIN (z anglického triangular irregular network). Již z názvu je patrné, že reliéf terénu je reprezentován nepravidelnou sítí trojúhelníků (obr. 2.4). Sousední trojúhelníky na sebe navazují, protože mají společnou hranu, a výsledný povrch je proto spojitý. Velká výhoda modelu je, že body (vrcholy trojúhelníku) mohou být rozmístěny s různou hustotou, čímž se stane TIN velmi efektivní, protože v členitějším reliéfu terénu se použije hustější síť bodů, v plošším reliéfu pro změnu síť řidší. Pro výpočty s TIN je také výhodné, že trojúhelník má v TIN konstantní sklon.



Obr. 2.4 Nepravidelná trojúhelníková síť. Data převzata ze ZABAGED.

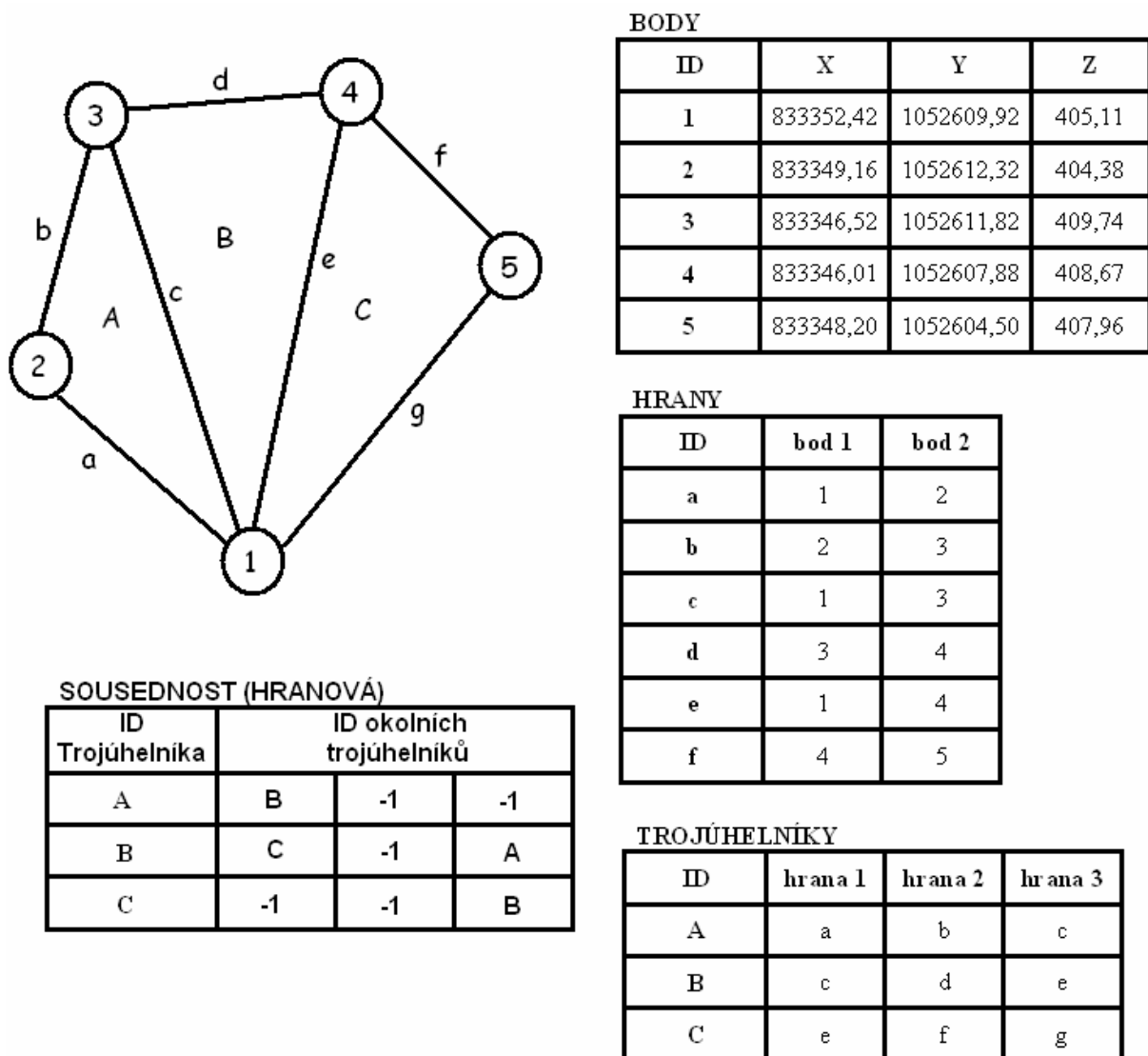
Podíváme-li se na skladbu TIN, je třeba si uvědomit, že datový model je tvořen těmito prvky:

- a) **vrcholy**, které odpovídají bodům ve vstupních datech,
- b) **hranami**, které spojují vrcholy jednotlivých trojúhelníků a jež mohou být ztotožněny s liniovými geoprvky obsaženými ve vstupních datech,
- c) **trojúhelníky**, které jsou vymezeny třemi vrcholy a hranami a je možné pro ně počítat velikost sklonu, orientaci ke světovým stranám apod.

Při vhodném rozmístění bodů (vrcholů) se tyto trojúhelníky těsně přimykají ke skutečnému reliéfu [30]. Trojúhelníky musí být generovány tak, aby byly co nejrovnostannější, tj. je nezbytné eliminovat úzké protáhlé trojúhelníky. Tento problém řeší Delaunayova triangulace, která je známá také z postupu triangulace používané při tvorbě geodetických základů. Více se o triangulaci dozvíme v kapitole 2.2.1.

Jak již bylo naznačeno, model DMR ve tvaru TIN má řadu výhod. Proměnlivost hustoty bodů sítě, jako lokální přizpůsobivost okolním podmínkám, umožňuje výstižnější reprezentaci členitějšího terénu, a tím se dokáže lokálně přizpůsobovat prostorové rozlišení na základě tvárnosti terénu. Předpokládáme, že v místech členitého reliéfu bude naměřeno více dat, než-li na reliéfu rovinném, a vytvořený TIN tak bude v těchto místech podrobnější. Na

rozdíel od rastrových reprezentací se TIN přizpůsobí vstupním datům a výsledné modely budou přesnější, což má vliv na analýzy a při volbě měřítka.



Obr. 2.5 Příklad datové struktury TIN reprezentace. Zpracováno podle [23] a [11].

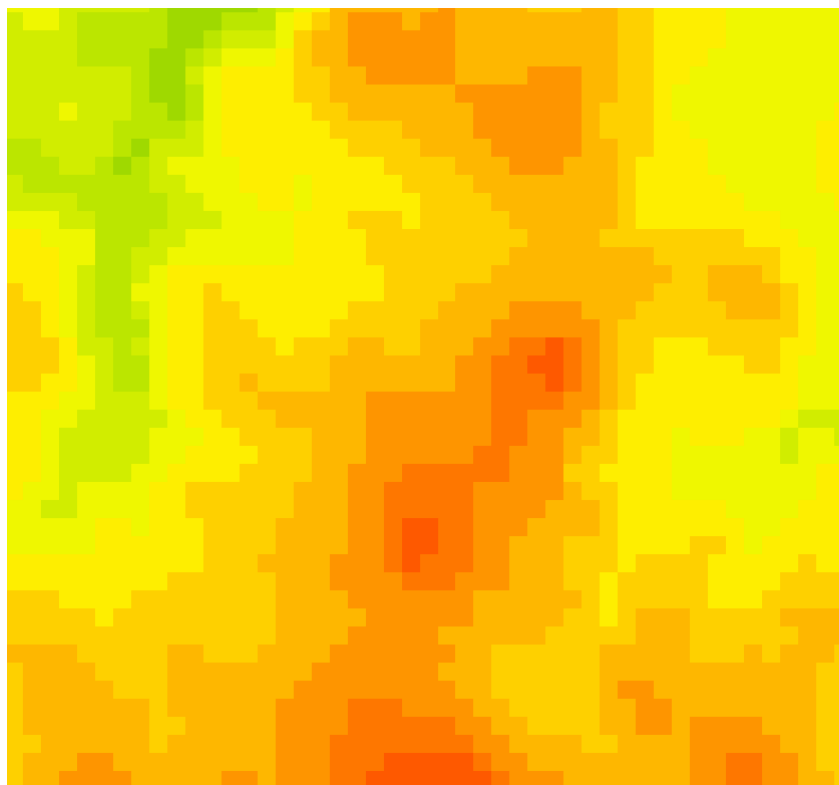
Tento model, podobně jako níže zmíněné rastry a lattice, obtížněji znázorňuje roviny (např. vodní plochy), než v případě modelů, které znázorňují výškopis vektorově. Procedury pro modifikaci, zobrazování a analýzy nad tímto DMR jsou komplikovanější než nad grid. Také způsob uložení TIN je složitější. Používají se různé datové struktury. Příklad, jak ukládat DMR typu TIN, představuje obrázek 2.5. V tabulce jsou uloženy zvlášť jednotlivé body tvořící hrany, jež vidíme v další tabulce. Hrany vytvářejí jednotlivé trojúhelníky, které jsou uloženy ve třetí základní tabulce. Struktura uložení datového modelu bývá složitější. Obvykle jsou například v tabulce ukládány i sousední prvky popisovaného prvku pro lepší

vyhodnocení topologických pravidel a některých analýz. V naší ukázce uložení dat je znázorněno uložení sousednosti na základě shodných hran (nesousednost je vyjádřena hodnotou -1). Podobně lze znázornit také sousednost na základě společných bodů hran trojúhelníku (pro detekci trojúhelníků sousedících spolu jen vrcholy), ovšem zde se vyskytuje problém, že takto sousedících trojúhelníků je obecně N .

2.1.3 Grid reprezentace

DMR typu grid je tvořen čtvercovou maticí bodů. Jeden bod reprezentuje čtvercovou plošku s konstantní nadmořskou výškou. Reliéf je reprezentován hranoly s horizontální horní plochou. Výškový model vystihuje představa různě vysokých protáhlých hranolů se stejnou šířkou a délkou (čtvercovou podstavou) a různou výškou podle nabývané nadmořské výšky. Hodnota nadmořské výšky je vyjádřena parametrem buňky rastru (obr. 2.6). DMR ve formátu GRID proto odpovídá rastrovému datovému modelu, a tento model někdy označuje jako rastrová reprezentace DMR. Pro ukládání se vedle formátů, které využívají geografické informační systémy implicitně (např. GRID), využívá také možnost exportovat rastry i do formátů známých z jiné sféry než GIS (PNG, JPG, BMP apod.). Podmínkou je, že musí být pro účely GIS lokalizovatelné. Přesnost a věrnost reprezentace reliéfu je dána vzdáleností bodů v grid, tedy velikostí čtvercové plošky (krok vzorkování). Některé terénní prvky, jako údolí a hřbety, nemusí být daty zachyceny korektně. Jedinou možností je snížení vzdálenosti bodů (krok vzorkování), ale za cenu nárůstu objemu dat a v místech, kde je takto jemná čtvercová ploška (grid) zbytečná, naroste redundance dat.

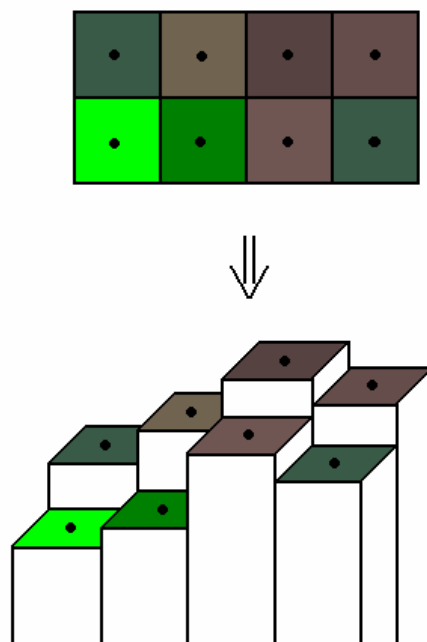
Velká redundance a objem dat patří k nevýhodám tohoto formátu. V případě, že chceme mít model, který dobře zobrazuje skutečný stav, musíme mít velmi jemné vzorkování (pro plošné prvky platí, že velikost buňky musí být menší než nejmenší prvek, který chceme na mapě znázornit). Ale ani v tomto reálném případě nedojde k přesnému zachycení význačných prvků georeliéfu, jako jsou vrcholy, hřbetnice či dna a údolnice. Rastrový formát neumí pracovat s liniovými a plošnými prvky. Vhodným se tento formát může stát v terénu s méně členitým terénem, bez náhlých změn a hran. Výhodou také je, že se na něm snadno provádí většina analýz, protože algoritmy na tomto formátu jsou jednoduché, jak ukáže i tato práce. Využijeme také faktu, že se rastrový model reliéfu dobře integruje s ostatními rastrovými daty v GIS.



Obr. 2.6 DMR vyjádřený pomocí grid. Data převzata ze ZABAGED.

Při vytváření DMR pomocí této rastrové reprezentace zde stojí proti sobě, respektive ve vzájemné závislosti, velikost a redundance dat a požadovaná přesnost. Je nutné uvážit veškeré okolnosti použití a při tvorbě DMR zvolit vhodnou velikost buňky vzhledem k požadovanému účelu (k samotné analýze).

Podíváme-li se blíže na datovou strukturu uložení tohoto modelu, uvidíme, že je velmi podobná dalšímu způsobu vyjádření DMR, mřížce (lattice). V obou případech se jedná o rastrové znázornění reliéfu, proto i metoda uložení do paměti počítače je stejná. Rastr si můžeme představit jako matici, ve které čísla v konkrétních řádcích a sloupcích udávají hodnotu rastru. Matice má svůj rozměr (počet řádků a sloupců), pravý horní (nebo jiný) roh matice je lokalizovaný a jak jsme už zmínili, pro rastr je určující hodnota velikosti buňky. Ukázkou uložení rastrových dat zachycují obrázky 2.7 a 2.9. Hodnoty rastru představují barvy jednotlivých buněk matice.



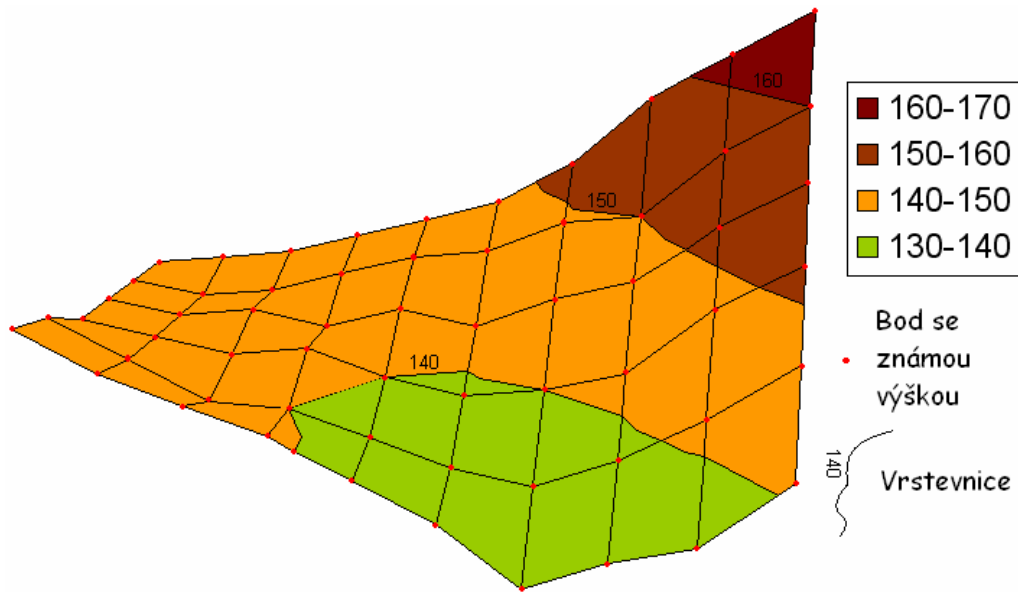
Obr. 2.7 Reprezentace rastru pomocí matice a znázornění ve 3D. Zpracováno podle [10].

2.1.4 Datový model lattice

Pro digitální model reliéfu typu mřížka (anglicky lattice) je základním stavebním kamenem bod, který reprezentuje nadmořskou výšku pouze v daném místě (to je rozdíl od předešlého modelu). Obvykle model představují jednotlivé čtveřice bodů tvořící čtvercovou buňku, jejíž rohy mají různou nadmořskou výšku. Reliéf není v rámci buňky rovinný, ale je reprezentován povrchem, jehož průběh není jednoznačný (záleží na interpolujícím algoritmu) [18].

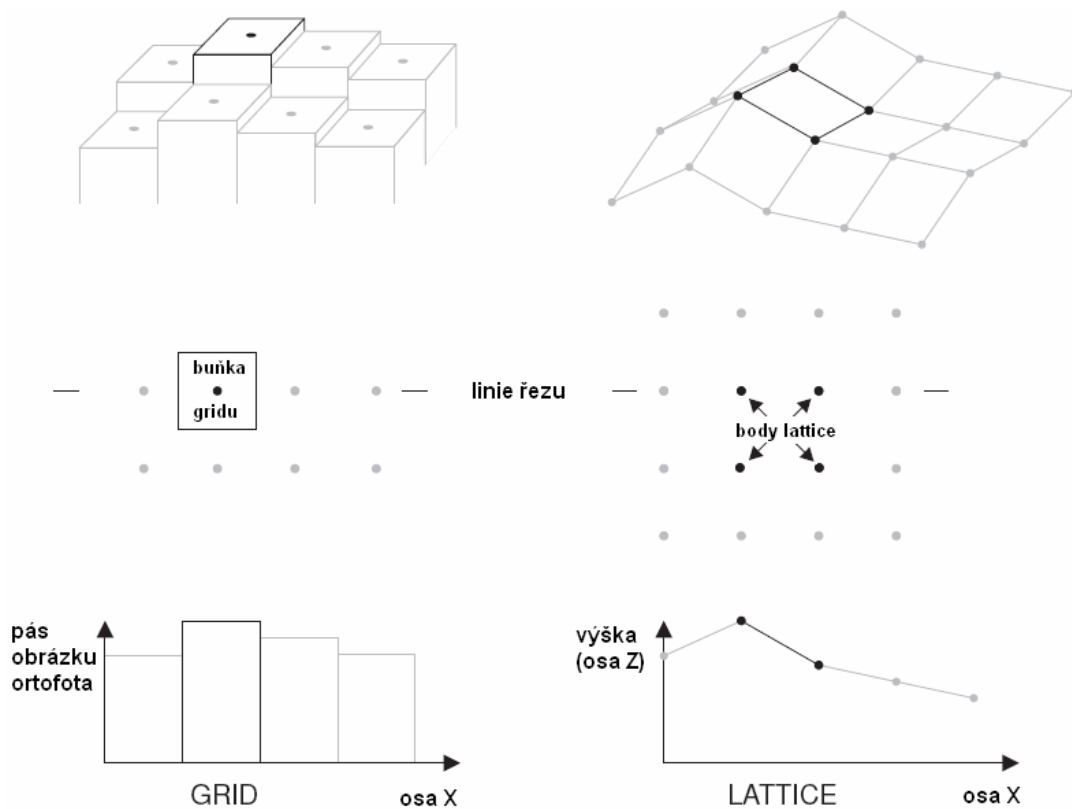
Rovina je definována třemi body, proto není obecně povrch buňky (definován čtyřmi body) rovinný. Tento problém je vyřešen rozdělením buňky na dva trojúhelníky podle zadaného kritéria (například stanoveným směrem, nebo nejkratší možnou vzdáleností).

Sousední buňky na sebe navazují v lomových hranách (nejedná se o hladký přechod), ale ve výsledném modelu vzniká souvislá plocha, a tedy spojitý model reliéfu. To je hlavní výhoda před předešlým modelem. Ovšem provádění analýz nad tímto modelem je složitější než nad grid. Proto jsou analýzy uskutečňovány nad modelem grid, a s tímto modelem se můžeme setkat pouze při vizualizaci DMR ve 3D, kdy chceme mít zobrazenou souvislou plochu (obr. 2.8).



Obr. 2.8 DMR v podobě mřížky

Stejnou otázkou jako u grid modelu je hustota bodů, a tím velikost čtvercové plošky, které společně tvoří celkový povrch. Uložení dat se děje opět pomocí maticové struktury obdobně jako u předchozího modelu. Ukažme si na následujícím obrázku 2.9 rozdíl mezi grid a lattice:



Obr. 2.9 Porovnání modelu grid a lattice. Převzato z [10].

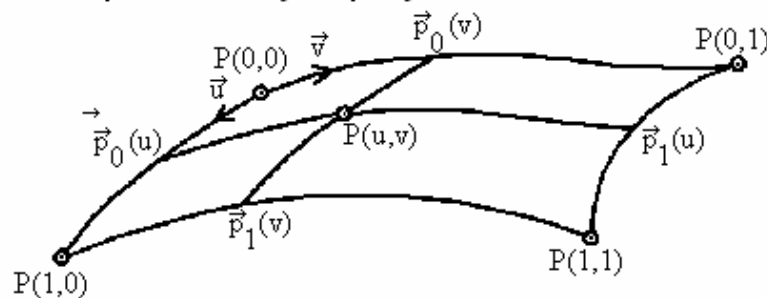
2.1.5 Plátový model

Poslední model, který zmíníme, je model plátový. Tento typ modelu předpokládá, že se povrch rozdělí na nepravidelné, obecně křivé plošky, v půdorysu trojúhelníkového nebo čtyřúhelníkového tvaru. Tyto útvary mají společnou hranici, čímž je zaručena spojitost v půdorysu. Pro popis jednotlivých plošek se například používají polynomické funkce (jejich stupeň souvisí se stupněm hladkosti navázání jednotlivých plátů), či spline funkce.

Podle [28] je jedním z mnoha problémů vytváření plátového modelu terénu zaoblování na sebe navazujících elementárních plátů aproximujících terénní plochu. Nejčastěji používanou metodou pro zaoblování je tzv. Coonsova plocha. Coonsova plocha je plocha kvadratická splňující podmínky, že na rozhraní plátů je spojitá alespoň první derivace reliéfu a plocha prochází všemi krajními body plochy plátu. Více je možné se dočíst v [28].

Výsledné řešení reliéfu je při větším počtu vrcholů obtížné, proto se tento model příliš nevyužívá. Využití najde spíše jen v pokročilejších metodách vizualizace než v analytických metodách. Uložení se děje na základě znalosti vstupních bodů a matematického popisu aproximující funkce, tedy Coonsovy plochy. Model je ve výsledku uložen jako matice vektorů (obr. 2.10).

Coonsova plocha se čtyřmi pláty



Matice vektorů

$$\begin{bmatrix} P(0,0) & p_0(v) & P(0,1) \\ p_0(u) & P(u,v) & p_1(u) \\ P(1,0) & p_1(v) & P(1,1) \end{bmatrix}$$

Obr. 2.10 Ukázka Coonsovy plochy a její vyjádření maticí vektorů. Převzato z [5].

2.2 Postup tvorby DMR

K tomu, abychom mohli vytvořit výškový datový model, je třeba získat potřebná 3D data. Volba zdroje dat a interpolační metody významně ovlivňují kvalitu výsledného DMR. Mezi měřená data nepatří jen samotné nadmořské výšky, ale také další informace o specifickém chování reliéfu (terénní hrany, polygony s konstantní výškou aj.). Ke sběru dat slouží řada metod. Velmi přesným, ale časově náročným způsobem získávání výškových dat jsou geodetická měření. Stejně vlastnosti má také měření GPS (globální polohový systém). Při měření výškopisu geodetickou metodou nebo metodou GPS se data dají použít přímo pro generování DMR, protože každým měřeným bodem je bod terénní kostry.

Alternativní a rychlejší metodou sběru dat je nová metoda LIDAR. Jedná se o systém aktivních senzorů, které k určení vzdálenosti používají laserové světlo [27]. Touto technologií dojde k nasbírání velkého množství neuspořádaných dat, která nazýváme mračna dat a jež musí být pomocí výkonného software a hardware vhodně zpracována. Zpracování spočívá především ve filtraci naměřených dat, čímž se metoda stává náročnější než v předchozích případech a také celkové náklady na tvorbu DMR se stanou vyššími. Touto technikou se více zabývat nebudeme. Další informace nalezneme například ve [10], [27], nebo na stránkách <http://www.toposys.com>.

Rychlejší metoda sběru dat než u metody geodetické a GPS je metoda fotogrammetrická. Rychlost sběru dat je srovnatelná s metodou LIDAR. Fotogrammetrickým měřením získáme rychle data zcela jiného charakteru (vzájemně se překrývající snímky), ale také s menší přesností (mluvíme o decimetrové přesnosti). Různými metodami fotogrammetrie následně získáváme z leteckých snímků body se známými výškami a lomové hrany, které vstupují do tvorby DMR.

V naší práci využijeme sekundárních výškových dat z topografických map. Tento postup tvorby DMR využívá digitalizované vektorové prvky (především vrstevnice). Kvalita dat závisí na těchto hlediscích [18]:

- přesnost původních vrstevnic (primární výšková data a způsob tvorby vrstevnic),
- kroku vrstevnic (ekvidistanci),
- kvalitě podkladů pro digitalizaci,
- kvalitě samotné digitalizace,

- míře aktualizace vrstevnic (vrstevnice jsou relativně zastaralé, aktualizace se provádějí jen lokálně, při zaměření lokality za určitým účelem, například výstavbou významné stavby),
- měřítkem podkladové mapy.

Tato data jsou v porovnání s předchozími relativně dobře dostupná pro celou Českou republiku, nebo v našem případě pro Plzeňský kraj.

Máme-li k dispozici sekundární data potřebná pro vyhotovení DMR, je pro tvorbu DMR většinou volen následující postup. Data ve formě vektorových prvků jsou použita pro tvorbu trojúhelníkové sítě (TIN). Tento proces nazýváme triangulace. Druhým významným procesem je interpolace, kterou převádíme TIN na grid. Podívejme se na triangulaci a interpolaci v následujících kapitolách.

2.2.1 Triangulace

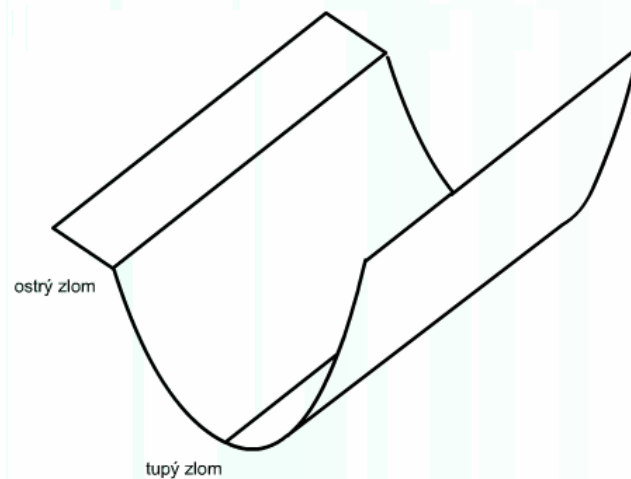
Nejprve je nutné si uvědomit, které prvky vstupují do triangulace, a tato data správně začlenit do následujících kategorií:

Naměřená bodová data, která slouží k tvorbě TIN, rozdělujeme na dva druhy. Běžné body (Mass points) nesou informaci o výšce v daném místě, ale při samotné tvorbě TIN nemusí tvořit vrchol trojúhelníka, protože mohou být v rámci optimalizace vyřazeny. To neplatí pro tzv. povinné body (points). Jedná se o významné prvky georeliéfu, které z výsledného modelu být vyloučeny nemohou, jako například dna a vrcholy.

Mezi liniové prvky vstupující jako data pro tvorbu DMR slouží velmi často samotné vrstevnice. Z nich se obvykle získávají běžné body pro triangulaci. Dalšími liniovými prvky vstupujícími do postupu tvorby DMR jsou hrany. Rozlišujeme tupé (softbreak) a ostré zlomy (hardbreak lines) (obr. 2.11). Hrany se projeví již při samotné triangulaci, ale jejich druh až v dalším postupu generování DMR do podoby rastru.

Již z názvu hran je zřejmé, že jde o definici hladkosti zlomu terénní hrany, podobně jako v terénu. Zlom se řeší na základě příčné derivace. U tupých zlomů je nenulová, v ostrých hranách je nulová a interpolovaný grid pak obsahuje zlomovou hranu. Příkladem tupých zlomů může být například říční síť, ostré zlomy se v přírodě vyskytují jako odtrhové hrany, srázy, nebo okraje vodních ploch [23].

Ukázka rozdílu lámání povrchu na tupém a ostrém zlomu



Obr. 2.11 Ukázka ostré a tupé hrany. Převzato z [11].

Také data plošného charakteru vstupují do tvorby výsledného TIN, respektive grid. Jedná se nejčastěji o polygony, které reprezentují plošné prvky reliéfu (např. plochy vodních ploch). Zvláštním případem polygonů je obálka. Při tvorbě TIN je výsledný model vždy konvexní a obálka (clip polygon) slouží k oříznutí polygonu na požadovanou, často nekonvexní oblast zájmu.

Je-li dána množina výškových bodů, existuje mnoho možností, jak ji triangularizovat. Vybereme-li vhodnou triangulaci pro naši úlohu, existuje navíc ve většině případech několik typů algoritmů, jak zvolenou triangulaci provést (například Delaunayho triangulace nebo triangulace polygonu založená na lichoběžníkové dekompozici). Pro tvorbu trojúhelníkové sítě platí obecná pravidla, kterými se ovšem nebudeme v této práci více zabývat. Více o pravidlech a o implementaci jednotlivých druhů triangulace pojednává [23]. V této literatuře nalezneme také detailnější popis často zmiňované Delaunayho triangulace.

2.3 Interpolační metody pro tvorbu DMR

Při tvorbě DMR hraje v otázce přesnosti velkou roli výběr řídicích bodů (body v terénu, jejichž nadmořská výška je skutečně měřena), metoda triangulace a volba interpolační techniky. A právě posledně zmíněným aspektem se budeme zabývat nyní.

Interpolace slouží k získání informace i na jiných místech, než kde byla měřena. V GIS se používá hlavně při vytváření spojitých rastrových dat z naměřených bodových nebo liniových hodnot [11].

Interpolačních metod existuje několik, přičemž každá z nich splňuje jiné kladené požadavky. Reliéf Země je velmi složitý, a proto neexistuje jedna metoda, která by byla ve všech případech reprezentace terénu nejlepší. Důležitými kritérii pro výběr nejvhodnější interpolační metody je aspekt, jak metoda zohledňuje charakteristické prvky georeliéfu a jak je schopna přizpůsobit se změnám charakteru terénu. Dalším kritériem může být výpočetní náročnost metody, či schopnost přizpůsobit se proměnlivé hustotě a distribuci naměřených dat.

Hledáním vhodných interpolačních metod se zabývalo mnoho publikací. Například ve [4] byly srovnávány čtyři interpolační metody (funkce) a autoři zkoumali, která vykazuje nejlepší výsledky. My se podíváme na interpolační metody z pohledu, kdy vstupují do procesu tvorby DMR.

Při tvorbě DMR rozlišujeme dva druhy interpolací:

- Interpolace z TIN do rastrové podoby DMR (TIN je prostředníkem mezi vektorovými a rastrovými daty).
- Interpolace z vektorových dat do rastru (převod DMR ve vektorové podobě do rastru bez použití TIN).

2.3.1 Interpolace z TIN do rastrové podoby DMR

Podívejme se nyní blíže na postup interpolace při dalším kroku obvyklého postupu tvorby DMR, ve kterém z vyhotovené nepravidelné trojúhelníkové sítě interpolujeme DMR vyjádřený rastrem. Pro interpolaci je možné využít lineární interpolaci nebo vyhlazující metody interpolace, jako například metodu přirozeného souseda, nebo kvintickou interpolaci [11]. Jedná se o interpolaci výšek z nepravidelně rozmístěných bodů TIN do bodů rastru tvořících obvykle pravidelnou čtvercovou síť. V některých publikacích je tento problém označen jako gridování nebo rasterizování (gridding/rasterizing algorithm).

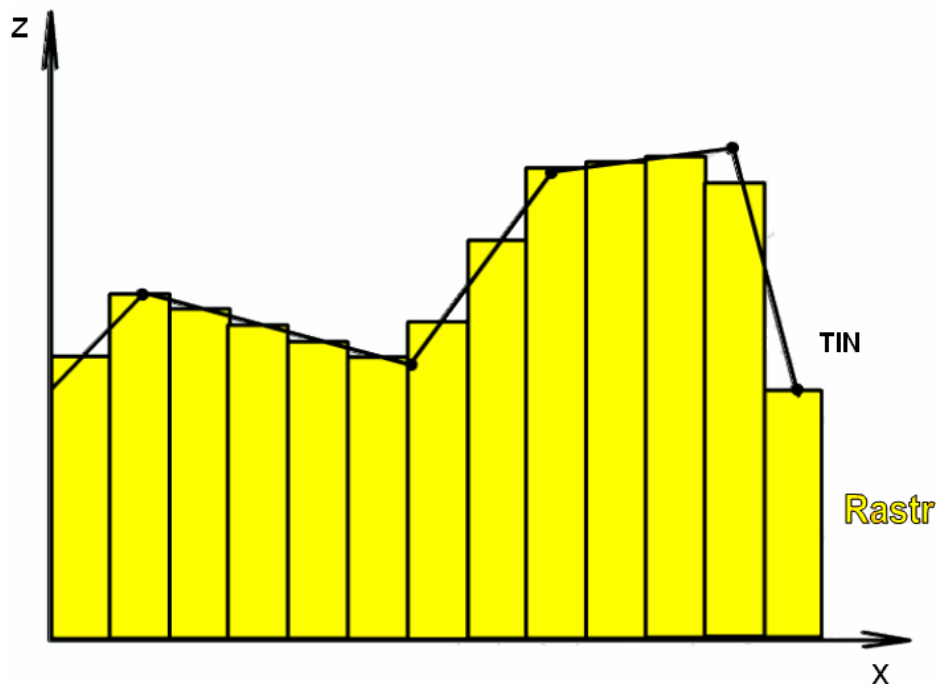
Představme si, že máme pravidelnou síť bodů (grid) s uživatelem stanovenou vzdáleností bodů, která je pokrytá sítí TIN. Proces se skládá ze dvou kroků. Nejprve je třeba otestovat, do kterého trojúhelníka jednotlivé body sítě rastru patří. Jedná se o test point-in-triangle. O každé buňce gridu (nebo bodu mřížky), která se stane nositelem informace o výšce, musíme tímto testem rozhodnout, ve kterém trojúhelníku leží. Tato kontrola může být prováděna různými způsoby. Je využíváno úhlů a azimutů, nebo jsou porovnávány linie v síti s testovaným bodem aj. Obecně se jedná o problém lokace bodu

v konvexním polygonu, pro který existuje více algoritmů, jako například metoda pásů, algoritmus Ray Crossing či metoda půlení intervalu.

Druhým krokem je určení výšky bodu rastru. Zde je nejčastěji používán průnik plochy trojúhelníkové sítě s projektovanou svislou linií bodu grid, pro který chceme určit výšku. Tímto způsobem ohodnotíme každý bod rastru, respektive mřížky. Plocha trojúhelníkové sítě, se kterou určíme průnik se svislicí, může být nahrazena jinou než rovinnou plochou na základě použité interpolace. Lineární interpolace počítá pro střed každé buňky interpolovaného rastru hodnotu Z z rovnice roviny, jež pokrývá pravidelnou trojúhelníkovou síť. Rovnice roviny má tvar:

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot Z + D = 0.$$

Grafické znázornění přiřazení výšky rastru lineární interpolací zobrazuje obrázek 2.12.



Obr. 2.12 Lineární interpolace z TIN do rastru. Převzato z [11].

Hladký průběh plochy nejen v rámci trojúhelníka v TIN, ale i napříč hranami mezi trojúhelníky zaručí kvintická interpolace. Pro svoji reprezentaci využívá polynom pátého stupně, který má ale 21 koeficientů, jejichž určení není jednoduché, protože vyhledávací oblast je mnohem větší než v předchozích případech. Výpočet se provádí pro každý trojúhelník zvlášť, a tak máme ve výsledku výpočetně velmi náročný algoritmus. Hledání koeficientů je problematické obzvlášť v okrajových částech vyhodnocované oblasti. Zde se mohou vyskytnout závažnější problémy. Odměnou za tento postup nám ale je dokonale

hladký povrch, a tím pádem velice dobrá vizualizace povrchu. Pokud bychom z tohoto modelu generovali vrstevnice, budou rovněž hladké [18]. Polynom pátého řádu má tvar:

$$h(x, y) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 a_{ij} x^i y^j \quad [18].$$

Jednou z metod, které využívá software ArcGIS je metoda přirozeného souseda (natural neighbors). Triangulace pro tuto metodu musí být vytvořena Delaunayho triangulací a výpočet se řídí Thiessenovým polygonem nad rozptýlenými body triangulace přidáváním bodů jako nových stran do Voroniových diagramů [6]. Jedná se o vcelku složitý postup. Více se o této metodě dozvíme například na stránkách „Geometry in Action“ (viz [6]).

2.3.2 Interpolace z vektorových prvků na rastr

Posledními interpolacemi, které zmíníme, budou interpolace, kterými vznikají DMR v rastrové podobě přímo z vektorových dat. Ukázkou interpolace za účelem získání rastrové reprezentace zobrazuje obr. 2.13. Do této kategorie patří například metoda nejbližšího souseda, lineární interpolace, metoda inverzních vzdáleností, či spline interpolace.



Obr. 2.13 Ukázkou principu interpolace z vektorových dat na rastr. Zpracováno podle [17]

Metoda nejbližšího souseda je nejjednodušší možnou implementací interpolace nad rastem, protože hledanému bodu grid se jednoduše přiřadí nejbližší známá nadmořská výška vektorové vrstvy.

Lineární interpolace je obdobná interpolaci nad TIN. Nejprve se vyhodnotí tři nejbližší body, které se stanou vrcholy trojúhelníkové plošky. Takto se obvykle rozdělí celý GRID a pro každý interpolovaný bod se z přiřazených plošek určí nadmořská výška obdobným postupem, který byl popsán v kapitole 2.3.1.

Často používaná je metoda inverzních vzdáleností (Inverse Distance Weighted - IDW). Interpolovaná hodnota buňky je odvozena z určeného počtu nejbližších známých výšek, nebo ze známých hodnot ve zvolené vzdálenosti. Každé známé vstupující hodnotě je přiřazena váha nepřímo úměrná vzdálenosti od hledaného bodu. Zápis má následující tvar:

$$z = \sum w_i \cdot z_i$$

kde z je počítaná hodnota,
 z_i jsou známé hodnoty,
 w je váhová funkce, kterou vypočteme podle vztahu:

$$w_i = \frac{1}{d_i^k}$$

kde d je vzdálenost od známého bodu

Pro $k=1$ je tato funkce nepřímo úměrná vzdálenosti

Kromě určení největší možné vzdálenosti vstupující hodnoty od určovaného bodu, může být v algoritmu stanovena velikost či tvar prohledávané oblasti bodu se známou výškou od bodu interpolovaného, nebo může být využita kombinace uvedených kritérií. Výhodou IDW interpolace je snadná implementace a dobré výsledky. Nevýhodou se stává dodefinování vhodných podmínek pro správnou funkci vzhledem ke vstupním datům.

Spline interpolace, zmíněná již v úvodu, je obecně jednou z nejpoužívanějších interpolačních technik, kde interpolant je speciální druh po částech složených polynomů. Spline interpolace je upřednostňována před polynomickou, protože chyba interpolace je nižší, dokonce i když se budeme snažit použít nižší stupeň polynomu [4].

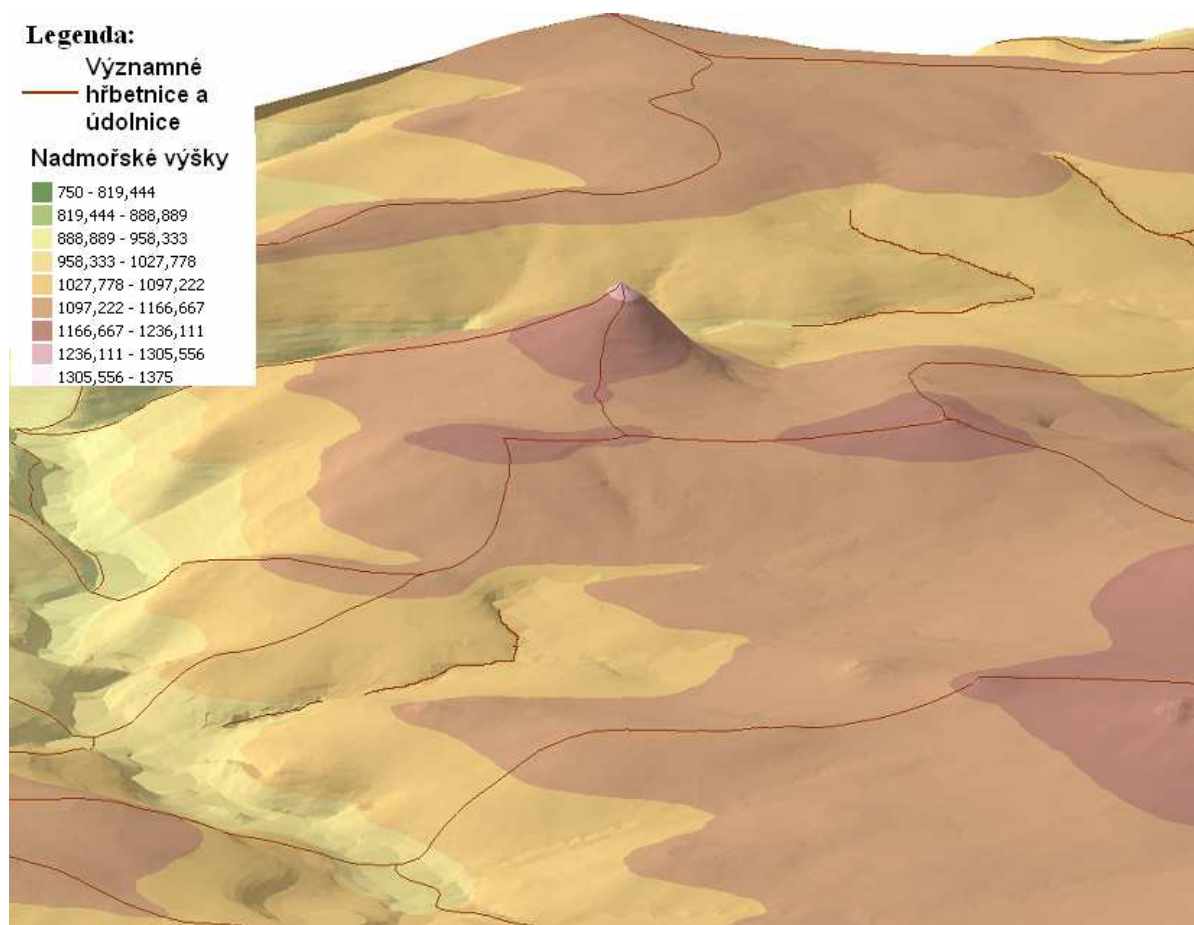
Interpolační spline je lokální interpolace, která kromě průchodu všemi uzlovými body ($f(x_i)=y_i$) má spojitou alespoň první derivaci ve všech x_i , tedy:

$$\lim_{x \rightarrow x_i^-} f'(x) = \lim_{x \rightarrow x_i^+} f'(x)$$

Podrobnější matematický zápis a další podrobnosti o této interpolační funkci je možné nalézt například ve [4].

3 Možnosti vylepšení DMR

V předešlých kapitolách byl popsán teoretický postup tvorby modelu reliéfu. Praktický popis tvorby DMR v programu ArcGIS 9.2 od společnosti ESRI, se kterým budeme dále v této práci pracovat, je zmiňován v mnoha zdrojích (například na stránkách ke cvičení z předmětu KMA/UGI: <http://gis.zcu.cz/studium/ugi/cviceni/index.html>). Nebudeme se proto zabývat praktickým postupem tvorby DMR v ArcGIS, ale zaměříme se pouze na další záležitosti, které mohou výsledný DMR vylepšit a zpřesnit tak četné analýzy prováděné nad tímto modelem.



Obr. 3.1 Rozvodnice v podobě hřbetnic a údolnic, jako významné křivky reliéfu

Digitální model reliéfu je možné zpřesnit různými způsoby. Je možné naměřit více výškových dat, použít různé interpolační metody, zahrnout do modelu další data, jako plochy jezer, rybníků apod. Možnost, kterou využijeme my, spočívá v přidání nových povinných hran, jako nových významných prostorových křivek reliéfu. Významnými křivkami jsou například rozvodnice, které probíhají často ve formě hřbetnic a údolnic, ale obecně také další kosterní hrany (čáry terénní kostry). Tyto prvky reliéfu nejsou obecně mapovány jako trojrozměrné, a nevstupují proto do výpočetního procesu tvorby DMR. Pokud do výpočtu vstoupí jako rovinné (2D) linie, nepřinesou do výsledného DMR požadovaný efekt. Například rozvodnice (rozvodní čára) je ale významnou prostorovou křivkou reliéfu vyznačující geografickou hranici mezi dvěma povodími. Vystihuje často důležité terénní tvary, které ovšem standardně nejsou součástí tvorby DMR (viz obr. 3.1).

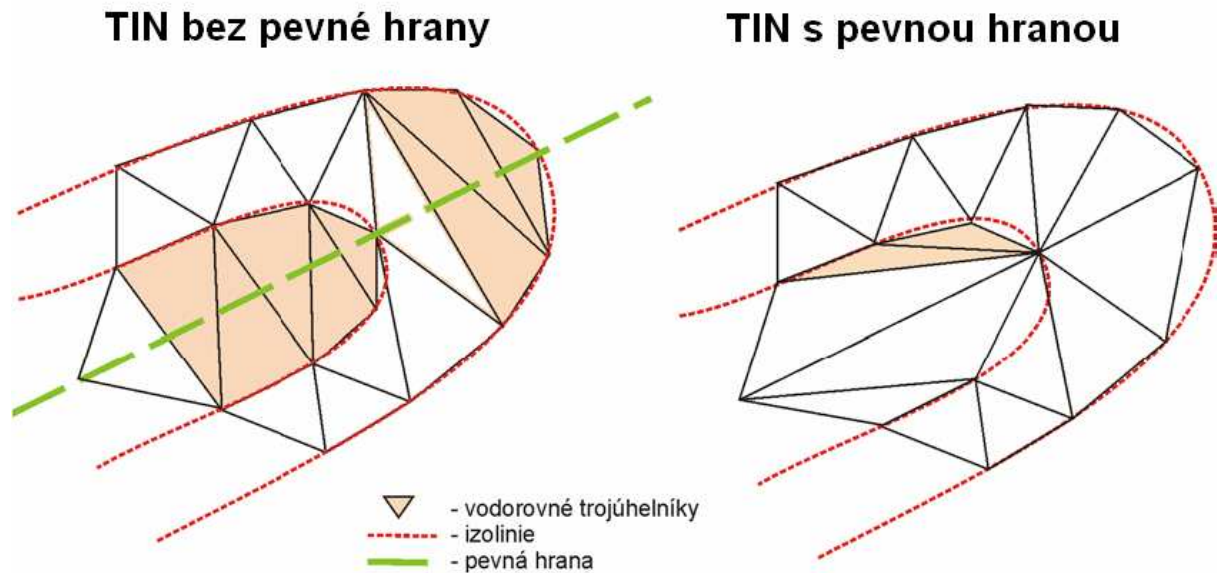
Přidáním kosterních hran, jako výškově určených linií, odstraníme problém fiktivních (falešných) spočinků (obr 3.2), které vznikají při digitalizaci výškopisu po vrstevnicích. Spočinek je část hřbetu vyvýšeniny, kde hřbetnice či údolnice přechází do značně mírnějšího sklonu. Plocha spočinku je ve srovnání s celkovým průběhem svahového hřbetu podstatně méně skloněná, případně vodorovná [23]. Ovšem u fiktivních spočinků se jedná o spočinky v podobě vodorovných trojúhelníků, které mají vrcholy umístěné ve stejné nadmořské výšce (vinou digitalizace po vrstevnicích), i když v terénu sklon existuje. Problém vodorovných trojúhelníků se snaží vyřešit řada algoritmů a jedna z metod je právě vstup kosterních (pevných) hran do postupu tvorby DMR, jež redukuje takovéto trojúhelníky. Viz například [1].



Obr. 3.2 Ukázka TIN odvozeného z vrstevnic s vyznačeným případem falešného spočinku.

Data převzata ze ZABAGED.

Začleněním kosterních hran dojde k redukci vodorovných trojúhelníků, a tím i k redukci falešných spočinků, jak je dokázáno na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Redukce vodorovných trojúhelníků přidáním povinné hrany. Převzato z [1].

Princip přidání kosterních hran do postupu tvorby DMR není jednoduchý. Správného postupu je možné dosáhnout s využitím programování. Jednoduše můžeme proces popsat následovně: Aby mohly být čáry terénní kostry zahrnuty mezi prvky tvořící DMR, musí jim být přiřazeny nadmořské výšky. Toho dosáhneme dynamickou segmentací, pomocí níž přiřadíme lomovým bodům rozvodnice nadmořské výšky podle nadmořských výšek v místech, kde se rozvodnice protíná s vrstevnicí (místo se známou nadmořskou výškou). Tímto získáme trojrozměrnou linii, která do následně vytvořeného přesnějšího modelu vstupuje jako soft breakline, či hard breakline.

Podívejme se tedy nyní blíže na převod 2D kosterních hran na trojrozměrnou linii a její začlenění do DMR.

3.1 Začlenění kosterních hran jako nových povinných hran do DMR

K našim účelům použijeme lineární dynamickou segmentaci, která je v praxi využívána především k lokalizování událostí na liniovém prvku (na silnici, železnici, nebo v inženýrských sítích). K místnímu popisu události na liniovém prvku touto metodou stačí

pouze vzdálenost od zvoleného bodu a identifikace linie samotné. Nemusíme se tedy zabývat souřadnicovým systémem. O dynamické segmentaci je možné se více dočíst v [19].

Postup dynamické segmentace využijeme k vyřešení našeho problému určení 3D linie přiřazením výšek do jejích lomových bodů. Výšky kosterních hran totiž známe jen v místech, ve kterých se protínají s vrstevnicemi, a tyto body průniku nejsou obecně shodné s vrcholy linie kosterní hrany. Výška v neznámém bodě se tedy určí lineární závislostí ze znalosti výšky předchozího a následujícího bodu a na základě znalosti vzdálenosti od těchto bodů s určenou výškou. Nástin situace ukazuje na příkladu rozvodnice obr. 3.4. Matematický zápis výpočtu dynamické segmentace je následující:

Výšku v lomovém bodě kosterní hrany vypočteme podle vztahu:

$$Z_{N_j} = Z_{V_i} + (Z_{V_{i+1}} - Z_{V_i}) \cdot t, \text{ kde}$$

Z_{V_i} je výška bodu se známou výškou, který je před bodem s hledanou výškou

$Z_{V_{i+1}}$ je výška bodu se známou výškou, který je za bodem s hledanou výškou

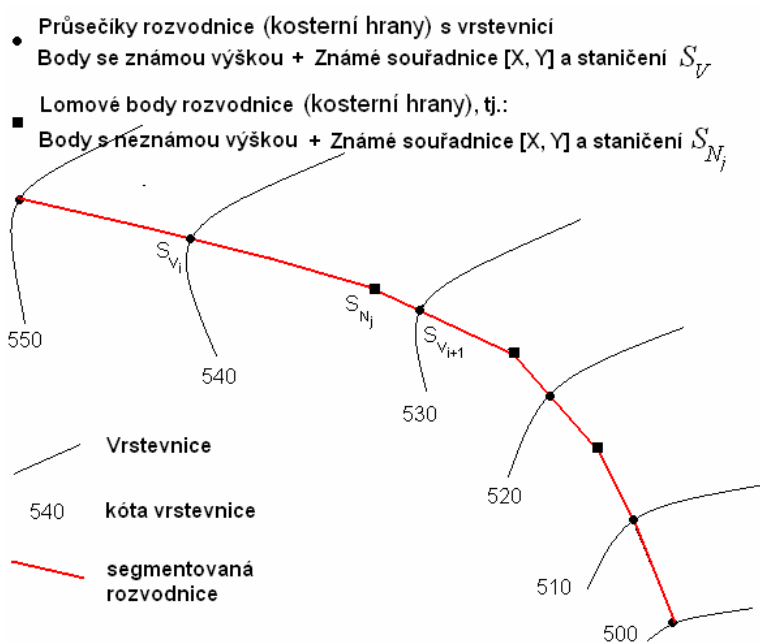
$t \in \langle 0;1 \rangle$ a vypočte se podle vztahu:

$$t = \frac{S_{N_j} - S_{V_i}}{S_{V_{i+1}} - S_{V_i}}, \text{ kde}$$

S_{N_j} je staničení bodu na kosterní hraně s neznámou výškou

S_{V_i} je staničení bodu na kosterní hraně se známou výškou, který je před bodem s hledanou výškou

$S_{V_{i+1}}$ je staničení bodu na kosterní hraně se známou výškou, který je za bodem s hledanou výškou



Obr. 3.4 Situace při určování lomových bodů kosterní hrany pomocí vrstevnic

Nyní jsme nastínili naši situaci a obecný způsob řešení problému dynamickou segmentací. Před vlastním výpočtem je ale třeba mít k dispozici potřebná data. Těmi je samozřejmě vrstva vrstevnic a dále čáry terénní kostry. Z vrstev ZABAGED je možné využít již několikrát zmiňovanou vrstvu rozvodnic. Pokud chceme do výsledného modelu reliéfu přiřadit další kosterní hrany, jejichž výška se mění lineárně a pro něž by se metoda přiřazení výšky dynamickou segmentací hodila, tato možnost zde je a je jen na nás, jaké další linie vykazující vlastnosti jako rozvodnice v programu ArcGIS vytvoříme, nebo určíme k segmentaci. Výhodné je vytvořit v zájmové oblasti vlastní čáry terénní kostry (např. hřbetnice údolnice, úžlabiny, úpatnice), v jejichž okolí může docházet k tvorbě falešných spočinků.

Při zadávání nových linií ale musíme brát v potaz kartografické vrstevnice, se kterými pracujeme a které určují výpočet dynamickou segmentací. Například pokud bychom chtěli segmentovat vodní toky, dochází velmi často v místech koryt k přerušení vrstevnice. Průsečíky by s touto vrstvou vznikly pouze zřídka, a vykonání dynamické segmentace by se stalo neúčelné.

Jak jsme již naznačili, k výpočtu je třeba naprogramovat postup v programovacím jazyce. Vzhledem k získaným poznatkům z předmětu KMA/AGI jsme se rozhodli použít programovací jazyk Visual Basic for Application v prostředí ArcMap společnosti ESRI.

3.2 Požadavky výpočetního algoritmu

Před samotným výpočtem dynamické segmentace musely být nejprve z daných datových zdrojů zjištěny průsečíky vrstevnic s kosterními hranami a ty uloženy jako nová bodová vrstva. K tomu jsme využili funkci Intersect, kterou nalezneme v Analysis Tools.

Nová bodová vrstva průsečíků byla doplněna o výšky z vrstvy vrstevnic, a tak vznikla vrstva bodů s geometrií označenou jako Multipoint. Tato vrstva ale musí mít pro další zpracování geometrii, v níž by byla uchovávána výška každého bodu. Proto jsme museli naprogramovat funkci, která převádí atribut HEIGHT vrstvy průsečíků (získaný z vrstevnic) na souřadnici Z, a bodová vrstva se tak stala typem Point Z. Tato funkce nese označení v nástrojové liště Dynamické segmentace: „2D-3D“ (viz kapitola 3.3.1). Hlavní část programu, která souřadnici Z přiřazuje hodnoty z atributu HEIGHT, má následující podobu:

```
pPoint3D.X = pPoint2D.X  
pPoint3D.Y = pPoint2D.Y  
pPoint3D.Z = pFeature.Value(pHeightIdx)
```

Dále bylo pracováno s vrstvou kosterních hran (v programu ve VBA v některých případech označené jako rozvodnice). Ta musela být také rozšířena o geometrii nesoucí informace o výšce. Vrstva musela být datového typu PolylineZ. K tomuto stačí využít funkce Convert Features to 3D, která se nachází ve 3D Analyst. Protože neznáme výšky rozvodnice, vyplníme implicitně souřadnici Z konstantou (například 0). Touto funkcí ošetřené kosterní hrany již mají připravenou geometrii na pozdější zápis správné výšky dynamickou segmentací. Ukázka této funkce a práce s ní je blíže popsána v [21].

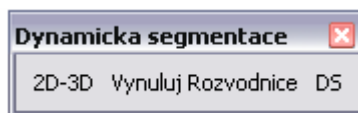
Pro bezproblémový výpočet segmentací bylo zapotřebí mít k dispozici takové čáry kosterní hrany, které začínají a končí na bodě se známou výškou (pro výpočet musíme znát výšku v bodě před a v bodě za určovaným bodem linie). Každá segmentovaná linie musela být tedy upravena tak, aby začínala a končila na průsečíku s vrstevnicí. Pokud tak učiněno nebylo, program výšky u bodů, které nejsou obklopeny body se známými výškami, nevypočetl, což je pro následné určení trojrozměrné linie nežádoucí. Uživatel je o tomto případě informován hláškou, ve které se dozví i konkrétní linii, u níž na začátku či na konci nedošlo ke správnému výpočtu výšky.

Program vyžaduje, aby při spouštění maker byla vypnutá editace vrstev. První vrstvou musí být bodová vrstva průsečíků vrstevnic s rozvodnicemi (PointZ). Druhou vrstvou jsou samotné kosterní hrany (liniový prvek) umožňující zápis výšky (PolylineZ). Pokud chceme spustit funkci „2D-3D“, musí být třetí vrstvou bodová vrstva s atributem HEIGHT, kterou chceme převést do geometrické podoby první vrstvy. Metody na začátku svého výpočtu kontrolují vstupní data, a pokud vrstvy vstupující do výpočtu nesplňují požadované geometrie, je funkce s hláškou o konkrétní chybě ukončena.

3.3 Popis algoritmu

Použitý algoritmus se skládá ze tří maker vytvořených v programovacím jazyku Visual Basic for Application. V projektu Diplomova_prace.mxd programu ArcMAP je vytvořena nástrojová lišta „Dynamicka segmentace“ (obr. 3.5) nesoucí tři tlačítka, pod nimiž se skrývají jednotlivá makra programu. První tlačítko označené „2D-3D“ slouží k převodu

geometrie průsečíků s atributem HEIGHT do geometrie PointZ. Připravená prázdná bodová vrstva s geometrií PointZ musí být na prvním místě v seznamu vrstev (bude s ní také dále počítáno na tomto místě) a vrstva, ze které čerpáme výšky z atributu HEIGHT na místě třetím, viz kap. 3.2, ve které již byl také zmíněn hlavní úryvek této procedury.



Obr. 3.5 Panel s nástroji pro vykonání dynamické segmentace

Druhým tlačítkem je funkce „Vynuluj Rozvodnice“, která vynuluje všechny Z souřadnice kosterních hran (rozvodnic aj.). Tato funkce vznikla původně pro ladění programu, ale mohla by být využita i při praktickém použití, a proto byla v projektu ponechána. Tlačítko „DS“ se stejnojmenným makrem je vlastní dynamická segmentace, která provádí výpočet výškových hodnot pro body kosterních hran. V následujících kapitolách si popíšeme jednotlivé dílčí procedury programu.

3.3.1 Procedura „Vynuluj Rozvodnice“

Kód ve VBA se skládá z více procedur (Sub). Jednou z nich je již výše popsaná (kap. 3.2) procedura pro převod geometrie 2D na 3D. Další, která má také vlastní tlačítko v liště „Dynamicka segmentace“, slouží k vynulování všech Z souřadnic u kosterních hran. Její hlavní částí je „For“ cyklus nastavující bodům linie nulovou hodnotu souřadnice Z:

```
For k = 0 To pocet - 1
    Set pPoint = pPointColl.Point(k)
    pPoint.Z = 0#
    pPointColl.UpdatePoint k, pPoint
Next
```

3.3.2 Procedura kontrolující správnost dat

Proceduře výpočtu výšky lomového bodu dynamickou segmentací („Segmentuj“) předchází procedura („KontrolaNastaveniZSourStartKonec“), která kontroluje body začátku a konce kosterní hrany. Ty musí mít známé výšky, a pokud tomu tak není, tato procedura

upozorní uživatele, že v konkrétní kosterní hraně nebude na počátku či na konci linie doplněna výška. Hlavní část zápisu kontroly má následující podobu:

```
If pPointColl.PointCount > 2 Then
  If pPointColl.Point(0).Z = 0# Then
    'kontrola, zda první bod kolekce má známou výšku
    MsgBox "V rozvodnici " & pFeature.OID & " není doplněna počáteční Z souřadnice.", vbInformation
  End If
If pPointColl.Point(pPointColl.PointCount - 1).Z = 0# Then
  'kontrola, zda poslední bod kolekce má známou výšku
  MsgBox "V rozvodnici " & pFeature.OID & " není doplněna koncová Z souřadnice.", vbInformation
  End If
End If
```

3.3.3 Procedura „DoplnZPrusecikum“

Druhá procedura, která předchází proceduře „Segmentuj“, se jmenuje „DoplnZPrusecikum“. Ta pomocí funkce Identify přiřadí průsečíkům kosterních hran s vrstevnicí získanou výšku. V kódu je s body pracováno jako s Point Collection a přiřazení tedy musí být vykonáno touto cestou (viz kód):

```
For k = 0 To pocet - 1
  'Nastavení bodu kosterní hrany.
  Set pPoint = pPointColl.Point(k)
  'Pole identifikovaných prvků bodu pPoint.
  'pIdentify je natvaveno na vrstvu bodů se známou výškou.
  Set pArray = pIdentify.Identify(pPoint)
  If Not pArray Is Nothing Then
    'Identifikovaný prvek typu IFeatureIdentifyObj.
    Set pFeatIdObj = pArray.Element(0)
    Set pRowObj = pFeatIdObj
    'Identifikovaný prvek typu IFeature.
    Set pIdentifFeatute = pRowObj.Row
    'Bod identifikovaného prvku.
    Set pIdentifPoint = pIdentifFeatute.Shape
    'Přiřazení výšky bodu pPoint podle bodu identifikovaného prvku.
    pPoint.Z = pIdentifPoint.Z
    'Aktualizace bodu v kolekci bodů rozvodnice.
```

```

    pPointColl.UpdatePoint k, pPoint
End If
Next

```

3.3.4 Procedura výpočtu dynamickou segmentací

Samotná dynamická segmentace (procedura „Segmentuj“) již obsahuje výpočetní algoritmus určení výšky lomového bodu kosterní hrany. Výpočet implementuje postup, který byl popsán v kapitole 3.1. Hlavní část výpočtu má následující tvar:

```

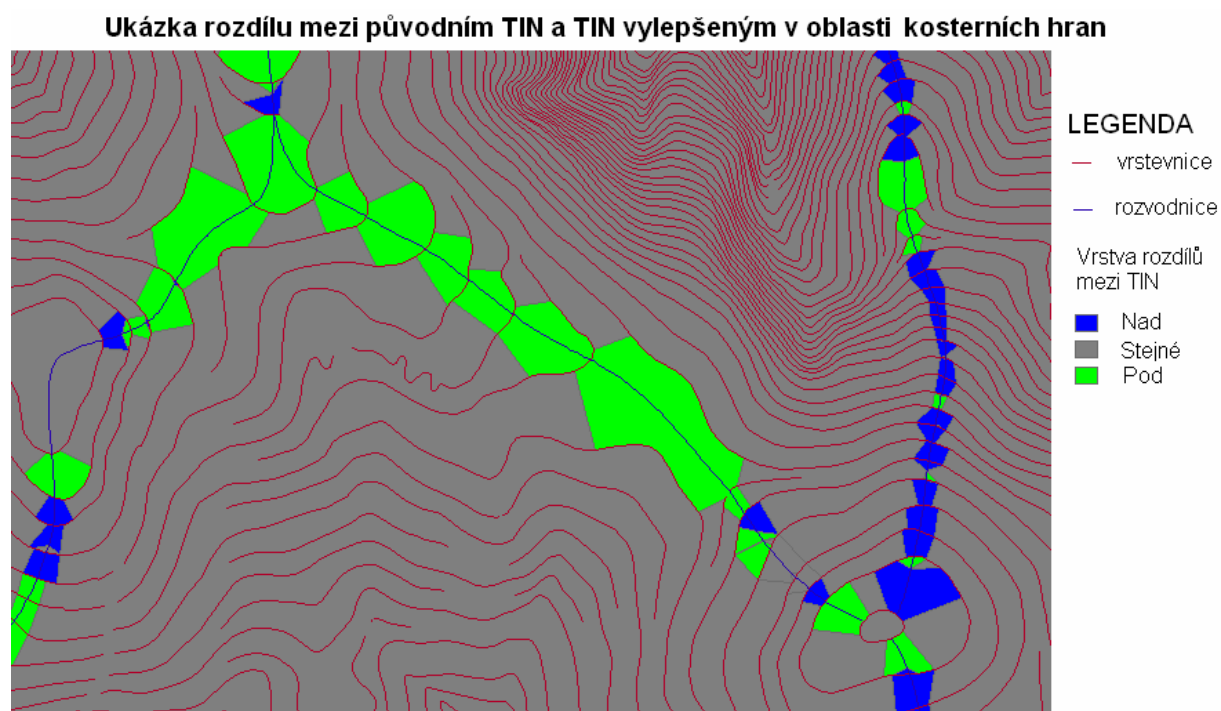
'Průchod všemi body polyline od 2. bodu dále
For k = 1 To pocet - 1
    Set pTo = pPointColl.Point(k)
    Dx = pPointColl.Point(k - 1).X - pPointColl.Point(k).X
    Dy = pPointColl.Point(k - 1).Y - pPointColl.Point(k).Y
    DelkaFromTo = DelkaFromTo + Math.Sqrt(Dx * Dx + Dy * Dy)
    If pTo.Z > 0# Then
        EndIdx = k
        Prevyseni = pTo.Z - pFrom.Z
        DelkaSegmetu = 0#
        'Cyklus průchodu části linie, která se bude segmentovat
        For l = StartIdx + 1 To EndIdx - 1
            'Proměná StartIdx byla inicializovaná před startem cyklu (počáteční hodnota je 0)
            Set pPoint = pPointColl.Point(l)
            Dx = pPointColl.Point(l - 1).X - pPointColl.Point(l).X
            Dy = pPointColl.Point(l - 1).Y - pPointColl.Point(l).Y
            DelkaSegmetu = DelkaSegmetu + Math.Sqrt(Dx * Dx + Dy * Dy)
            'Vypocet Z - Segmentace
            pPoint.Z = pFrom.Z + Prevyseni * (DelkaSegmetu / DelkaFromTo)
            pPointColl.UpdatePoint l, pPoint
        Next
        StartIdx = EndIdx
        Set pFrom = pTo
        DelkaFromTo = 0#
    End If
Next

```

Pokud byly splněny požadavky na správný běh programu, průběh výpočtu je bezproblémový a k rozvodnicím a dalším nadefinovaným kosterním hranám jsou přiřazeny informace o výšce (Z souřadnice u každého lomového bodu). Takto vytvořená, výškově určená linie již může vstupovat do nově vytvořeného DMR, v podobě soft breakline či hard breakline (obr. 2.11).

3.4 Zhodnocení a přínos začlenění nových hran do DMR

Máme-li zhodnotit přínosy tohoto začlenění, změny nalezneme pouze v oblasti kosterních hran. Došlo k vyhlazení reliéfu (vlivem lineárního přiřazování výšek) v oblasti hřbetnic a dalších segmentovaných linií, jež jsou důležitými útvary DMR. K rozsahově větším změnám nemohlo dojít, protože do modelu nebyla vnesena nová výšková data. Ve skutečnosti vycházíme stále ze stejných dat. Přesto tento algoritmus DMR zpřesňuje a korektněji vystihuje skutečný stav také proto, že došlo k odstranění většiny fiktivních spočinků (viz. obr. 3.7).



Obr. 3.6 Znárodnění rozdílů mezi vytvořenými DMR v podobě TIN

Výsledný DMR a projekt Diplomova_prace.mxd programu ArcGIS s kódy programu a nejnntnějšími komentáři jsou součástí CD k této práci. V projektu Diplomova_prace.mxd ve skupině vrstev týkající se výškopisu se nachází tyto vrstvy:

- Pruseciky3D
- Rozvodnice3D (rozvodnice a další kosterní hrany)
- Pruseciky2D
- Vrstevnice
- Tin_puv (původní TIN bez přidaných kosterních hran)
- Tin_vylep (TIN s přidanými trojrozměrnými kosterními hranami)

Ukázku porovnání dvou TIN s přidanou a bez přidané hrany v podobě trojrozměrné rozvodnice zobrazuje obr. 3.6 a také obr. 3.7. Obrázek 3.7 ukazuje na rozdíly mezi vytvořenými TIN na základě nově přidané hrany.

V další práci budeme používat tento vylepšený digitální model reliéfu zkoumaného území. Do analýzy bude DMR vstupovat ve formátu GRID. Pro přechod z reprezentace TIN do GRID využijeme funkci TIN to Raster s interpolací typu natural neighbors (viz kapitola 2.3.1). DMR v podobě GRID je pro tvorbu analýz využívanější, protože práce s buňkami je pro výpočetní algoritmy jednodušší. V této práci se budeme zabývat právě analýzami nad rastry, podívejme se tedy na podstatu rastrových dat a práci s nimi v GIS.

UKÁZKA POROVNÁNÍ PŮVODNÍHO DMR A DMR S ZAHRNUTOU KOSTERNÍ HRANOU RELIÉFU

PŮVODNÍ DMR:

VYLEPŠENÝ DMR:

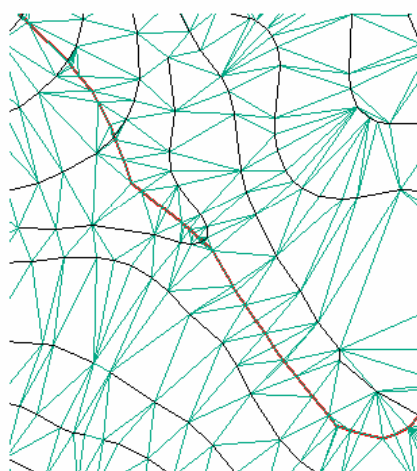
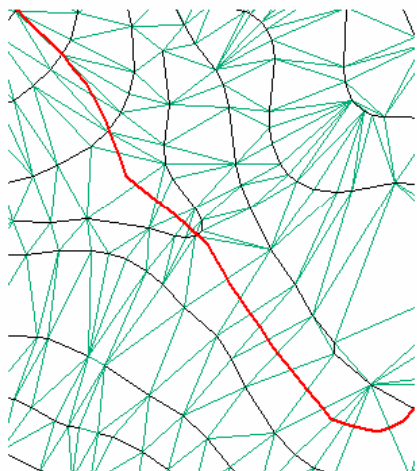


LEGENDA

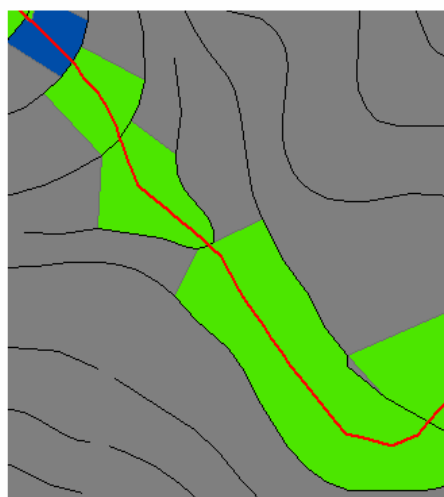
- vrstevnice
- kosterní hrana

DMR
nadmořská výška (m.n.m)

- 750 - 819,444
- 819,444 - 888,889
- 888,889 - 958,333
- 958,333 - 1027,778
- 1027,778 - 1097,222
- 1097,222 - 1166,667
- 1166,667 - 1236,111
- 1236,111 - 1305,556
- 1305,556 - 1375



— TIN



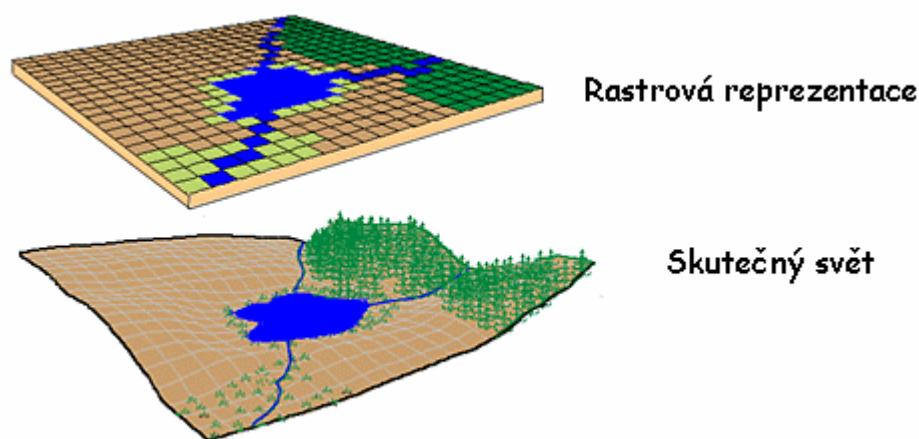
Porovnání rozdílů mezi TIN

- Nad
- Stejně
- Pod

Obr. 3.7 Ukázka zpřesněného TIN a porovnání s původním modelem.

4 Práce s rastrovými daty

Rastr je jeden ze způsobů vyjádření prostorových prvků a skutečností na mapě. Jeho základem je buňka (pixel), která je stavebním kamenem rastru. Hodnota buňky v různých místech rastru je nositelem informace (obr. 4.1). Nejčastěji je rastr reprezentován pravidelnými čtvercovými buňkami uspořádanými do mozaiky, ale tvary buněk mohou být obecně různé. Uložení pravidelného čtvercového rastru je uskutečněno pomocí matic, které jsou lokalizovány (jsou známy souřadnice rohu matice ve zvoleném souřadnicovém systému a geometrie rastru). Pro tuto reprezentaci je topologie definovaná implicitně sousedstvím buněk. Problémem se může stát zvolení vhodné velikosti buňky (viz kapitola 2.1.3).



Obr. 4.1 Princip vektorové a rastrové reprezentace. Převzato z [18].

Každá buňka rastru reprezentuje svoji hodnotou jednu (tzv. klasické rastry), nebo více (obrazová data) atributových hodnot. Pokud buňka v daném místě nenabývá žádné hodnoty, označuje se jako NoData nebo NoValue a tento fakt musí být ošetřen, například přidělením hodnoty, která nese hodnotu null [2].

Matice buněk je definována souřadnicemi počátečního bodu (lokace rastru), velikostí buňky, počtem buněk ve směru osy Y a osy X a zvolenou metrikou. Otázka metriky v mozaice je důležitá. Metrika je způsob definice vzdálenosti dvou buněk. GIS využívají těchto typů metrik [11]:

- Euklidovská metrika používá pro vzdálenost středů dvou buněk (A a B) stejného vztahu jako v euklidovském prostoru:

$$d = \sqrt{(x_A - x_B)^2} + \sqrt{(y_A - y_B)^2}, \text{ kde } x_A \text{ je x-ová souřadnice bodu A,}$$

$$x_B \text{ je x-ová souřadnice bodu B aj.}$$

Poznamenejme, že tuto metriku používá produkt ArcGIS. Více v [7].

- Pokud uvažujeme za vzdálenost dvou středů buněk minimální počet překonaných hran, mluvíme o blokové metrice.
- Šachovnicová metrika umožňuje, narozdíl od předchozí, dostat se do diagonální buňky i přes společný roh. Vzdáleností buněk v matici se tedy rozumí minimální počet překonaných hran a středů (rohů buněk). Poznamenejme, že vzdálenost diagonálně sousedících buněk je v tomto případě rovna jedné (projdeme jeden střed), zatímco u blokové metriky je vzdálenost buněk sousedící rohy rovna dvěma (protneme dvě hrany).

Používání dvourozměrných matic pro znázornění prvků na mapě má své výhody i nevýhody. V námi vytvořené analýze využijeme faktu, že tento formát je dobře definovaný pro matematické výpočty. 2D pole (matice hodnot rastru) je základním datovým typem většiny programovacích jazyků, které je lehce implementovatelné. Na každý pixel může být použita jakákoli definovaná operace. Nevýhody jsou podobné nevýhodám popsaným výše u rastrových reprezentací výškopisu. Tím, že celý obraz je reprezentován stejnou velikostí buněk matice (pixelů), není uložení velké oblasti nijak optimalizováno. Tento fakt mohou pomoci odstranit pohledové pyramidy, o nichž pojednává například [22].

4.1 Mapová algebra

K tvorbě analýz nad rastrovými daty slouží mapová algebra, která je obdobou k nástroji topologického překrytí u dat vektorových. Mapová algebra je všeobecný soubor konvencí, schopností a technik, které byly obecně přijaty pro použití s geografickými informačními systémy [25]. Mapová algebra v sobě zahrnuje matematické operace s rastry. Pomocí mapové algebry dochází matematickými, ale i jinými operacemi ke kombinaci mezi více rastrovými vrstvami a těmito operacemi k výpočtu hodnot rastru v podobě nové vrstvy.

Nástrojem mapové algebry je jazyk mapové algebry, který je s drobnými odlišnostmi v syntaxi definovaný v každém významném GIS software. Jedná se o jednoduchý

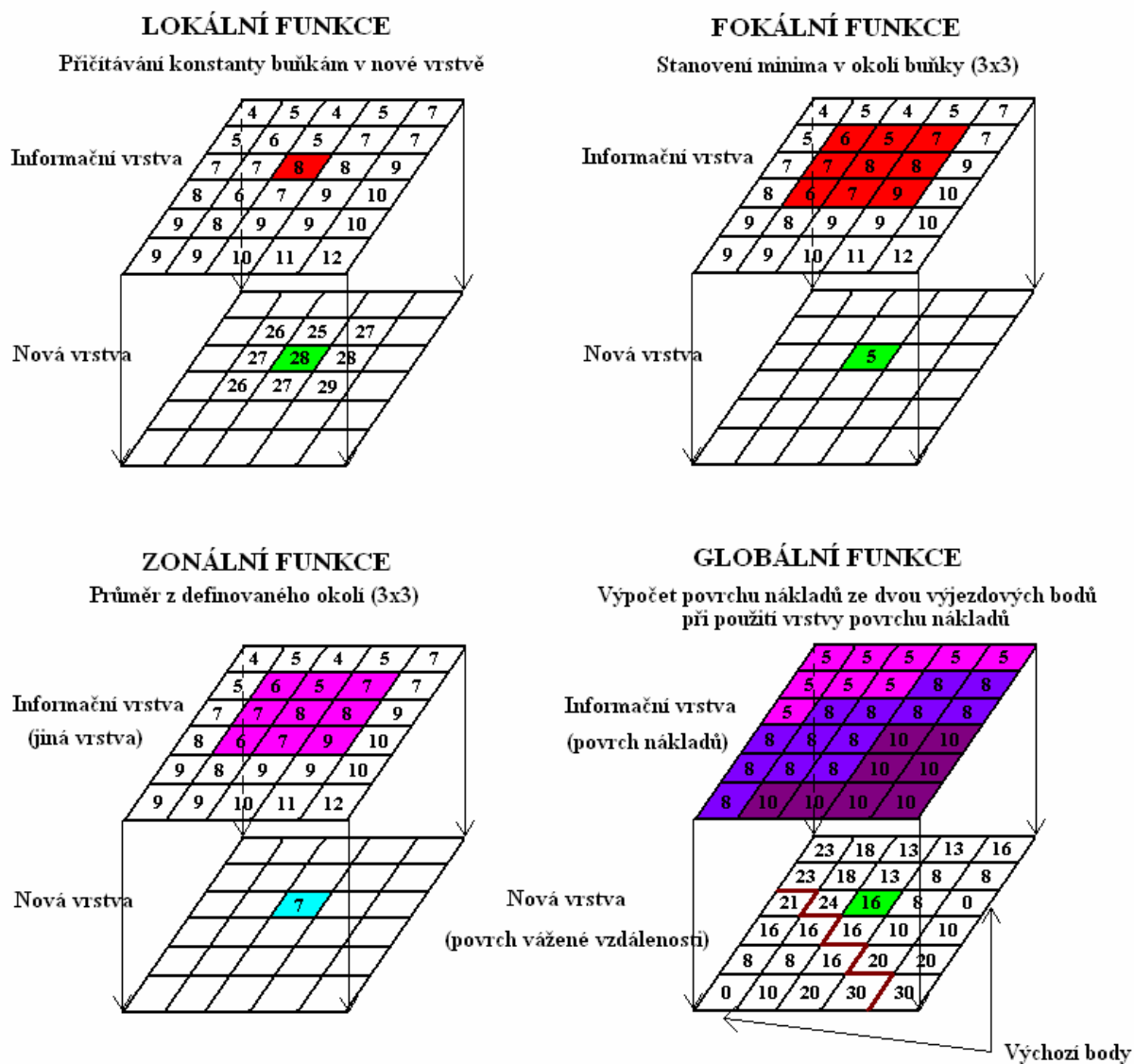
programovací jazyk navržený speciálně pro popis analýz prostorového modelování nad rastrovou reprezentací. Mapová algebra obecně používá [25]:

- **Objekty** - slouží k uložení informací; jedná se o vstupní hodnoty a mezivýsledky.
- **Činnosti** - příkazy jazyka
 - Funkce (vykonávají operace na objektech; dále se dělí – viz dále).
 - Operátory (matematické, relační, logické a statistické).
- **Kvalifikátory** - matematické, statistické, relační a logické operátory.

Operace nad rastrovými prvky se obecně dělí na operace s jednou, nebo více vrstvami. S jednou vrstvou jsou to nejčastěji skalární operace jako je připočítávání konstanty, umocňování nebo nastavování hodnoty NoValue/NoData v potřebných místech rastru. Konkrétním příkladem takové funkce je tvorba dvakrát převýšeného DMR pro následnou vizualizaci ve 3D. Na více vrstvách se jedná o operace jako sčítání vrstev, které se vykonávají s prostorově si odpovídajícími buňkami. Podle prostorového rozložení buněk, ze kterých vzniká nová hodnota buňky v nové vrstvě, dělíme funkce na tyto typy [25]:

- **Lokální** jsou takové funkce, kde nová hodnota vzniká z individuální buňky jedné nebo více vrstev. Toto využijeme při tvorbě povrchu nákladů.
- **Fokální** funkce jsou funkce, kde nová hodnota vzniká z definovaného okolí buňky. Okolím je například matice 3x3, nebo 5x5 se středem v počítaném pixelu, ale obecně mohou mít různé tvary. Tyto funkce se využívají například ke stanovení aritmetického průměru, sumy, odchylek, minima, nebo maxima okolí buňky.
- **Zonální** funkce počítají novou hodnotu z definované zóny, ale v jiné vrstvě. Jako v předešlém případě mohou tvořit podobné statistické funkce analyzované informační vrstvy, která patří do zóny definované v druhé vrstvě. Statistickými funkcemi mohou opět být průměry z definovaného okolí, respektive sumy, minima, maxima, odchylky apod. Kromě statistických funkcí se jedná také o funkce geometrické (stanovení geometrických charakteristik každé zóny).
- **Globální** jsou takové funkce, kde se k výpočtu každé hodnoty buňky využívají všechny hodnoty informační vrstvy (využijeme při tvorbě povrchu vážené vzdálenosti).

Druhy funkcí mapové algebry, které byly popsány výše, jsou pro lepší představu a jejich vzájemné porovnání graficky znázorněny na následujícím obrázku 4.2:



Obr. 4.2 Ukázka druhů funkcí mapové algebry s jednou vrstvou rastry. Zpracováno podle [11].

4.2 Porovnání rozšířených GIS software používajících mapovou algebru

Použití principů mapové algebry nad rastrovými daty nalezneme v různých GIS aplikacích. Podívejme se na tři z nich a provedme jejich malé porovnání.

4.2.1 Mapová algebra v GIS GRASS

Mapová algebra v open source GIS GRASS je silnou stránkou tohoto programu, protože GRASS s rastry často pracuje. Mapová (rastrová) algebra je zde zastoupena modulem

r.mapcalc. Za poznámku stojí fakt, že jednotlivé rastrové mapy umístěné v mapset mohou mít individuální rozlišení. Před jejich vytvořením se jednoduše změní rozlišení pomocí modulu g.region. [14]

Modul r.mapcalc pracuje na bázi pohyblivého okna (z angličtiny označované jako moving window), což znamená, že se přes celou datovou matici přesunuje menší okno obsahující výpočetní zápis, které svůj obsah v dané lokalitě zpracuje a výsledek uloží do nového souboru [13].

Používání modulu je velmi intuitivní. Jedná se o matematický zápis, kde vlevo od lomítka stojí jméno nové rastrové mapy a vpravo výpočetní vzorec se vstupními vrstvami. Zápis rastrové algebry v programu GRASS ukazuje následující vztah, který vytvoří digitální model povrchu přidáním výšky budov k původnímu digitálnímu modelu reliéfu:

Mapcalc > dmr_s_budovami = budovy + vyskovy_model

GRASS umožňuje pracovat také s operátory rozhodování (if), což je velmi využitelné. Operátory, které je možné použít pro definování operací s rastrovými vrstvami, jsou dostupné v tabulce, která je součástí této práce. Více se o mapové algebře v programu GRASS můžeme dočíst v [13].

Podíváme-li se na GRASS z jiné stránky než z pohledu práce s rastrovými daty, na která se soustředí, zjistíme podstatné nevýhody. Ty spočívají v práci s vektorovými daty. Například do verze 6.0 při importu dat z formátu shapefile mohl být importován s kresbou jen jeden atributový sloupec [14]. Také při tvorbě DMR GRASS zaostává. Nepracuje totiž s TIN a pro vyjádření DMR v podobě rastru využívá pouze různých interpolací přímo z vektorových dat.

4.2.2 SAGA GIS a mapová algebra

Převážně na rastry je orientovaný také SAGA GIS. Ten také obsahuje modul pro používání prvků mapové algebry nesoucí označení grid calculator. Jeho funkce je stejná jako v předešlém případě. Také skupiny operátorů jsou až na drobné výjimky stejné, ale podle dostupného manuálu [31] lehce pochopitelné.

Zápis samotné operace ukázané v kapitole 4.2.1 pro GRASS by v SAGA GIS měl následující podobu:

Formula: *budovy + vyskovy_model*

Poznamenejme, že způsob zápisu do oblasti „Formula“ v grid calculator je popsán v dokumentaci (viz [31]).

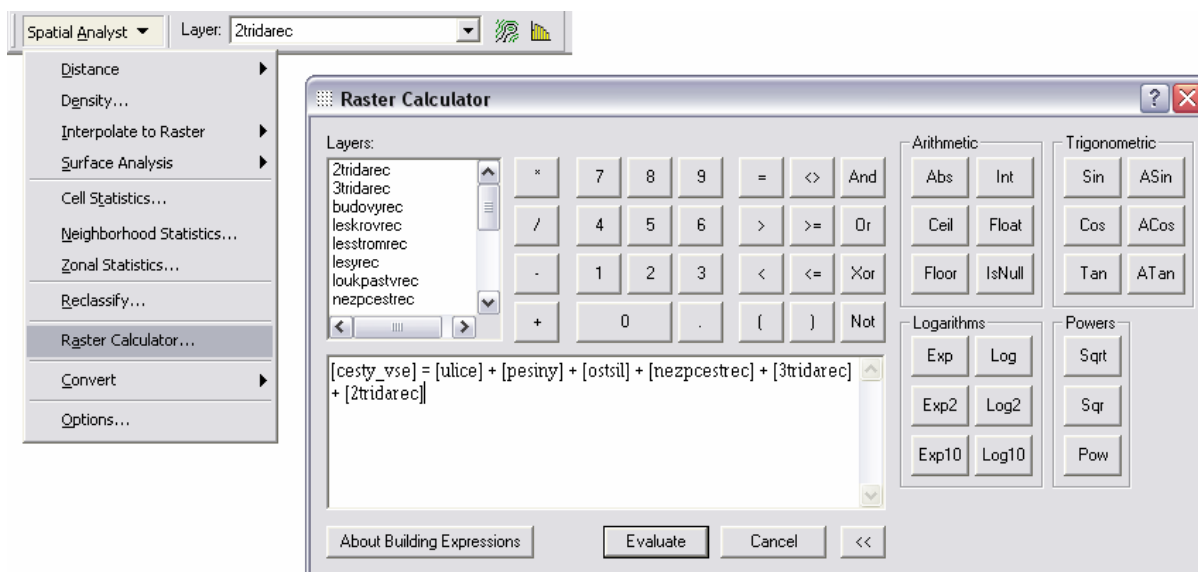
Jako další ukázkou použití grid calculator jsme vybrali příklad, ve kterém chceme rozlišit oblasti nad 1600 m.n.m a pod touto hodnotou (například z důvodu výskytu nějaké konkrétní vegetace).

K vytvoření rastru, který by označoval oblasti nad a pod touto hodnotou, potřebujeme rozhodovací funkci $\text{ifelse}(\text{podminka}, x, y)$ a funkci $\text{lt}(x, y)$, která je logickou funkcí vracející true , když je x menší než y . Pro náš požadavek v grid calculatoru tak pro vytvoření takovéto vrstvy napíšeme do okna vzorce (formula) následující příkaz: $\text{ifelse}(\text{lt}(1600, a), 1, 0)$.

Ukázku prostorové analýzy nad rastry nalezneme například ve [16], ovšem při práci s vektorovými daty SAGA opět zaostává. Nenabízí takovou funkcionalitu (omezuje se na základní funkce pro práci s vektory) jako ArcGIS, a tak i když již dokáže pracovat například s TIN, řadí se na úroveň GIS GRASS.

4.2.3 Práce s mapovou algebrou v ArcGIS

Prostředky pro realizaci mapové algebry nalezneme v nabídce Spatial Analyst, jehož rozšíření je třeba mít zapnuté (zaškrtnuté v nabídce Extension) a pro práci s Raster Calculator musí být nabídka jeho funkcí označená jako viditelná v nabídce nástrojů. Zjednodušená podoba nástroje mapové algebry, Raster Calculator, se nachází v hlavní nabídce menu Spatial Analyst. Vstupem do výpočtu jsou rastrové vrstvy, rastrové dataset, coverage, či shapefile, dále čísla, konstanty a vstupem mohou být dokonce i tabulky.



Obr. 4.3 Ukázka zápisu výpočtu v *Raster Calculator*

Samotný Raster Calculator nabízí příjemné grafické uživatelské prostředí, díky němuž je zadávání výrazů jednoduché a velmi intuitivní (viz obr. 4.3). S tímto nástrojem a funkcí Reclassify (obr. 4.4), patřící také do kategorie funkcí pracujících s rastry, v této práci vystačíme. Rozsáhlejší nástroj, mapová algebra, se nachází v Toolbox pod Spatial Analyst a nabízí práci s rastry na vyšší úrovni blížíící se programování. Více se o ní dozvíme ve zdařilé dokumentaci k samotnému software ArcGIS 9.2, [7]

Výše popisovaný případ vytvoření digitálního modelu povrchu by měl v Raster Calculator programu ArcGIS následující syntaxi:

[dmr_s_budovami] = [budovy] + [vyskovy_model]

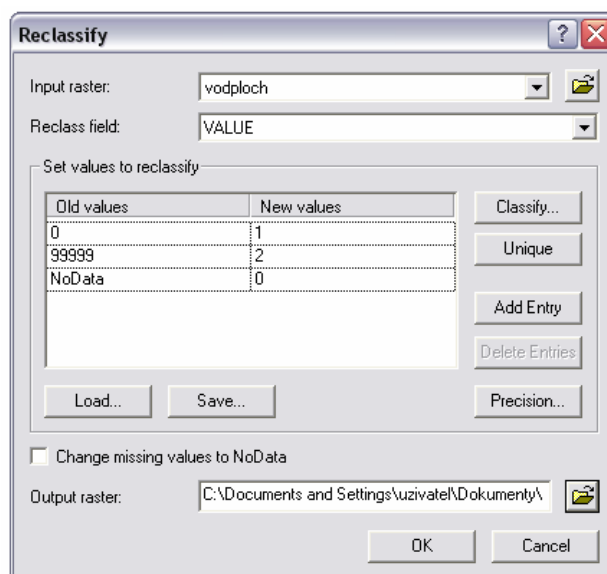
Další ukázky zápisu v Raster Calculator, tvořící novou rastrovou vrstvu, mohou mít následující podobu (jejich podstata je zřejmá):

*Elev_meters = Elev_feet * 3.2808*

Rain_total = Rain_April + Rain_May + Rain_June

Seznam všech operátorů, jež je možné v Raster Calculator použít, je součástí přílohy (příloha č.1).

V rámci práce s rastry si dovolíme upozornit na problém týkající se hodnoty NoData. Při matematické operaci s touto hodnotou (například přičítání konstanty k rastru) je hodnota nové buňky opět NoData, což může být na jedné straně využitelné, ale na druhé straně tento fakt může přivodit i četné problémy, protože řada uživatelů si tuto hodnotu představuje jako nulu.



Obr.4.4 Změna hodnot rastru pomocí nástroje Reclassify

Velmi dobrým nástrojem ze stejné nabídky Spatial Analyst je funkce Reclassify. Jak už název napovídá, slouží ke změně hodnot rastru. Funkci zmiňujeme, protože ji využijeme při tvorbě povrchu nákladů a v otázce práce s rastry se jedná také o jakousi zjednodušenou metodu mapové algebry. Pro změnu hodnot rastru je opět vytvořeno grafické prostředí (obr. 4.4) a tvorba reklasifikovaného rastru je velmi intuitivní.

4.2.4 Volba GIS software pro analýzu hledání nejlevnější cesty

Výše popsané GIS software umožňují práci s mapovou algebrou. Jedná se o nejznámější aplikace v oblasti GIS řešení, ale nutno podotknout, že zvláště nekomerčních produktů existuje více (např. GIS TopoL). Naším úkolem bylo vybrat jednu GIS aplikaci, která poslouží k vytvoření analýzy nalezení nejlevnější cesty. Vybrali jsme produkt společnosti ESRI, ArcGIS. Zde jsou některé důvody naší volby:

Pro zadávání příkazů mapové algebry slouží primárně příkazová řádka. Námi zvolený software poskytuje navíc i příjemné grafické uživatelské prostředí pro vykonávání mapové algebry. Tento přístup sice není vhodný pro automatizaci úkonů při rozsáhlejší nebo opakující se analýze, ale ArcGIS nabízí možnost vygenerovat z uživatelského rozhraní Model Builder skript, který je dále znovupoužitelný. ArcGIS kombinuje interaktivní a dávkový způsob zpracování rastrových analýz, což je jeho velkou předností před konkurenčními GIS.

Mapová algebra je součástí jednodušších modulů, jako Raster Calculator, nebo funkce Reclassify, nabízející intuitivní práci s prostředky mapové algebry (viz kap. 4.2.3).

Velkou výhodou je jeho komplexnost, možnost práce s různými typy dat (vektory, rastry), rozsah funkcí a v neposlední řadě příjemné celkové grafické rozhraní.

5 Tvorba vybrané analýzy nad rastrovými daty

Nyní již víme, jak vytvořit DMR a jak pracovat s rastrovými daty. Podívejme se tedy blíže na jednu ze základních analýz GIS a ukažme si postup analýzy hledání nejlevnější cesty nad rastrovými daty a nad co možná nejpřesněji vytvořeným DMR.

Analýzu provedeme pro zájmovou oblast Plzeňského kraje. O konkrétních použitých vrstvách (datech) se zmíníme později. Pracovat budeme v prostředí software ArcGIS společnosti ESRI.

Hledání nejvhodnější cesty mezi výchozím a cílovým bodem patří mezi jedny z nejnámějších aplikací v GIS. Požadavky na naplánovanou cestu se mohou lišit, ale obecně chceme najít takovou cestu, která by nás stála nejméně sil, a tedy náklady na její překonání by byly co nejmenší. Nutno podotknout, že podobnou analýzu lze provádět také nad daty ve vektorové formě, praktický postup je ovšem dosti rozdílný a tento problém spadá do oblasti síťových analýz v GIS. Při síťových analýzách se jednotlivým liniovým a dalším vektorovým prvkům definují uzlová, hranová a další pravidla. Do síťových analýz vstupují jiné informace (možnosti odbočení, křížení linií apod.). Porovnání těchto dvou přístupů a jejich přednosti popíšeme v kapitole 5.8.1.

Při stanovení nejlevnější cesty nad rastrovými daty pracujeme s tzv. váženou vzdáleností. Pro určování vážené vzdálenosti totiž nehraje roli jen absolutní vzdálenost mezi námi stanovenými objekty v terénu (nebo dokonce na mapě), ale mnoho jiných faktorů ovlivňujících přechod z jednoho místa na druhé (viz obrázek 5.1). O tom, kolik energie vydáme na překonání cesty, rozhoduje fakt, jestli jdeme z kopce nebo do kopce, jestli jdeme po upravené cestě, nebo se probíjíme křovinami, nebo jestli používáme nějaký dopravní prostředek. Vážená vzdálenost tedy vystihuje skutečnou vzdálenost a vypovídá mnohem více o dostupnosti různých cílů z výchozího místa než prosté odměření na mapě. Proto se při analýze hledání nejlevnější cesty pro různé účely uvažuje vážená vzdálenost a nikoli přímá vzdálenost vzdušnou čarou.



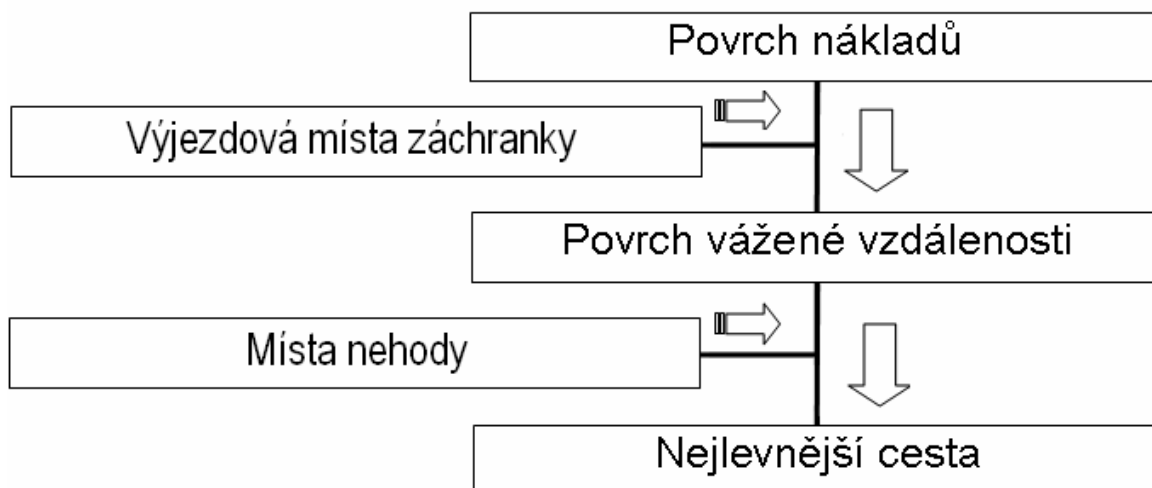
VERSUS



Obr. 5.1 Porovnání různých vážených vzdáleností při stejné vzdálenosti vzdušnou čarou.

Převzato z [20].

Postup analýzy je takový, že abychom našli výslednou nejlevnější cestu mezi dvěma body, musíme nejprve vytvořit tzv. povrch nákladů a z něj povrch vážené vzdálenosti. Správně vytvořený povrch nákladů je klíčem k celkově úspěšné analýze. Jeho tvorba musí být autorem správně rozmyšlena, protože je tvůrčím způsobem nejnáročnější. Po vytvoření povrchu nákladů je pomocí GIS software vytvořen povrch vážené vzdálenosti s určeným bodem výjezdu a od povrchu vážené vzdálenosti vede již jen prosté zadání cílového bodu k nalezení nejlevnější cesty (obr. 5.2). Vysvětlíme si tedy tyto dva druhy povrchů a ukážeme si postup jejich tvorby.



Obr. 5.2 Schéma postupu hledání nejlevnější cesty pro případ záchranky

5.1 Zdroj dat pro analýzu

Ještě než se podíváme na průběh samotné analýzy, musíme si něco říci o použitých datech.

Pro Českou republiku existují dva digitální modely území (digital landscape model). Data, která budeme používat v naší analýze, jsou vektorového charakteru, pocházejí ze ZABAGED (Základní báze geografických dat) a byla poskytnutá Krajským úřadem Plzeňského kraje.

ZABAGED je digitální geografický model území České republiky, který tvoří 106 typů geografických objektů zobrazených v databázi vektorovým polohopisem a příslušnými popisnými a kvalitativními atributy. Svou přesností a podrobností zobrazení geografické reality odpovídá přesnosti a podrobnosti Základní mapy České republiky v měřítku 1:10 000 (ZM 10). ZABAGED obsahuje informace o sídlech, komunikacích, rozvodných sítích a produktovodech, vodstvu, územních jednotkách, chráněných územích, vegetaci a povrchu a prvcích terénního reliéfu. Součástí ZABAGED je i výškopis reprezentovaný prostorovým 3D souborem vrstevnic [3]. Více je možné se o produktu ZABAGED dočíst na stránkách Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního [3].

Název druhého produktu nese stejné označení jako samotný typ produktu. Jedná se o dílo DMÚ-25 (Digitální model území). Zatímco ZABAGED je používán v civilní sféře, DMÚ-25 je určen převážně pro vojenské účely. Jedná se o vektorovou databázi topografických informací o území, která svou přesností a obsahovou náplní koresponduje s vojenskými topografickými mapami měřítko 1 : 25 000. Databáze je rozdělena do

7 tematických vrstev (vodstvo, sídla, komunikace, vedení sítí, hranice a ohrady, rostlinný a půdní kryt a terénní reliéf). Správcem digitálních produktů odvozených z vojenských topografických map je Vojenský topografický ústav (VTOPU) se sídlem v Dobrušce [12].

Je zřejmé, že tyto zdroje dat se liší. Přesnost ZABAGED se pohybuje dle třídy objektu v rozmezí 1–10 m, u DMÚ-25 se přesnost pohybuje opět podle třídy objektu, a to v rozmezí 0,5-20 m. [26]. Volbou zdroje, a tím přesnosti vstupních dat, je určena přesnost analýzy.

5.2 Povrch nákladů

Povrch nákladů je reprezentován jako rastr, a tak základním stavebním prvkem je rastrová buňka. Principem povrchu nákladů je, že po jeho vytvoření musí každá buňka vědět, jak „drahý“ je přechod přes ni. Každá buňka tedy nese hodnotu určující náročnost překonání, pokud by určená cesta vedla přes ni. Hodnota pixelu je samozřejmě odvozena z mnoha faktorů. Tyto faktory jsou různorodé a mají různé jednotky, kterými jsou vyjádřeny, a tak, jak si ukážeme, musí být výsledná hodnota buňky vypočtena funkcí, do níž vstupují všechny uvažované prvky reálného světa.

5.2.1 Faktor rovinné vzdálenosti

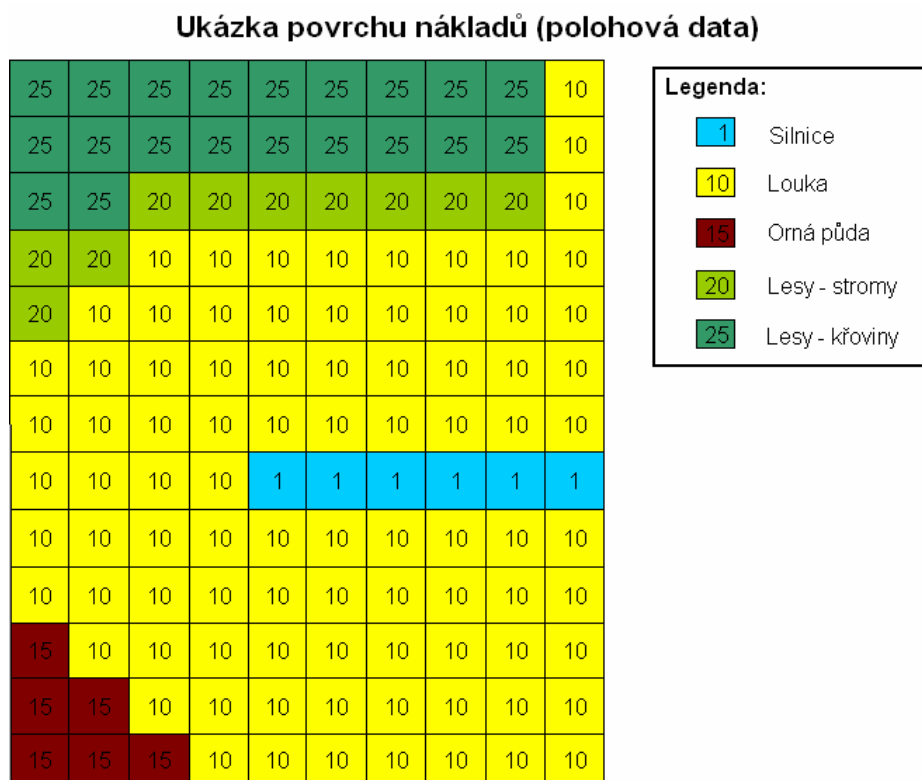
Obecně se při tvorbě povrchu nákladů nejprve započítá faktor rovinné vzdálenosti, což znamená, že na základě stanoveného rozlišení rastru každá buňka ví, jaká je její velikost. Do této problematiky také vstupuje otázka metriky rastru, jež byla popsána v kapitole 4.

5.2.2 Horizontální faktory povrchu nákladů

Jedním z nejdůležitějších horizontálních faktorů, který ukazuje obrázek 5.3, je povrch v terénu, jež buňka na mapě reprezentuje. Pokud uvažujeme jen tento aspekt pro tvorbu povrchu nákladů (neuvažujeme faktor terénního reliéfu a vertikální faktor), musí být hodnoty buněk rastru reprezentující stejný povrch (silnice, lesy, louky apod.) shodné (viz obr. 5.3). Povrch, který vyjadřuje tímto způsobem odpor krajiny a je v něm započítán faktor rovinné vzdálenosti (kap. 5.2.1), nazýváme frikční povrch.

Druh terénu není jediným horizontálním faktorem působícím na obtížnost překonání buňky rastru. Typickým příkladem horizontálního působení, který ovlivňuje pohyb terénem,

je například definování převládajících vzdušných nebo vodních proudů. Horizontální faktor tedy obecně udává účinek převládajícího horizontálního směru na energii, kterou musíme vynaložit na překonání buňky [20].



Obr. 5.3 Povrch nákladů vytvořený z polohopisných prvků (frikční povrch). Převzato z [20].

5.2.3 Faktor terénního reliéfu

V dalším kroku musí být uvážěn faktor terénního reliéfu. Jeho úkolem je převedení rovinné vzdálenosti mezi buňkami na vzdálenost po reliéfu. K tomuto úkonu je zapotřebí co nejpřesnější DMR, který zabezpečí správný výpočet trojrozměrné vzdálenosti potřebné k překonání buňky. Je třeba si také uvědomit, že tato vzdálenost přes buňku je stejná pro všechny směry překonávání buňky (na rozdíl od později zmiňované cesty přes buňku, do které jsou započteny vertikální faktory rozlišující směr překonávání buňky).

5.2.4 Vertikální faktor povrchu nákladů

Vertikální faktory reliéfu a jejich směrové působení jsou velmi důležité. Uvědomme si, že obtížnost překonání terénu z kopce je menší než absolvování téže cesty v opačném

směru do kopce. Je tedy třeba ohodnotit rastr z pohledu směru, kterým jednotlivou buňku překonáváme. K tomu je obecně tvořen samostatný povrch vážených směrů, který určuje nejlevnější cestu na základě výjezdového a cílového bodu (směru cesty) (viz kap.5.4).

5.2.5 Stanovení hodnot povrchu nákladů

Podívejme se na praktický postup výpočtu hodnot povrchu nákladů. Před tím, než začneme povrch nákladů tvořit, je třeba si rozmyslet některé skutečnosti. Především se zamyslet nad daty, která budeme používat, a vzít v úvahu velikost území, jež budou data reprezentovat. Objem dat je v případě rastrové reprezentace určen volbou velikosti buňky, která bude pro celý průběh analýzy a pro všechny vrstvy konstantní. Na velikosti buňky závisí přesnost analýzy, ovšem míra přesnosti je v opozici s faktorem velikosti a manipulovatelnosti dat. Čím podrobnější je rastr, tím větší je objem dat a výpočetní náročnost při každé operaci s tímto rastrem.

Naše rastrová analýza bude probíhat nad daty Plzeňského kraje a vzhledem k rozsáhlosti těchto dat byla jako dostačující velikost buňky zvolena hodnota 20 x 20 metrů. Dále musela být vybrána polohopisná data, která jsou významná pro pohyb v terénu a jež jsou významná pro hledání nejlevnější cesty. Mezi horizontální faktory povrchu nákladů byly započteny tyto vrstvy polohopisu (o zdroji dat více v kapitole 5.1):

- Dálnice
- Silnice první třídy
- Silnice druhé třídy
- Silnice třetí třídy
- Ostatní silnice
- Ulice
- Nezpevněné cesty
- Pěšiny
- Vodní toky
- Lesy – křoviny
- Lesy – kosodřeviny
- Lesy – stromy
- Louky a pastviny
- Orná půda
- Vodní toky
- Vodní plochy
- Zahrady a sady
- Zástavba

Nyní musíme podobně jako na obrázku 5.2 každý druh polohopisu ohodnotit číslem charakterizujícím náročnost přechodu přes daný terén. Postupů k tomuto ohodnocení a dalšímu postupu tvorby povrchu nákladů existuje více a to samé se dá říci o celém postupu hledání nejlevnější cesty (ty jsou často součástí know-how řešitelů takovýchto úkolů).

Tvorba ohodnocení povrchu nákladů vychází z následujících myšlenek: Hodnota buňky bude představovat potřebný čas pro její překonání, nebo průměrnou rychlost potřebnou pro její průchod, která je určena druhem povrchu, který buňka reprezentuje. Pokud bude hodnota povrchu nákladů v buňce představovat čas potřebný na její překonání, bude později vytvořený povrch vážené vzdálenosti vyjadřovat nejen faktické rozložení dojezdu do určitých míst, ale také čas potřebný k dosažení místa kdekoli v rastru.

Představě při zadávání hodnot náročnosti překonání buněk polohopisu je ovšem mnohem bližší rychlost přes buňku. A tak nejprve budeme hodnoty buněk povrchu nákladů zadávat jako průměrné rychlosti přes pixel a v konečné fázi na základě znalosti velikosti buňky (s) přepočteme rychlost (v) na čas ($t = \frac{s}{v}$).

Prvotní volba rychlosti pro plošnou buňku je dána způsobem pohybu přes buňku. Musíme uvážit, jestli se v místech, která to dovolují, budeme pohybovat vozidlem nebo pěšky, a tomu uzpůsobit hodnotu rychlosti přes buňku. Jestli nadefinujeme pro povrch nákladů komunikace jako buňky rastru, po nichž se pohybujeme autem specifickou rychlostí danou druhem silnice, záleží samozřejmě na konkrétních účelech analýzy. Například jiný pohled bude mít na situaci analýza pro hledání nejlevnější cesty pro rychlou záchrannou službu a jinak na analýzu bude nahlížet pěší turista, pro nějž naopak významné komunikace mohou být překážkou, protože se jim bude chtít vyhnout. V této práci budeme uvažovat, že vozidlo bude využíváno všude, kde to bude možné.

Určení rychlosti přes buňku se sestává ze dvou částí. Ve výše zmíněné první ohodnotíme druh terénu a v druhé musíme k takto ohodnocenému rastru započítat sklon terénu. K započítání svahovitosti musíme ovšem využít funkce, protože budeme počítat se sklony, jež jsou udávány v jiných jednotkách než rychlost.

Uvažovali jsme dva postupy práce se svahy. Buďto využijeme funkci pro jednotlivé (či dílčí skupiny) rastrové vrstvy polohopisu (a až poté by došlo k sjednocení do jednoho rastru), nebo použijeme jednu společnou funkci pro rastr reprezentující souhrnně všechny prvky polohopisu, tedy pro celý frikční povrch najednou (viz. kapitola 5.2.2).

Mnohem výhodnější a realitu lépe vystihující je postup, kdy rastrové vrstvy polohopisu zpracováváme funkcí jednotlivě, nebo po určených skupinách a až poté dojde k jejich spojení do výsledného povrchu nákladů. Můžeme tak uvažovat různé přístupy v této otázce volbou různých funkcí pro různé terény.

5.2.6 Postup tvorby povrchu nákladů v ArcGIS

Nejprve musíme poskytnutá vektorová data převést do rastrové podoby s buňkami reprezentujícími plochu 20 x 20 metrů. Použijeme k tomu nástroje ArcGIS. Přes toto na první pohled malé rozlišení jsou data pro oblast Plzeňského kraje dosti velká (počet řádků x počet sloupců je přibližně 6500 x 5200) a práce s nimi je pro výpočty náročná. V předchozí kapitole byly vyjmenovány prvky, jež tvoří horizontální složky faktorů povrchu nákladů, a tak ještě než vytvoříme rastrové vrstvy, je třeba vyseparovat jednotlivá témata podle námi uvedeného požadavku (viz obr. 5.4). Tento fakt se týkal především druhů silnic z vrstvy ZABAGED *DalniceSilnice*. K tomuto účelu využijeme funkce *Select by Attributes* a následný import vybraných dat do nové vrstvy. Poté může dojít k rasterizaci vybraných vektorových témat.

Před samotnou prací se *Spatial Analyst*, ve kterém nalezneme funkce pro práci s rastrovými daty, nastavíme v možnostech této skupiny nástrojů oblast, pro niž mají být volané funkce počítané. Vytvoříme obraz Plzeňského kraje a (zrasterizovaný) polygon nastavíme jako masku všech analýz. Toto je důležité pro naše pozdější výpočty. Oblasti výpočtu je přesto vhodné před spuštěním výpočtu zkontrolovat v nastavení jednotlivých volaných funkcí (volbou *Environments... - Raster analysis settings – Mask* a vybráním obrazu zkoumaného území).

Po této přípravě může dojít k samotnému ohodnocení rastru (obr. 5.4). Jednotky při vyjadřování rychlosti průchodu rastrem jsme museli použít v nestandardních rozměrech. To je způsobeno faktem, že při ohodnocování rastru neumí funkce *Reclassify* pracovat s desetinnými čísly. Proto bylo využito vyjádření rychlosti v metrech za hodinu. Převod na vyjádření v časových jednotkách byl proveden v závěru tvorby povrchu nákladů.

Za zmínku stojí vyřešení problematiky vodních ploch a vodních toků. Jako vodní toky (tedy jako liniové prvky) jsou v ZABAGED vedeny toky do šířky 5 metrů [3]. Pokud je vodní tok širší, je vedena osa toku liniovým prvkem, ale zároveň je vodní tok reprezentován jako plošný prvek – vodní plocha. Proto jsou tyto dva prvky polohopisu ohodnoceny na obrázku 5.4 různě (přechod přes malý potok bývá jednodušší než přes vodní nádrž apod.) a mají také jinou prioritu (viz dále).

Tvorba frikčního povrchu v sobě nesla jednu nepříjemnost. Vinou rasterizace dat, ale také díky reálnému překrývání prvků polohopisu ve skutečnosti (například silnice vedoucí přes vodní tok), došlo k překrývání objektů na mapě a muselo dojít k rozhodování, který bude mít před kterým přednost. Při tvorbě povrchu nákladů nesmí dojít k překrytí objektů (došlo by k jejich nasčítání). Proto musel být povrch nákladů vytvořen takovým způsobem, aby každá

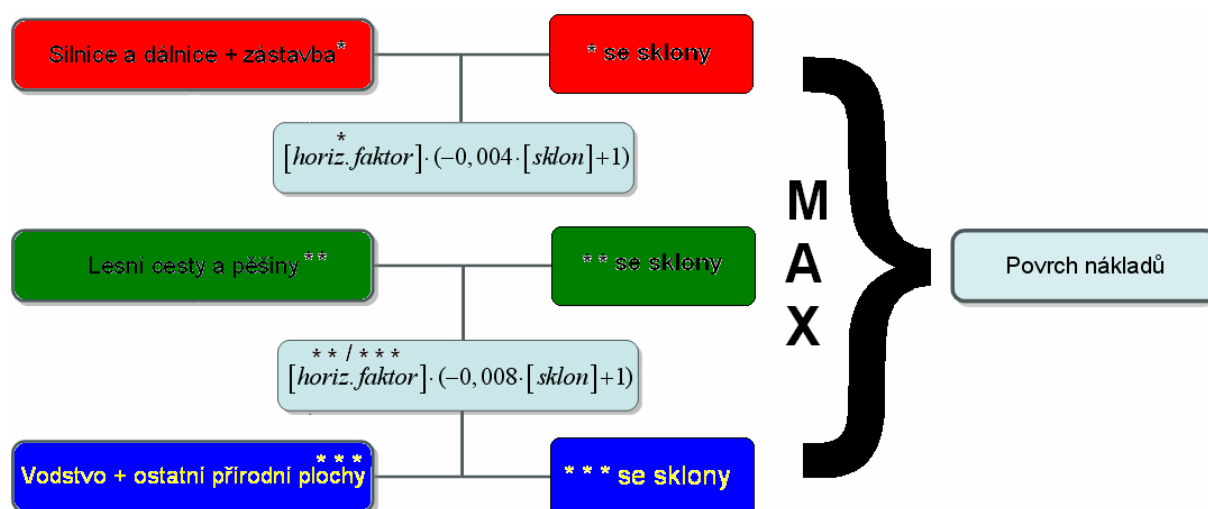
buňka frikčního povrchu byla obrazem jen jednoho objektu a to takového, který má větší váhu (např. cesta v podobě mostu má větší váhu než vodní plocha). Byla tedy vytvořena posloupnost prvků (viz. 5.4) s největší váhou (prioritou) až po prvky s nejmenší váhou (prioritou), podle níž docházelo k řešení kolizí mezi jednotlivými vrstvami.

Vrstva	Předpokládaná rychlost [m/h]	Čas potřebný pro překonání buňky [min]	Váha (priorita) vrstvy
Dálnice	130 000	0,00923	1
Silnice prvních tříd	90 000	0,01333	2
Silnice druhých tříd	80 000	0,015	3
Silnice třetích tříd	70 000	0,017	4
Ostatní silnice	60 000	0,02	5
Ulice	50 000	0,024	6
Zástavba	1 000	1,2	9
Nezpevněné (lesní) cesty	25 000	0,048	7
Pěšiny	4 000	0,3	8
Vodní toky	250	4,8	10
Vodstvo - plochy	10	120	11
Lesy - stromy	3 000	0,4	12
Louky, Pastviny	3 000	0,4	12
Zahrady, sady	3 000	0,4	12
Lesy - kosodřeviny	2 500	0,48	13
Orná půda	2 500	0,48	13
Lesy - křoviny	1 000	1,2	14

Obr. 5.4 Ohodnocení prvků polohopisu, priority jednotlivých vrstev tvořících frikční povrch a jejich rozčlenění do skupin

Z důvodu odlišných funkcí započítávajících sklon reliéfu pro různé prvky polohopisu byl povrch nákladů tvořen po skupinách (viz. barevné vyznačení na obr. 5.4 a 5.5). Pokud byla skupina kompletní a hodnoty rastru nebyly jiné než možné hodnoty frikčního povrchu (hodnoty předpokládané rychlosti v tabulce), došlo k přenásobení funkcí se sklonem rastru a poté opět na základě váhy buňky (max kritérium) ke sjednocení skupin do výsledného povrchu nákladů (viz obr. 5.5). (Jelikož hodnoty buněk vyjadřovaly rychlost, váhou (prioritou) při závěrečné fázi tvorby povrchu nákladů byly vyšší rychlosti buněk v kolizi).

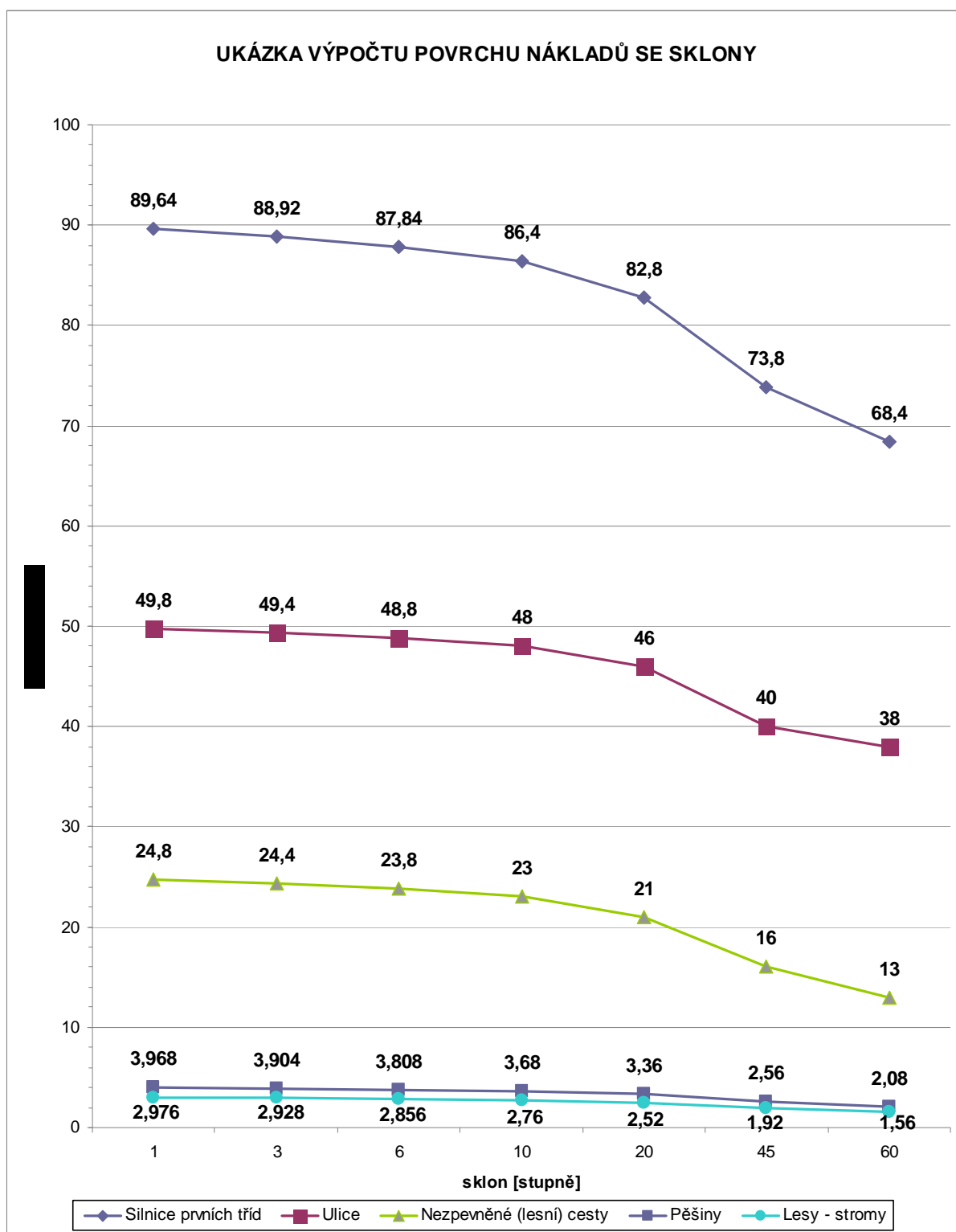
Proces tvorby frikčního povrchu a následně povrchu nákladů by bylo možné zautomatizovat, pokud by došlo k rasterizaci s uvedením priorit vrstev, ale my se tímto postupem nezabývali a proces jsme vykonali pomocí nástrojů ArcGIS „ručně“.



Obr. 5.5 Schéma postupu tvorby povrchu nákladů po skupinách frikčních povrchů se začleněním sklonu.

Již několikrát jsme zmínili počítání se sklony. Rastrovou vrstvu sklonů vytvoříme pomocí funkce *Slope* ve 3D Analyst z vylepšeného DMR (viz. kap. 3). Tato funkce vrátí rastr, ve kterém každá buňka nese hodnotu sklonu ve stupních (0-90°). Tato hodnota následně vstupuje do vzorce pro výpočet povrchu nákladů (obr. 5.5). Níže uvedené tvary funkcí byly stanoveny experimentální metodou. Uspokojivé výsledky zvolených funkcí dokumentuje tabulka a graf na obr. 5.6.

Vrstva	Rychlost přes buňku [km/h]	Příklady sklonů [stupně]						
		1	3	6	10	20	45	60
Dálnice	130	129,48	128,44	126,88	124,8	119,6	106,6	98,8
Silnice prvních tříd	90	89,64	88,92	87,84	86,4	82,8	73,8	68,4
Silnice druhých tříd	80	79,68	79,04	78,08	76,8	73,6	65,6	60,8
Silnice třetích tříd	70	69,72	69,16	68,32	67,2	64,4	57,4	53,2
Ostatní silnice	60	59,76	59,28	58,56	57,6	55,2	49,2	45,6
Ulice	50	49,8	49,4	48,8	48	46	40	38
Nezpevněné cesty	25	24,8	24,4	23,8	23	21	16	13
Pěšiny	4	3,968	3,904	3,808	3,68	3,36	2,56	2,08
Lesy - stromy	3	2,976	2,928	2,856	2,76	2,52	1,92	1,56
Louky, Pastviny	3	2,976	2,928	2,856	2,76	2,52	1,92	1,56
Zahrady, sady	3	2,976	2,928	2,856	2,76	2,52	1,92	1,56
Lesy - kosodřeviny	2,5	2,48	2,44	2,38	2,3	2,1	1,6	1,3
Orná půda	2,5	2,48	2,44	2,38	2,3	2,1	1,6	1,3
Zástavba	1	0,992	0,976	0,952	0,92	0,84	0,64	0,52
Lesy - křoviny	1	0,992	0,976	0,952	0,92	0,84	0,64	0,52
Vodní toky	0,25	0,248	0,244	0,244	0,23	0,21	0,16	0,13
Vodstvo - plochy	0,01	0,00992	0,00976	0,00952	0,0092	0,0084	0,0064	0,0052



Obr. 5.6 Ukázka výpočtů funkce zahrnující svahovitost do povrchu nákladů.

Pro skupinu silnic a dálnic (a zástaveb) (v tabulce 5.4 červené), tedy pro místa, po kterých (s výjimkou staveb) bude pohyb vykonáván pomocí vozidel, byla zvolena funkce:

$[\text{horizontální faktor}] \cdot (-0,004 \cdot [\text{sklon}] + 1)$.

Vzorec byl v takovémto tvaru zadán jako příkaz do *Raster Calculator*, horizontálním faktorem byla v tomto případě vrstva silniční sítě a zástavby.

Pro lesní cesty a pěšiny a pro ostatní přírodní plochy (v 5.4 zelené a modré), tedy v místech, kde se budeme pohybovat pěšky, byla zvolena mírně odlišná funkce. Tento výpočet proběhl v *Raster Calculator* pro dvě skupiny prvků (viz obr. 5.5):

$[\text{horizontální faktor}] \cdot (-0,008 \cdot [\text{sklon}] + 1)$.

Funkce byly voleny tak, aby výsledky s ohledem na vstupující hodnoty, vyjadřující situaci v terénu, určovaly skutečnou rychlost terénem. Ukázkou změnu rychlosti vlivem svahovitosti terénu pro vybrané druhy terénu ukazuje graf na obr 5.6. Tabulka na témže obrázku je poté vypočtena pro všechny uvažované prvky polohopisu a koresponduje s grafem. Z tabulky i grafu je patrné, jakým způsobem ovlivňuje sklon svahu rychlost přes buňku a že experimentálně určené tvary funkcí vyjadřují reálnou situaci.

Po tomto výpočtu byl naposledy využit *Raster Calculator* k převedení hodnot povrchu nákladů, které znázorňují rychlosti (v metrech za hodinu) přes buňku na hodnoty vystihující čas potřebný k překonání buňky (v minutách). Zápis s převodem na minuty je jednoduchý:

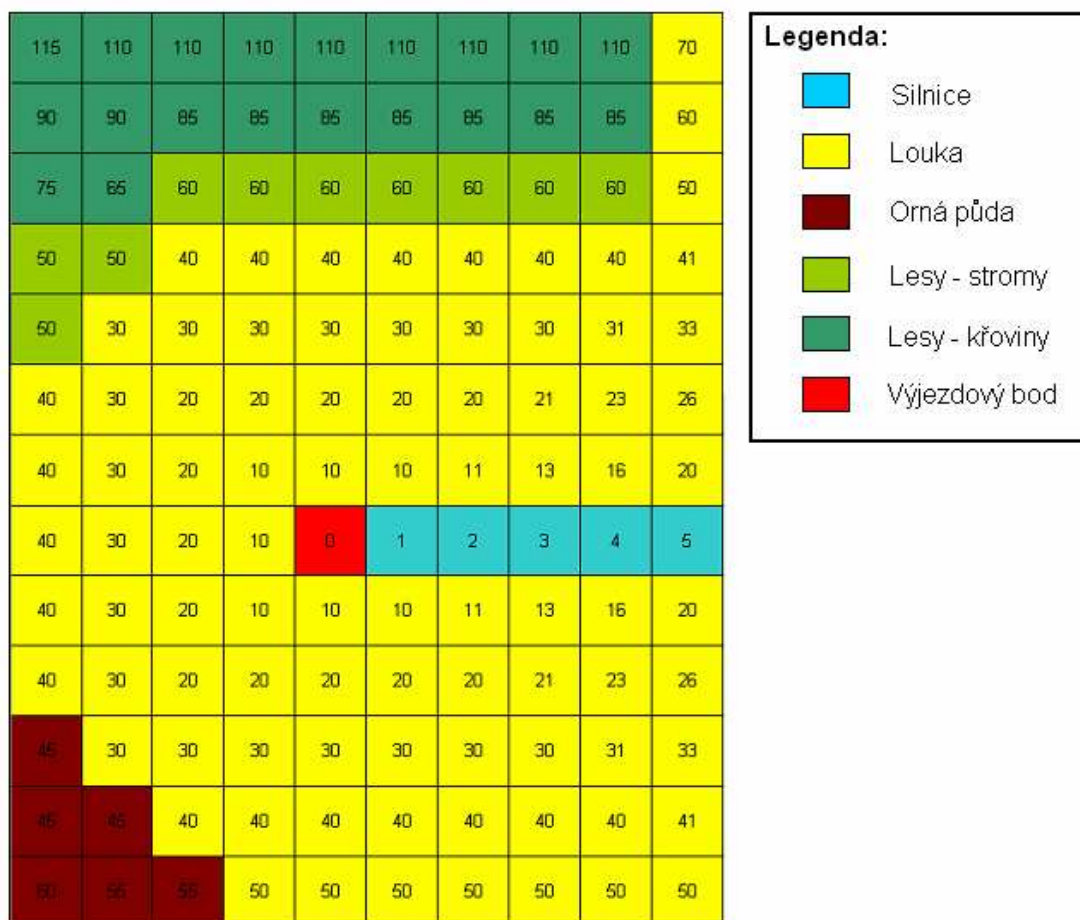
$(20 \div [\text{povrch nákladů} - \text{rychlost}]) \cdot 60$

Tímto výpočtem se vytvoří povrch nákladů, ve kterém každá buňka ví, jak dlouho bude trvat přechod přes ni.

5.3 Povrch vážené vzdálenosti

Vytvořením povrchu vážené vzdálenosti splníme další část úkolu nalezení nejlevnější cesty. K jeho vytvoření je třeba mít k dispozici povrch nákladů a bod (body) určující start cesty. Obecně může být výjezdových bodů více. Jedná se o body, které budou tvořit dna pomyslného nerovnoměrného trychtýře. Povrch vážené vzdálenosti v podobě trychtýře vyjadřuje dosažitelnost míst z výjezdového bodu na základě všech faktorů, jež byly započteny do povrchu nákladů. Následující obrázek (5.7) ukazuje příklad povrchu vážené vzdálenosti s jedním výjezdovým bodem, který koresponduje s obrázkem 5.3, tj. barvy rastru odpovídají polohopisu výše zmíněného obrázku.

Vyjádření povrchu vážené vzdálenosti ve 2D (v rastrové podobě)



Obr 5.7 Plošné znázornění povrchu vážené vzdálenosti s výjezdovým bodem v bodě 0.

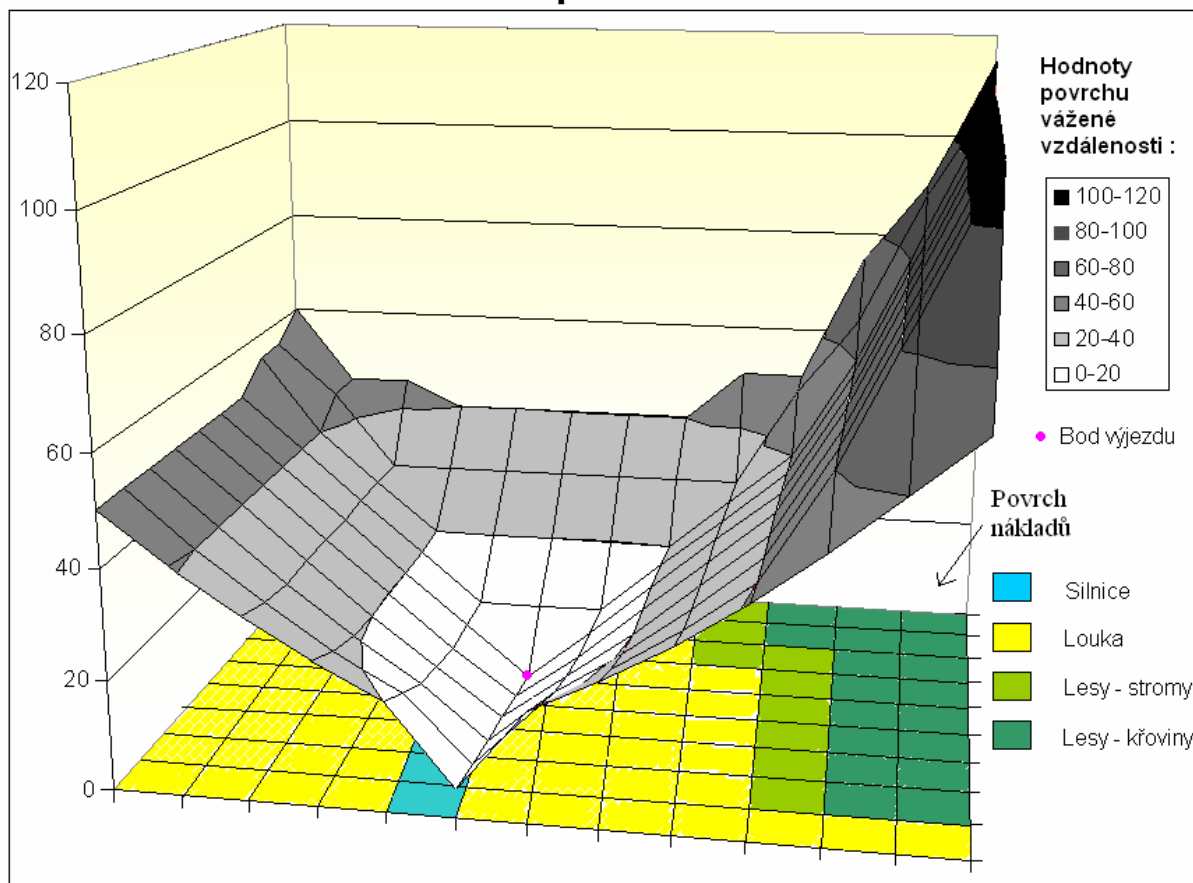
Převzato z [20].

Pokud bychom si představili povrch vážené vzdálenosti vizualizovaný ve 3D, bude se jednat o trychtýř se dnem ve výjezdovém bodě (obr. 5.8) a čím výše jsou části tohoto trychtýře (vysoká hodnota v rastru povrchu vážené vzdálenosti), tím hůře dostupné je dané místo z výjezdového bodu. Obecně tedy hodnoty buněk rastru od výjezdového bodu stoupají, avšak nerovnoměrně. Promítnou se zde totiž i jiné (již zmíněné) faktory, než přímá vzdálenost od bodu. Brali-li bychom v potaz jen vzdálenost vzdušnou čarou mezi místem výjezdu a ostatními body okolí, bude 3D znázornění povrchu vážené vzdálenosti vyjádřeno jako rovnoměrný trychtýř. To ovšem nikdy nenastane, protože „předlohou“ pro tento rastr je povrch nákladů a nikoliv vzdálenost vzdušnou čarou. Hodnoty vážené vzdálenosti tedy nerostou rovnoměrně, ale s ohledem na hodnoty povrchu nákladů.

Ukázku vizualizace povrchu vážené vzdálenosti ve 3D zobrazuje obrázek 5.8. Graf na obrázku zobrazuje povrch jako mřížku (lattice), ale ve skutečnosti se jedná o rastr. Povrch by

tedy měl být nespojitý, složený z jednotlivých buněk (plošek). Ovšem pro následnou představu nalezení optimální cesty je obrázek dostačující.

Ukázka namodelovaného povrchu vážené vzdálenosti nad vrstvou povrchu nákladů



Obr 5.8 Prostorové znázornění povrchu vážené vzdálenosti promítnutého na povrch nákladů

5.4 Povrch vážených směrů

Díky povrchu vážených směrů každá buňka povrchu vážené vzdálenosti ví, kudy se dostat do výjezdového místa nejrychleji. Povrch vážených směrů obsahuje buňky s hodnotami od 0 do 8, jimiž každá buňka definuje směr, nebo identifikuje sousední buňku (následující buňku) s nejmenší hodnotou povrchu vážené vzdálenosti [7]. Tímto postupem si můžeme představit definici cesty „nejvíce z kopce“, protože postupným hledáním sousední buňky s nejmenší hodnotou povrchu vážené vzdálenosti procházíme jednotlivé buňky cesty tak, abychom v pomyslném trychtýři (obr. 5.8) klesli co nejvíce a dostali se nejrychleji do dna trychtýře. Tento postup je principem hledání nejlevnější cesty jakožto hlavním úkolem práce,

protože řeší, jak se nejrychleji dostat z bodu události (např. místo nehody) do výjezdového bodu záchranné služby nebo hasičů.

Označení směrů tvořících povrch vážených směrů ukazuje obr. 5.9. Hodnota 0 je vyhrazena pro zdroj (výjezdové místo).

6	7	8
5	0	1
4	3	2

Obr. 5.9 Definice směrů tvořících povrch vážených směrů

5.5 Rastr alokací (Cost Allocation)

„Alokační rastr“ rozdělí území na oblasti, jež spadají k různým výjezdovým bodům. Hranice oblastí jsou místa, odkud je to do dvou sousedních výjezdových bodů „stejně daleko“ (myšleno z pohledu náročnosti cesty). Podíváme-li se opět na příklad s dojezdem záchranky, mohou tyto rastry určit, pro která místa nehody dojede který záchranný sbor, máme-li více výjezdových míst pro záchrannou službu. „Alokační rastr“ určí oblasti působnosti záchranných sborů v případě nehody v terénu, což může být velmi cenným výstupem této práce (viz. obr. 5.10 a přílohy).

5.6 Tvorba povrchu vážené vzdálenosti, povrchu vážených směrů a rastru alokací v ArcGIS

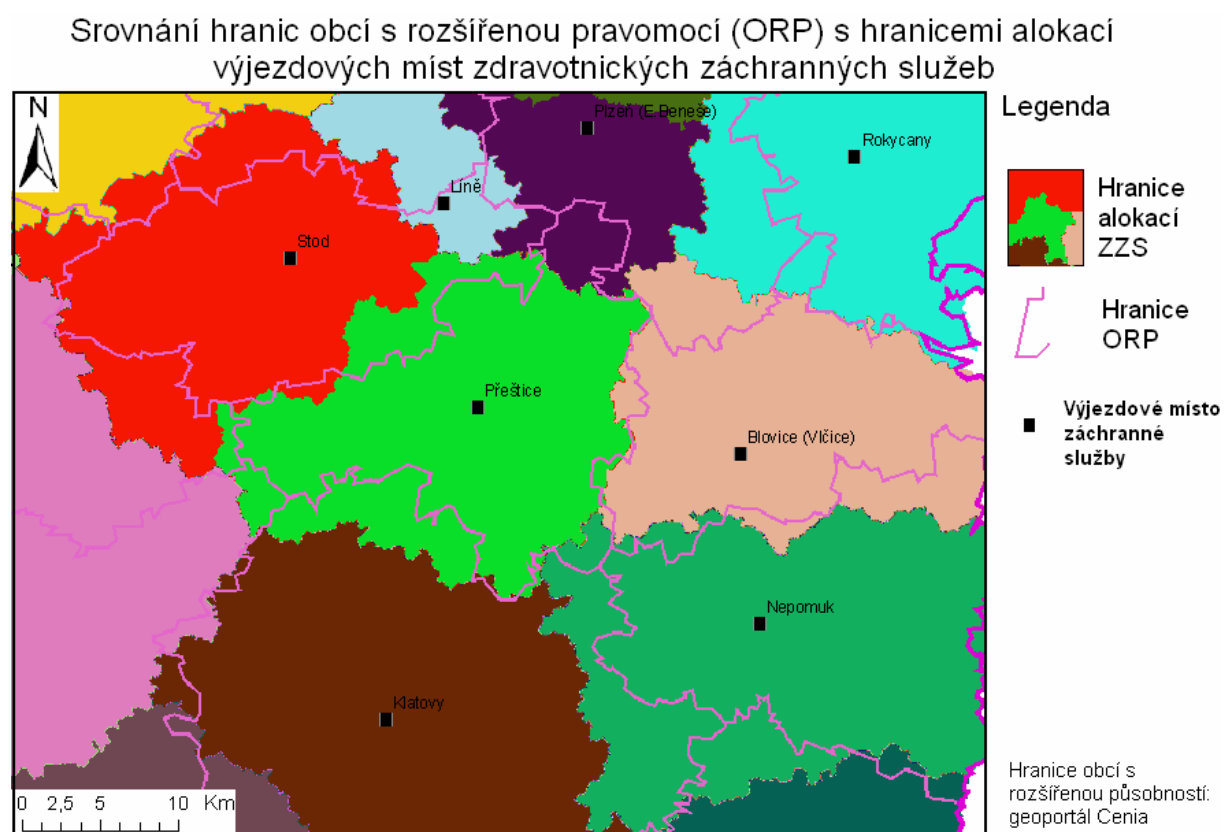
Pro výjezdový bod (body) musíme vytvořit samostatnou vektorovou vrstvu. V našem případě máme dodány bodové vrstvy s výjezdovými místy hasičů a zdravotnických záchranných služeb (ZZS) v Plzeňském kraji. Postupně vybereme jednu z nich a můžeme přistoupit ke spuštění funkce na tvorbu povrchu vážené vzdálenosti.

Povrch vážené vzdálenosti vytvoříme funkcí *Path Distance*, nacházející se v Toolbox ArcGIS 9.2, konkrétně ve Spatial Analyst Tools v nabídce Distance. Tato funkce vytvoří

kromě *Cost distance raster* (povrch vážené vzdálenosti) také *Backlink raster* známý z dřívější verze pod označením *Cost direction raster* (povrch vážených směrů). Pokud to uživatel vyžaduje, pomocí funkce *Path Distance Allocation* ve stejné nabídce může vytvořit také *Cost allocation raster* (rastr alokací). První dva jmenované rastry se následně použijí pro analýzu hledání „nejkratší“ vzdálenosti, třetí pak slouží jako samotný výstup analýzy.

Jedná se o velmi uplatnitelný výstup, který může napomoci přerozdělení jednotlivých obcí a oblastí pod správu nevhodnějšího zařízení. To je důležité obzvláště pro odlehlejší oblasti při vyhodnocování nějaké nenadálé události (požár, těžké zranění apod.).

Podívejme se, jak dopadne „alokační rastr“ při porovnání se správními oblastmi Plzeňského kraje v oblasti Přeštic (zelené) (obr. 5.10).



Obr. 5.10 Srovnání správních hranic a lokalit výjezdů ZS v okolí Přeštic.

Díky našemu přístupu je sám povrch vážené vzdálenosti nositelem cenné a rychle dostupné informace (pomocí nástroje Identify). Každá hodnota buňky tohoto rastru představuje časovou dostupnost do „nejbližšího“ výjezdového zařízení (z pohledu vážené vzdálenosti), respektive v obráceném pohledu časový dojezd záchranky či hasičů do tohoto místa. Připomeňme, že se jedná o vyjádření dojezdu v minutách.

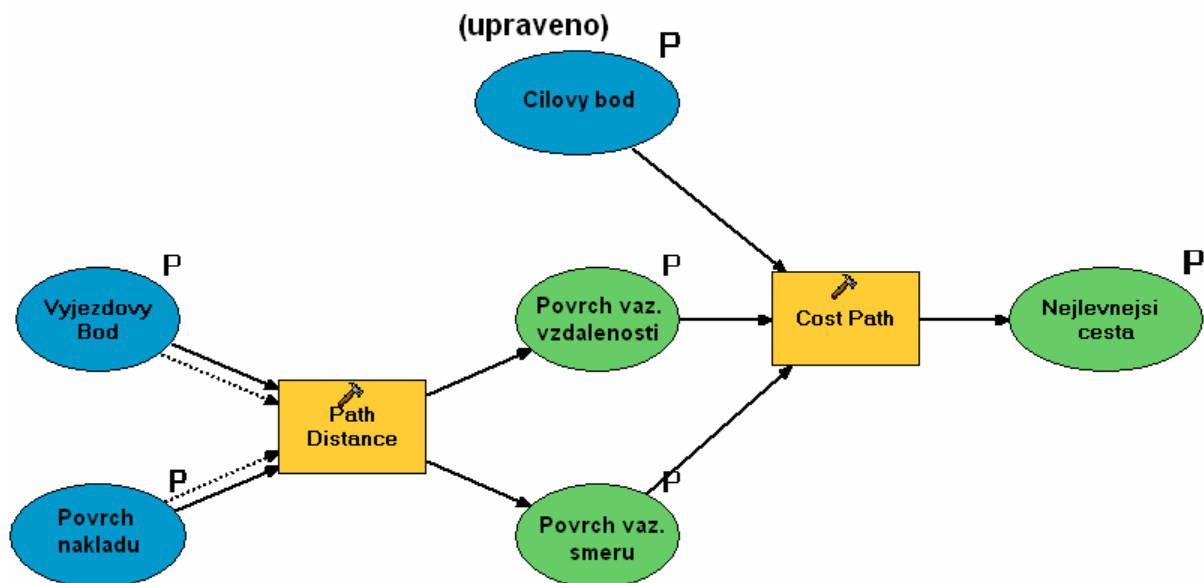
5.7 Nalezení nejlevnější cesty

Nyní již máme vše připravené na zadání místa nehody (události) a nalezení nejlevnější cesty. Cíl (opět můžeme cílů zadat více) cesty uložíme jako bod do samostatné vrstvy a spustíme funkci *Cost Path*, která se nachází také v menu *Spatial Analyst Tools – Distance*. Do dialogového okna je třeba zadat kromě vrstvy s místem události také povrch vážené vzdálenosti a povrch vážených směrů.

Na závěr podotknu, že názvy použitých funkcí, které nabízí *Spatial Analyst* v ArcToolbox, se nepatrně liší od funkcí ve *Spatial Analyst* umístěném v hlavním menu programu ArcMap. Funkce *Path Distance*, kterou jsme výše vytvořili povrch nákladů (a povrch vážených směrů), odpovídá funkci z menu *Spatial Analyst* pod názvem *Cost Weighted* a výše použitou funkci *Cost Path* nalezneme v menu *Spatial Analyst* pod názvem *Shortest Path*.

Závěrečnou fází postupu nalezení nejlevnější cesty (viz obr. 5.11) jsme již zautomatizovali pomocí *Model Builder*, nástroje ArcGIS.

Postup hledání nejlevnější cesty automatizací postupu v Model Builder



Obr. 5.11 Schéma nalezení nejlevnější cesty pomocí funkcí v software ArcGIS

5.8 Využití analýz nad rastrovými daty

Možností, jak využít popsanou analýzu nad rastrovými daty, se nabízí mnoho. A způsob použití ovlivňuje i postup hledání nejlevnější cesty od jejího počátku (tvorba povrchu nákladů aj.). Analýza se skládá ze 3 kroků, z nichž první dva (tvorba povrchu

nákladů a povrchu vážené vzdálenosti) jsou výpočetně náročné a poslední (nalezení nejlevnější cesty) proběhne v porovnání s předchozími velmi rychle (řádově sekundy). Tvorba povrchu nákladů vyžaduje rozsáhlejší promyšlení tvorby a proces výpočtu povrchu vážené vzdálenosti zabere program v závislosti na rozsahu území řádově desítky minut až hodiny. Pro oblast Plzeňského kraje trval výpočet povrchu vážené vzdálenosti počítačem s procesorem Intel Celeron 2,4 Ghz, 70 minut.

Pokud máme určeno, jakým způsobem se budeme v terénu pohybovat (využívání automobilu), můžeme vytvořit jeden povrch nákladů, který není třeba měnit, a můžeme z něj vycházet v dalších krocích analýzy. Povrch vážené vzdálenosti je závislý na volbě výjezdového místa (výjezdových míst). Pokud se výjezdové místo nemění (vycházíme stále z jednoho místa, například z domova), může být povrch vážené vzdálenosti také vytvořen jednou a používat jej neomezeně pro hledání nejlevnějších cest z neměnného výjezdového místa. Ovšem pokud se toto místo (nebo některé z míst, např. vznikne nové aj.) mění, nezbyvá než vytvořit povrch vážené vzdálenosti nový s novými „dny“ rastru – výjezdovými místy. To samé platí i o povrchu vážených směrů a rastru alokací.

V této práci jsme vypočetli povrch vážené vzdálenosti pro nalezení nejlevnější cesty z neměnných výjezdových míst, kterými jsou střediska zdravotnické záchranné služby a výjezdní místa hasičů, ale stejně tak ji mohou využít i další bezpečnostní a záchranné složky (policie, horská služba). Před výjezdem stačí do připraveného povrchu vážené vzdálenosti oblasti působnosti složky (může být určena na základě *Cost allocation raster*) zadat místo události (nehody, požáru, havárie) a algoritmus *Cost Path* nalezne během několika sekund, kudy bude nejsnazší se k danému místu dostat. To může být praktické nejen, pokud místo události je dopravně dostupné, ale také v místech bez příjezdové komunikace. A právě v těchto oblastech může mít nalezená nejlevnější cesta i cenu života. V oblastech bez silniční sítě je tato rastrová analýza přínosnější než podobná analýza hledání nejkratší cesty nad daty vektorovými (sít'ové analýzy).

Naší analýzu je možné využít i pro méně závažné problémy. Vrátime-li se na začátek práce, je snaha nalézt váženou nejkratší vzdálenost přes nejrůznější vlivy terénu potřebná i při turistice (pěší i cykloturistika). V dnešní době jsou dostupné a velmi oblíbené přijímače GPS s mapovými vrstvami a nejrůznějšími aplikacemi také pro turistické účely. Turistické GPS obsahují algoritmy hledání cest z místa A do místa B, podobně jako jsme zvyklí u GPS zařízení v automobilech. Ovšem ke svojí práci využívají vektorová data a algoritmy pro ně potřebné. Otázkou je, jestli jsou rastrové analýzy schopny konkurovat analýzám hledání nejlevnějších cest s vektorovými daty. Srovnajme si tedy tyto dva přístupy.

5.8.1 Srovnání analýzy s rastry a vektory při hledání nejlevnější cesty

Práce s rastrovými daty byla popsána v kapitolách 4 a 5. Síťové analýzy, které pracují s vektorovými prvky, vycházejí z teorie grafů, o nichž se dozvíme více v [26]. Umožňují definici různých komunikačních sítí včetně nejrůznějších hranových a uzlových pravidel, jako například možnosti odbočení, mimoúrovňového protínání různých vrstev apod.

Zavedením těchto a dalších pravidel zpřesníme analýzu hledání optimální cesty (a jejího samotného určení) a případného výpočtu doby dojezdu. Analýza je ale provedena pouze v komunikačních sítích a nikoliv v oblastech mimo cesty. U vektorových analýz vyvstává problém celoplošného pokrytí území. Jak se vyhnout tomuto problému je ukázáno na obr. 5.11, kde místa na komunikaci s dojezdem rovným 10 minutám jsou spojena, čímž je vytvořena souvislá plocha (mnohoúhelník) reprezentující oblast s dojezdy do 10 minut. Při porovnání s výsledky rastrové analýzy je zřejmé, že se jedná o velmi hrubý odhad skutečnosti. I kdybychom použili sofistikovanějších postupů (jako např. [29]), problém celoplošného pokrytí vyřeší správně až analýza nad rastrovými daty.

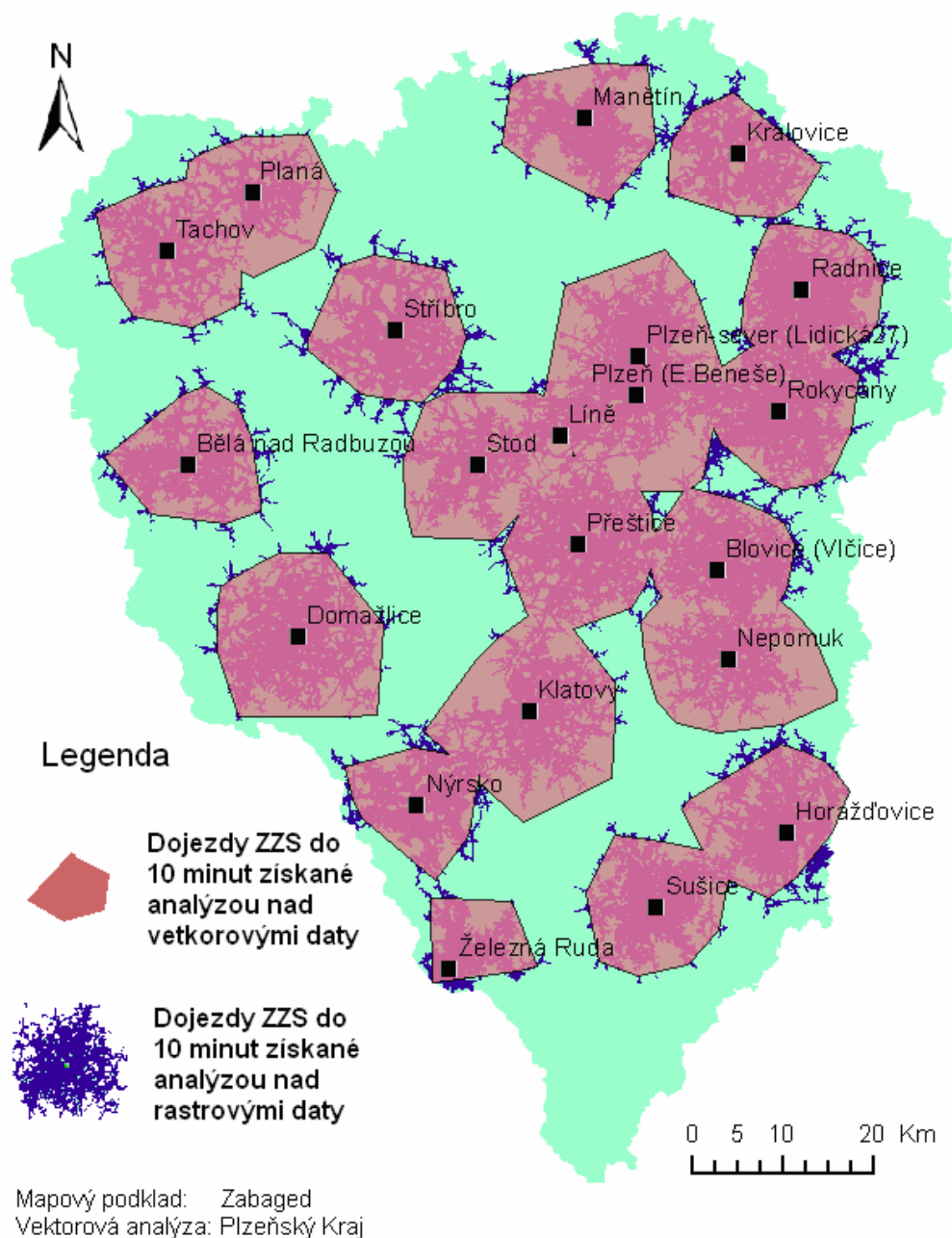
Výhodou hledání nejlevnější cesty nad vektorovými daty je možnost generování navigace pro samotnou cestu, jež je známá z rozšířených GPS zařízení. O této možnosti a dalších aspektech práce s vektorovými daty v této problematice pojednává [29].

V silničním provozu spíše využijeme síťové analýzy nad vektorovými prvky, ale v oblasti turistiky by mohla být práce s rastrovými formáty velmi účelná. Zohledněním přírodních podmínek, terénního reliéfu, sklonů svahů apod. jsou rastrové analýzy hledání nejlevnějších cest přesnější a umožní přesné určení nejlevnější cesty i v odlehlejších místech krajiny. A zde je působnost těchto analýz. Pomocí rastru nedokážeme nadefinovat například mimoúrovňové křížení komunikací, či jednosměrnost komunikace, ale v místech bez komunikací, či s řídkou sítí silnic se bez rastru neobejdeme.

S odvoláním na výše řečené si ukažme, jak lze pomocí povrchu vážené vzdálenosti a mapové algebry určit oblasti s dostupností do stanoveného časového limitu. Na obrázku 5.11 porovnejme různé výsledky stejné analýzy nad rastrovými a vektorovými daty.

Časová dostupnost je velmi důležitým kritériem v oblasti plánování. Je v zájmu všech záchranných složek mít takové rozmístění výjezdových míst, aby dostupnost v celé oblasti byla co nejlepší. Časová dostupnost záchranných sborů je dokonce součástí zákona týkajícího se záchranných jednotek.

Ukázka porovnání rastrové a vektorové analýzy dostupnosti v Plzeňském kraji



Obr. 5.11 Určení dostupnosti ZZS dvěma analýzami a jejich vzájemné porovnání

Výsledky vektorové analýzy nad komunikacemi byly dodány pro kontrolu Plzeňským krajem. V oblasti komunikací jsou tato data díky použitým pravidlům velmi přesná. Při porovnání si ovšem všimněme, že oblasti mimo komunikace jsou u vektorové analýzy určovány velmi jednoduchým postupem (spojením míst na komunikaci).

Zamyslíme-li se nad výsledky analýz, napadne nás, že správného výsledku bychom mohli dosáhnout kombinací obou druhů dat a obou analýz. Tento postup se může stát námětem dalšího zkoumání a přínos takovéto práce by byl jistě kladný.

Výstupů z námi vytvořené analýzy může být ještě více a práce s nimi je velmi rozmanitá. V práci popsané možné výstupy analýzy a vytvořené datové vrstvy jsou součástí přílohy k této práci.

6 Závěr

V práci jsme se snažili splnit cíle, které jsme si na začátku stanovili. V první teoretické kapitole jsme se věnovali vybraným technikám pro tvorbu digitálního modelu reliéfu. Ukázali jsme si datové modely uložení DMR, zmínili jsme se o nepravidelné trojúhelníkové síti a interpolačních metodách.

Ke všem analýzám je zapotřebí mít přesná data. V navazující praktické části jsme se věnovali zpřesňování digitálního modelu reliéfu, jakožto velmi důležitému činiteli při analýze hledání nejlevnější cesty. V práci byl zčásti vyřešen problém fiktivních spočinků v DMR začleněním výškově určených kosterních hran. Pomocí algoritmu, který jsme vytvořili v jazyce VBA, jsme vylepšili TIN, který věrněji reprezentoval skutečný tvar reliéfu.

Před samotnou analýzou nad rastrovými daty jsme věnovali teoretickou kapitolu nástrojům pro vytvoření rastrových analýz, zvláště mapové algebře.

V praktické aplikaci jsme poukázali na jednu z metod nalezení nejlevnější cesty mezi dvěma body na digitální mapě. Pracovali jsme výhradně s rastrovými daty (původní vektorová data byla převedena na rastrová). Další z možností, jak nalézt nejlevnější cestu, je provést tuto analýzu nad daty vektorovými. Vzhledem k charakteru dat využívá jiné prostředky pro určení nejlepší dostupnosti k cíli. Obě metody byly v závěru práce srovnány. V této oblasti shledáváme další možnosti rozšíření práce.

Samotné hledání nejlevnější cesty bylo postupnými úkony vyřešeno a výsledky jsou součástí přílohy k této práci. Dovolíme si upozornit na některé vzniklé problémy.

Otázka přesnosti analýzy je dána především procesem rasterizace. Rasterizací (v našem případě se vznikající velikostí buňky 20 x 20 m) dochází k nepřesnostem a překrytu buněk vrstev, což musí být následně řešeno odstraněním kolizí.

Posledním výraznějším problémem analýzy je, že vzniklé výstupy byly vypracovány pouze ze znalosti dat Plzeňského kraje. Ovšem na hranicích Plzeňského kraje již mohla hrát velkou roli výjezdová místa a samozřejmě ostatní faktory mimo kraj. Výsledky jsou v místech hranic vztaženy (alokovány) pouze k datům Plzeňského kraje, ale je možné, že například jejich dostupnost je jiná (lepší) v závislosti na blízkosti výjezdových míst a podmínkách v sousedním kraji.

S ohledem na tyto problémy je pravdivost analýzy nesporná. Přesnost byla dokázána porovnáním s daty získanými analýzou Plzeňského kraje, kterému budou výsledky této práce předány pro vlastní potřebu.

Věříme, že práce a její výsledky jsou využitelné a postup práce aplikovatelný také pro jiné oblasti, o nichž byla v práci řeč. Vytvořením přínosné práce byl splněn jeden z nejdůležitějších cílů tohoto díla.

7 Seznam použitých pramenů a literatury

- [1] Bezděk, J. Automatizované generování vrstevnic nad nepravidelnou trojúhelníkovou sítí (TIN). KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Semestrální práce z předmětu APA, 2007.
- [2] Buckley, D.J. The GIS Primer, An introduction to Geographic Information Systems[online].USA, 1997. Dostupné z: http://bgis.sanbi.org/GIS-primer/page_01.htm
- [3] ČÚZK. Základní báze geografických dat ZABAGED® [online]. Praha, 2007. Dostupné z: http://www.cuzk.cz/Dokument.aspx?PRARESKOD=998&MENUID=0&AKCE=DOC:30-ZU_ZABAGED
- [4] Dafer A.; El Hassan, I.M. Comparison of thin plate spline, polynomial, CI-function and Shepard's interpolation techniques with GPS - derived DEM. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2001, ročník 3, číslo 2
- [5] Doubrava, P. Testovací aplikace pro transformaci rastrů při tvorbě DKM [online].Gepro Praha, 2007. Dostupné z <http://www.gepro.cz/geodezie-a-projektovani/tipy-a-triky/rastry/testovaci-aplikace-pro-transformaci-rastru-pri-tvorbe-dkm/>
- [6] Eppstein, D. Geometry in action – Interpolation and Extrapolation [online]. USA, 2004. Dostupné z: <http://www.ics.uci.edu/~eppstein/gina/interpolate.html>
- [7] ESRI. ArcGIS 9.2 Desktop Help [online]. 2006. Dostupné z: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>
- [8] Horák, J. Prostorová analýza dat. Institut geoinformatiky. VŠB - technická univerzita Ostrava, 2002.
- [9] Chris R.; Boyd M. CatchmentSIM: A New GIS Tool for Topographic Geo-computation and Hydrologic Modelling. Hydrology and Water Resources Symposium, 2003. Wollongong.
- [10] Jedlička, K. Accuracy of surface models acquired from different sources – important information for geomorphological research. Geomorphologia Slovaca and Bohemica - in press.
- [11] Jedlička, K.; Břehovský, M. Úvod do geografických informačních systémů (GIS) [online]. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <http://gis.zcu.cz/studium/ugi/elearning/index1.htm>
- [12] Langr, J. Geografická data [online]. T-MAPY spol. s.r.o. Hradec Králové, 2008. Dostupné z: http://www.tmapy.cz/public/tmapy/cz/_aktualne/_clanky/geograficka_data.html

- [13] Neteler, M. GIS GRASS, Praktická rukověť ke geografickému informačnímu systému GRASS [online]. Trento, Itálie, 2003. Dostupné z:
http://gama.fsv.cvut.cz/data/grasswikicz/grass_prirucka/grass_prirucka_0.4.pdf
- [14] Pacina, J. Popis principů fungování vybraných prostorových analýz a jejich implementace v nekomerčním GIS GRASS pro názornou výuku. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Diplomová práce, 2005.
- [15] Pankratov, K.K. SaGA Contents [online].Massachusetts, USA, 1996. Dostupné z:
<http://puddle.mit.edu/~glenn/kirill/SAGAHTML/Contents.html>
- [16] Petrák, J. Představení projektu SAGA GIS [online]. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Semestrální práce z předmětu APA, 2007. Dostupné z:
http://gis.zcu.cz/studium/apa/referaty/2006/Petrak_SAGA_GIS/
- [17] Podobnikar T. Suitable digital elevation model. Institute of Anthropological and Spatial Studies, Scientific Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Lublaň, 2006.
- [18] Rapant, P. Digitální modely reliéfu [online]. Institut geoinformatiky, VŠB - technická univerzita Ostrava, 2006. Dostupné z:
http://gis.vsb.cz/Rapant/Vyukove_Materialy/2006_2007/ls_dmr.htm
- [19] Řehák, T. Spojení dat z GPS a ze sportesteru pro sportovní účely [online]. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Bakalářská práce 2006. Dostupné z:
http://gis.zcu.cz/studium/dp/2006/Rehak_Spojeni_dat_z_GPS_a_ze_sportesteru_pro_sportovni_ucely_BP.pdf
- [20] Řehák, T. Problém průchodnosti terénu a nalezení nejlevnější cesty (rastrová data) [online]. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Semestrální práce z předmětu APA, 2006. Dostupné z:
http://gis.zcu.cz/studium/apa/referaty/2006/Rehak_NalezeniNejlevnejsiCesty/
- [21] Řehák, T.: Tvorba korektního DMR, KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Semestrální práce z předmětu AGI, 2007.
- [22] Řehák, T. Ukládání obrazových dat v Oracle Spatial [online]. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Semestrální práce z předmětu PDB, 2007. Dostupné z:
http://gis.zcu.cz/studium/pdb/referaty/2007/Rehak_GeoRaster/index.html
- [23] Strych V. Triangulace a editování vrstevnic. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Diplomová práce, 2003. Dostupné z:
http://www.gis.zcu.cz/studium/dp/2003/Strych_Triangulace_a_editovani_vrstevnic_DP.pdf
- [24] Šíma, J. Geoinformační terminologie pro geodety a kartografy. [Geoinformatic terminology for surveyors and cartographers]. 1st edition. Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický (VÚGTK). Zdiby, 2003.
- [25] Tomlin, C.D.: A map algebra. Harvard Computer Graphics Conference. Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Cambridge, 1983. Dostupné na:

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V91-4698RWS-3&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=57de38b7cfe53c465fe3c0c2b9653d3b

[26] Tutte, W. T.; Crispin, St. J. A. Graph Theory. Cambridge University Press, 2001. 356 s. ISBN: 0521794897

[27] US Army Corps of Engineers. Airborne LIDAR Topographic Surveying [online]. 2002. Dostupné z: <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-1-1000/c-11.pdf> .

[28] Vaníčková, L. Genetic algorithms use for making plate digital terrain model (Využití GA při tvorbě plátového digitálního modelu terénu) [online]. In. GIS Ostrava 2004. Dostupné z: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2004/Sbornik/Referaty/vanickova.htm

[29] Velhartický, D. Analýzy nad vektorovou sítí [online]. KMA, FAV, Západočeská univerzita v Plzni, Semestrální práce z předmětu APA, 2006. Dostupné z: http://gis.zcu.cz/studium/apa/referaty/2006/Velharticky_AnalyzyNadVektorovouSiti/

[30] Veverka, B. Topografická a tématická kartografie. Vydavatelství ČVUT Praha, 2001. ISBN: 80-01-02381-8

[31] Victor, O. A gentle introduction to SAGA GIS [online]. Edition 1.1, Madrid, Španělsko, 2004. Dostupné z: <http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php>

8 Seznam příloh

- A. Seznam operátorů používaných v Raster calculator
- B. Obsah přiloženého CD

A. Operátory používané v Raster Calculator ArcGIS 9.2

Tabulka operátorů v ArcGIS

OPERATOR	DESCRIPTION OF OPERATOR	OPERATOR	DESCRIPTION OF OPERATOR
Arithmetic:		Bitwise:	
-	Unary- minus	^^	bitwise complement of expression
mod	modulus	>>	right shift
*	multiplication	<<	left shift
/	division	&&	bitwise and
div	floating point division	!!	bitwise exclusive or
+	addition		bitwise or
-	subtracts	Combinatorial:	
Boolean:		cand	and
^, not	complement of expression	cor	or
&, and	and	cxor	exclusive or
!, xor	Boolean exclusive or	Logical:	
l, or	Boolean or	diff	logical difference
Relational:		in	contained in
<, lt	less than	over	over
<=, le	less than and equal to		
>, gt	greater than		
>=, ge	greater than and equal to		
==	equal to		
^=, <>, ne	not equal to		

B. Obsah příloženého CD

DIPLOMOVA_PRACE_TOMAS_REHAK.pdf

Vypracovaná diplomová práce ve formátu pdf.

Obrázky

Adresář obsahující všechny obrázky použité v DP.

Ukázky výstupů z analýzy

Adresář obsahující mapové výstupy z analýzy nad rastry.

Diplomka_prace.mxd

Projekt v ArcMap obsahující skript dynamické segmentace ve VBA, výstupní vrstvy, ale také vrstvy jako mezivýsledky analýzy a další.