

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
Prírodovedecká fakulta

Michal GALLAY
DIGITÁLNE MODELOVANIE RELIÉFU V OPEN-SOURCE GIS

Košice 2015

Publikácia vychádza ako výstup aktivity 1.2 Tvorba a inovácia študijných programov na Prírodovedeckej fakulte UPJŠ v rámci dopytovo-orientovaného projektu **Rozvoj inovatívnych foriem vzdelávania a podpora interdisciplinarity štúdia na Univerzite Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach (RIFIV)**, ITMS 26110230101.

DIGITÁLNE MODELOVANIE RELIÉFU V OPEN-SOURCE GIS

Vysokoškolské učebné texty

Autor: © 2015

Mgr. Michal Gallay, PhD. - *Ústav geografie,*

Prírodovedecká fakulta Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Recenzenti:

prof. Mgr. Jaroslav Hofierka, PhD.

RNDr. Marián Jenčo, PhD.

Jazykový korektor:

PhDr. Žofia Figel'ová

© 2015 Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Prírodovedecká fakulta

Všetky práva vyhradené. Toto dielo ani žiadnu jeho časť nemožno reprodukovat', ukladať do informačných systémov alebo inak rozširovať bez súhlasu majiteľov práv.

Za odbornú stránku publikácie zodpovedá autor. Rukopis neprešiel redakčnou úpravou.

ISBN 978-80-8152-289-5

Úvod	4
1 Georeliéf a jeho modelovanie v širšom kontexte	6
1.1 Kľúčové pojmy v digitálnom modelovaní reliéfu.....	6
1.2 Filozofická povaha georeliéfu	8
1.3 Kartografické modely georeliéfu	12
1.4 Vyjadrenie tvaru georeliéfu	14
1.5 Súradnicové systémy a nadmorská výška	15
1.6 Mierka a úroveň podrobnosti	19
1.8 Priestorová závislosť geografických javov	21
1.7 Digitálne výškové údaje a modely	23
1.8 Význam digitálnych výškových údajov a modelov	24
1.9 Aplikácie digitálneho modelovania georeliéfu	25
2 Metódy zberu údajov pre tvorbu digitálnych modelov georeliéfu	30
2.1 Stručný úvod a klasifikácia metód	30
2.2 Tradičné geodetické meranie - tachymetria	31
2.3 Globálne navigačné satelitné systémy	32
2.4 Fotogrametria	39
2.5 Multispektrálne skenovanie	44
2.6 Radar typu SAR.....	47
2.7 Laserové skenovanie (LiDAR)	50
2.8 Digitalizácia mapových podkladov	55
2.9 Porovnanie metód	57
3 Proces tvorby digitálnych výškových modelov	62
3.1 Výber dátového modelu pre reprezentáciu georeliéfu	63
3.2 Metódy priestorovej interpolácie.....	67
3.3 Deterministické interpolačné metódy	70
3.4 Geoštatistické interpolačné metódy	76
3.5 Optimalizácia interpolácie	78
4 Geomorfometrická analýza reliéfu	80
4.2 Aplikované geomorfometrické analýzy.....	87
5 Kvalita digitálnych modelov reliéfu a jej hodnotenie	91
5.1 Hodnotenie presnosti DMR	91
5.2 Neurčitost' DMR a jej šírenie	95
5.3 Vizuálne nástroje hodnotenia kvality DMR	97
6 Softvérové nástroje pre tvorbu DMR	100
6.1 GRASS GIS.....	100
6.2 Quantum GIS.....	102
6.3 Prostredie R	104
6.4 LAsTools.....	106
7 Zoznam použitej literatúry	109

Zemský povrch (reliéf Zeme, georeliéf) predstavuje veľmi dôležité rozhranie v rámci krajinej sféry Zeme, pretože svojimi geometrickými vlastnosťami ovplyvňuje distribúciu hmoty a energie v krajine (Tab. 1). Zároveň sa tak neustále pretvára a mení svoju podobu v čase. Tieto modely reprezentujú georeliéf v zjednodušenej podobe zväčša ako nemeniaci sa (statický) prvok krajiny. Ich tvorba vyžaduje poznanie nadmorských výšok a teoretickú formuláciu. Modely georeliéfu môžu mať rozličnú povahu, napríklad v podobe plastických máp, drôtených blokdiagramov alebo digitálnych hodnôt zapísaných v počítačovom prostredí, ktoré predstavujú virtuálny zemský povrch. Práve poslednou menovanou formou reprezentácie georeliéfu sa zaoberá predkladaný učebný text.

Cieľom digitálneho modelovania reliéfu je tvorba spojitých digitálnych reprezentácií povrchu z nespojitých údajov o nadmorskej výške, odvodenie morfometrických parametrov reliéfu a ich ďalšia analýza. Hlavným účelom tejto činnosti je vizualizácia vlastností povrchu, príprava podkladov ako vstupov pre modelovanie javov a procesov súvisiacich s povrchom (napr. erózia, oslnenie, tečenie vody, počasie), inžiniersky návrh a dizajn stavieb (napr. ciest, železníc, budov), testovanie teoretických predpokladov a hypotéz v rámci výskumu správania sa geopriestorových javov (Mitas a Mitsova, 2000). Pre modelovanie zemského povrchu v digitálnom počítačovom prostredí existujú samostatné softvéry. Pretože sú však údaje o reliéfe priamo späté s ostatnými údajmi o krajine, modelovanie reliéfu Zeme sa bežne realizuje v softvérovom prostredí geografických informačných systémov (GIS). Výhodou GIS-ov je poskytnutie komplexnej platformy pre realizáciu viacerých krokov: príprava a vstup dát do modelovania, programovanie, čiastkové geopriestorové operácie a nástroje na modelovanie, analýza a vizualizácia výsledkov.

V predkladanom učebnom texte prezentujeme proces modelovania reliéfu Zeme najmä na príkladoch s využitím GIS softvérov s otvoreným kódom, z angličtiny *open-source GIS*. Tento typ softvéru má totiž viacero výhod z užívateľského hľadiska a to predovšetkým pre jeho voľnú šíriteľnosť a možnosť zasahovať do zdrojového kódu, čím si ho užívateľ môže meniť pre vlastné potreby a rozširovať jeho funkcionality. Softvér s otvoreným kódom je alternatívou komerčným programovým balíkom, ktorých hlavnou nevýhodou je cena a nemožnosť legálne zasahovať do zdrojového kódu bez povolenia držiteľa autorských práv. Zároveň však treba spomenúť, že v rámci vyšších obstarávacích nákladov komerčných balíkov je a podpora pre užívateľov, upgrade softvéru a určité ručenie za funkčnosť softvéru. Naproti tomu softvér s otvoreným kódom vzniká ako produkt nadšencov zväčša z akademickej sféry a jeho používanie je výlučne zodpovednosťou užívateľa. Softvérová podpora existuje, ale je tiež platenou službou. Myšlienka nezávislosti a voľnosti používania softvéru s otvoreným kódom však nadchla milióny užívateľov na celom svete, ktorí sú organizovaní v diskusných fórach pre konkrétny softvér, kde niet núdze o skúsenejších užívateľov ochotných poradiť. Otvorenosť a možnosť modifikácie kódu je atraktívna najmä pre akademické a výskumné účely, pretože tieto vyžadujú riešenia, ktoré nie sú ešte dostupné v komerčných programoch a je teda potrebné ich navrhnúť.

Tak ako je štruktúrovaný tento úvod, je navrhnutá osnova celého predkladaného textu, ktorý je rozčlenený do šiestich hlavných kapitol. Prvá kapitola sa venuje širšiemu kontextu modelovania georeliéfu a vysvetleniu kľúčových pojmov, ktoré sa ďalej v texte používajú. Druhá kapitola opisuje metódy zberu údajov o nadmorskej výške, ktoré sú hlavným zdrojom dát ako vstupov pre samotnú tvorbu digitálnych modelov reliéfu. Tretia kapitola vysvetľuje proces tvorby digitálnych modelov reliéfu so zameraním na rastrové modely vytvárané interpoláciou hodnôt do pravidelnej údajovej mriežky. Štvrtá kapitola objasňuje analýzu geometrie reliéfu pomocou digitálnych modelov, ktorá je objektom geomorfometrie. Základné princípy hodnotenia presnosti a kvality modelov sú vysvetlené v piatej kapitole. Digitálne modely reliéfu možno vytvárať rôznymi softvérovými nástrojmi, ktorých prehľad uvádza šiesta kapitola so zameraním na open-source produkty.

Tab. 1.1: Vplyv georeliéfu na javy a procesy v krajinnej sfére.

javy a procesy ovplyvňované georeliéfom	príklad javu a procesu	vplyvu georeliéfu
<i>fyzikálne vlastnosti zemskeho povrchu</i>	albedo	Drsnosť georeliéfu ovplyvňuje jeho odrazivosť.
<i>tok hmoty a energie</i>	voda, vzduch, ľad, pôda	Hmota sa po povrchu premiestňuje v smere najväčšieho gradientu jeho výšky (najstrmšieho sklonu). Distribúcia tepelnej energie zo Slnka je podmienená orientáciou a sklonom svahov. Zrážkový tieň vzniká v dôsledku prekážky horského hrebeňa vzhľadom na prúdenie vzduchových hmôt.
<i>pohyb</i>	ľudia, živočíchy, skaly	Pri prekonávaní členitého reliéfu má človek a živočíchy preferenciu používať najmenej náročné trasy, napr. po vrstevnici, resp. miernym stúpaním ako po priamej najkratšej trase s najväčším sklonom. Zosuvy vznikajú na naklonenom povrchu, zosúvajúca sa masa, či padajúce skaly sledujú najstrmší sklon.
<i>dizajn stavieb</i>	infraštruktúra	V členitom reliéfe vyžaduje výstavba ciest na niektorých miestach použitie viaduktov, inde zase naopak prerazenie tunelov. Výška antény mobilných operátorov na vežiach a ich dizajn závisí od členitosti georeliéfu a požadovaného šírenia elektromagnetického signálu.
<i>poloha, umiestnenie</i>	lokalizácia infraštruktúry	Výstavba ciest medzi dvomi miestami uprednostňuje vedenie rovinatou krajinou v porovnaní s horskou krajinou. Výber umiestnenia vyhliadkovej veže súvisí s identifikáciou miest s najlepším výhľadom na krajinu, ktoré sú tiež dopravne dostupné.

1.1 Kľúčové pojmy v digitálnom modelovaní reliéfu

Najčastejším zdrojom údajov pre tvorbu digitálnych modelov reliéfu sú merania nadmorskej výšky mapovaného povrchu. Ak sú uložené v digitálnej podobe v počítačovom prostredí možno z týchto údajov vytvoriť súvislý *digitálny výškový model* (DVM). U nás sa tento termín zriedkavejšie používa avšak v medzinárodnej anglickej literatúre je bežným pojmom v preklade *digital elevation model* (DEM). Nadmorská výška je treťou dimenziou priestoru okolo nás a je definovaná ako výška bodu od priemernej morskej hladiny. Hodnoty nadmorskej výšky môžu reprezentovať rôzne typy povrchu. V prípade, že ide o výšky „povrchu, po ktorom chodíme“ resp. povrchu „odkrytej zeme“ hovoríme o digitálnych modeloch reliéfu (DMR), alebo digitálnych modeloch terénu (DMT), čo je aj ekvivalent anglického pojmu *digital terrain model* (DTM). Často je dôležité v digitálnom modelovaní reliéfu pracovať aj s povrchom, ktorého súčasťou sú vrcholky stromov a inej vegetácie, strechy budov a ich steny ako aj ostatné človekom vytvorené objekty na zemskom povrchu. Vtedy hovoríme o digitálnych modeloch povrchu krajinného krytu, alebo zjednodušene o *digitálnych modeloch povrchu* (DMP), z angličtiny *digital surface model* (DSM).

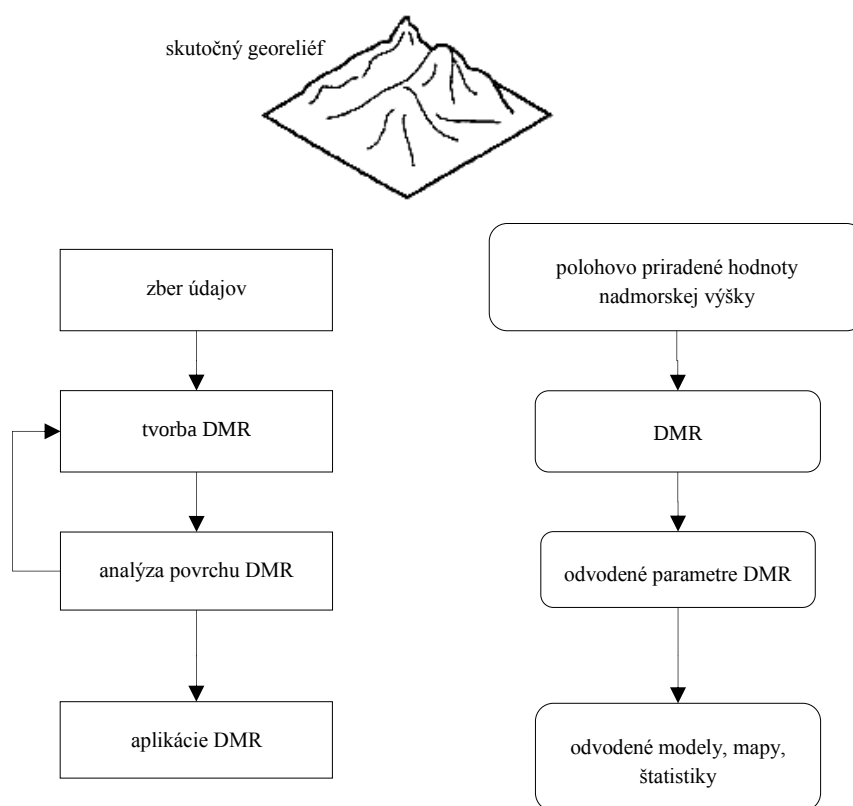
Pre získavanie údajov o nadmorskej výške možno využiť viaceré metódy. Pozemný zber zahŕňa tachymetriu, ako aj meranie pomocou globálnych satelitných navigačných systémov (GNSS). Široké uplatnenie majú metódy diaľkového prieskumu Zeme, ktoré využívajú letecké snímky alebo merania radaru alebo laserového skenovania. Najmä v poslednom období v oblasti DPZ vývoj pokročil smerom k meraniam zachytávajúcim georeliéf vo vysokom rozlíšení a s vysokou presnosťou pre rozľahlé územia. Vstupy pre tvorbu digitálnych modelov reliéfu môžu byť jednoducho a lacno vytvárané vektorizáciou výškopisu topografických máp. Užívatelia si môžu taktiež hotové modely reliéfu zakúpiť ako dátové produkty od komerčných firiem alebo štátnych inštitúcií poskytujúcich priestorové údaje o krajine.

Produkty v podobe výškových dát alebo hotové DMR produkty ponúkané rôznymi firmami alebo inštitúciami takmer vždy vyžadujú nejaký druh spracovania, pričom pre tento účel existuje mnoho rôznych prístupov. V dôsledku tejto rôznorodosti metód získavania a spracovania DMR dát možno očakávať rozdiely v ich geometrických vlastnostiach. Tieto rozdiely sa ďalej prejavujú v aplikáciách DMR a ovplyvňujú rozhodovanie. Napríklad použitie DMR s nízkym priestorovým rozlíšením bude viesť k iným, menej presným, výsledkom modelovania výšky povodňovej hladiny ako v prípade, keď by bol použitý detailnejší a presnejší DMR. DMR navrhnutý a vytvorený pre jeden špecifický účel nemusí vyhovovať pre inú aplikáciu. Pochopenie dôvodov variability DMR údajov a ich tvorby je preto dôležité tak z vedeckého, ako aj z komerčného uhla pohľadu, keďže DMR sú široko používaným dátovým produktom tak v akademickom, súkromnom, ako aj verejnom sektore.

Digitálne modelovanie georeliéfu je zložitý proces zahŕňajúci niekoľko fáz, v ktorých je potrebné rozhodnúť o nastavení vstupných parametrov, resp. požiadavkách na výstupný DMR. Kľúčové faktory ovplyvňujúce rozhodovací proces zahŕňajú: účel použitia; množstvo pracovného času a súvisiace náklady. Tieto tri faktory podmieňujú voľbu: zdroja údajov o nadmorskej výške (napr. fotogrametria, vektorizovaný výškopis máp, laserové skenovanie), údajového modelu DMR (raster, vektor), interpolačnej metódy (napr. splajn, kriging). Faktor konfigurácie georeliéfu, resp. jeho zložitosti, ovplyvňuje voľbu výsledného priestorového rozlíšenia ako aj presnosť merania nadmorských výšok. Týmto spôsobom ovplyvňuje mierku, resp. úroveň detailnosti výsledného DMR nezávisle od rozhodovacieho procesu modelovania, pretože je daný aktuálnym stavom georeliéfu. Odvodenie vhodného DMR je dôležité nielen z hľadiska presnej a teda realistickej reprezentácie nadmorských výšok, ale najmä z dôvodu čo najpresnejšieho modelovania geometrických parametrov georeliéfu ako je sklon svahov, ich orientácia, krivosť, príspevková plocha atď. Tieto parametre sú vstupnými údajmi do modelovania iných, s reliéfom súvisiacich javov a procesov v krajine ako napr. erózia, príkon slnečného

žiarenia, zosúvanie. Preto sú parametre odvodené z DMR často praxou žiadanejšie ako samotný model výšok a požiadavka na ich vierohodnosť je výrazná. Keďže presnosť odvodených parametrov citlivo reaguje na nepresnosti v nadmorských výškach plochy DMR, je dôležité rozumieť faktorom ovplyvňujúcich kvalitu DMR.

Digitálne modelovanie reliéfu zahŕňa sled krokov vedúcich k kvantifikácii vlastností zemského povrchu. Obr. 1.1 schematicky zobrazuje jednotlivé fázy tohto procesu. Počiatočnou fázou je získanie údajov o nadmorskej výške, ktoré sú základným vstupom pre tvorbu DMR. Zber údajov sa uskutočňuje zväčša meraním výšky v bodoch, napr. prostredníctvom fotogrametrie, tachymetrie alebo GNSS, čím získavame polohovo priradené hodnoty nadmorskej výšky v danom kartografickom systéme. Potom nasleduje fáza tvorby DMR, v ktorej z priestorovo nespojitých meraní výšok (diskrétnych bodových polí) vzniká matematicky definovaná súvislá plocha, ktorá predstavuje DMR. Táto fáza zahŕňa voľbu údajového modelu, metód interpolácie, priestorového rozlíšenia a výstupného dátového formátu. Následne, vytvorený DMR vstupuje do fázy analýzy plochy povrchu spravidla zahŕňajúcej odvodenie modelov rozličných geometrických parametrov DMR (napr. sklonitosť svahov, orientácia svahov) alebo objektov (spádnice, údolnice, povodia, geometrické formy, a pod). Táto fáza je hlavným objektom *geomorfometrie* ako vedy o meraní (parametrizácii) zemského povrchu. Odvodené parametre DMR ďalej vstupujú do aplikačnej fázy, kde sú použité pre konkrétne účely výskumu a praxe. Analýza odvodených parametrov reliéfu spravidla poukáže na nedostatky plochy DMR a teda sama môže slúžiť ako nástroj pre opravu a zlepšenie kvality DMR určením falošných singularít alebo iných foriem, neprírodzene extrémnych hodnôt výšok, systematických chýb, oblastí DMR s chýbajúcimi údajmi (dátové diery) atď. Po opravách nedostatkov DMR vzniká finálny model, ktorý môže opätovne vstúpiť do fázy analýzy jeho parametrov a ďalej do aplikačnej fázy.



Obr. 1.1: Hlavné fázy (vľavo) v procese digitálneho modelovania georeliéfu a súvisiace výstupy (vpravo) upravené podľa Hengl a Evans (2008).

Digitálne modelovanie reliéfu má v geovedách a technických vedách silné postavenie a je výskumnou témou vyše 60 rokov. Z historického hľadiska sa táto problematika rozvíja od 50-tych rokov 20. storočia a súvisí so začiatkom éry digitálnych počítačov v rovnakom období. Prvé publikované diela adresujúce tvorbu digitálneho modelu georeliéfu dokumentujú výskum vo fotogrametrickom laboratóriu na Massachusettskom technologickom inštitúte (MIT) v USA (Miller a LaFlamme, 1958). Išlo o vývoj nových metód pre výstavbu diaľnic s využitím fotogrametrie, automatizácie a elektronických digitálnych počítačov. Čoskoro sa problematika DMR začala rozvíjať aj inde vo svete vrátane vtedajšieho Československa. Významným dielom k rozvoju matematických princípov modelovania reliéfu a jeho geometrických parametrov prispel Jozef Krcho (Krcho, 1964, 1987, 1990), dodnes pôsobiaci ako profesor geografie na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave. Profesor Krcho vychoval výraznú generáciu odborníkov, ktorí tvorbu, analýzu a aplikácie DMR ďalej rozvíjajú a pôsobia na rôznych inštitúciách v rámci Slovenska, ako aj vo svete. Spomedzi jeho študentov priamo pôsobiacich v geografickom výskume patria Eva Mičietová, Marián Jenčo, Jozef Minár, Jaroslav Hofierka, Richard Feciskanin a mnohí ďalší. Matematickému modelovaniu georeliéfu sa z medzinárodného hľadiska venovalo viacero autorov. Podobný charakter ako Krcho (1964) majú aj práce Iana A. Evansa z Durhamskej univerzity v Anglicku (napr. Evans, 1972). Existuje množstvo ďalších vedcov a odborníkov, ktorých práce by bolo možné spomenúť.

Napriek širokému spektru výskumných tém súvisiacich s DMR, existuje iba málo komplexných štúdií posudzujúcich metódy mapovania georeliéfu, spracovanie údajov a rozdiely medzi nimi z rôznych uhlov pohľadu. Maune (2001) je pravdepodobne najviac relevantné dielo, ktoré komplexne prevedie užívateľov DMR cez proces digitálneho modelovania reliéfu. Je výsledkom kolektívneho úsilia špecialistov diaľkového prieskumu Zeme. Osobitá pozornosť je v tomto diele venovaná požiadavkám užívateľov s orientáciou na oblasť USA. Ďalšie komplexné publikácie ako Wilson a Gallant (2000), Li et al. (2005) a El-Sheimy et al. (2005) popisujú všeobecné teoretické a aplikačné hľadiská tvorby digitálneho modelovania georeliéfu. Na rôzne aspekty analýzy povrchu DMR, teda geomorfometrie, sa zameriava Hengl a Reuter (2008). Na tvorbe tejto rozsiahlej publikácie sa podieľali autori s cieľom poskytnúť praktickú príručku k príprave DMR pre analýzu povrchu pre aplikácie v klimatológii, poľnohospodárstve, pôdoznalectve, vedách o životnom prostredí a o Zemi.

1.2 Filozofická povaha georeliéfu

Pre správne pochopenie celej problematiky digitálneho modelovania reliéfu Zeme je potrebné vysloviť niekoľko filozofických úvah a zodpovedať základné otázky: Čo presne možno považovať za zemský povrch? Ako vnímame tvar zemského povrchu, čo ho predstavuje a čo nie? Prírodzene v hovorenej reči používame termíny ako zem, terén, topografia, povrch, krajina, povrch krajiny, reliéf, ale možno ich každý chápeme rôznym spôsobom. Obzvlášť pri zdieľaní poznatkov na medzinárodnej úrovni môže byť chápanie pojmov ako terén, reliéf, topografia, DTM, DMR rozdielne a mätúce. Z toho dôvodu je v tejto kapitole objasnená terminológia, ktorá je používaná ďalej v texte.

Všeobecné vnímanie povrchu a povrchu Zeme

Povrch je všeobecne definovaný ako nehmotné rozhranie medzi dvomi objektmi alebo vrstvami materiálu tvoriacich takéto rozhranie. V matematickom ponímaní sa slovo *povrch* používa na označenie $(n-1)$ -rozmernej podmnožiny n -rozmernej množiny (Weisstein, 2009b). Pre objekt v trojrozmernom Euklidovskom priestore to znamená, že jeho povrch je dvojrozmernou množinou bodov určených tromi súradnicami vo zvolenom súradnicovom systéme. Napríklad na telese planéty Zem polohu bodu na povrchu určuje zemepisná dĺžka a šírka. Tretia súradnica (výška) definuje postavenie bodu vo vzťahu k Zemi ako celku, teda trojdimenzionálny priestor, v ktorom existuje Zem.

Povrch objektov je človekom vnímaný vďaka rozdielom vo fyzikálnych a chemických vlastnostiach hmoty tvoriacej daný objekt a jeho okolie. Rozdiely vo vlastnosti materiálov na ich rozhraniach zabezpečujú vnímanie povrchu vyvolané zmenou energetického stavu (napr. voda-vzduch), alebo chemickou reakciou (napr. kryštály soli na jazyku). Z pohľadu zmeny energetického stavu možno na Zemi vymedziť niekoľko rozhraní ako kvapalina-plyn, kvapalina-pevná látka, a plyn-pevná látka (Blair, 2003). Na základe toho možno za zemský povrch považovať rozhranie medzi morom a vzduchom, ľadovcom a vzduchom alebo morským dnom a morom. Mohlo by sa zdať, že povrch je hmotný a možno sa ho dotknúť. V skutočnosti to platí o nositeľovi povrchu, ako to uvádzajú aj Krcho (1973, 1990), Minár (1992), Dikau (1989), Dikau a Schmidt (1999) a Huggett a Cheesman (2002). Táto axióma o nehmotnej povahe povrchu všeobecne bude používaná ďalej v texte.

Zemský povrch bežne chápeme ako pevnú plochu, po ktorej chodíme, čo je vysvetlením slova zem podľa slovníka slovenského jazyka (SLEX, 2015), v angličtine *ground* (COED, 2005). Z toho vyplýva, že ide o povrch pevniny, súše. Pevnou plochou je však aj povrch morského dna, či dna jazera alebo povrch ľadovca. Otázkou teda je, čo presne znamená pevný zemský povrch, alebo čo považujeme za súš. Prirodzene plochu hornín, pôdy alebo zeminy vnímame ako pevný povrch Zeme. Ľad a ľadovce sú pevným skupenstvom vody, avšak z dlhšieho časového hľadiska sú plastické a tečú. Navyše, výtvory rastlinného, živočíšneho alebo ľudského pôvodu pevne spojené so zemou (ako napríklad mraveniská, koralové útesy, budovy, cesty, násypy) sú tiež pevné objekty a ich povrch tak možno považovať za neoddeliteľnú súčasť zemského povrchu. Na Zemi možno identifikovať niekoľko sfér, ktoré sú základom geosférického modelu Zeme. Živé bytosti sú súčasťou biosféry a umelé, človekom vytvorené objekty zaradujeme do technosféry, ktorá je súčasťou antroposféry (Naveh a Libermann 1994, Bastian et al. 2002).

Geosférický model Zeme ako nástroj pre definovanie zemského povrchu

Planéta Zem bola už od čias staroveku vnímaná ako systém skladajúci sa zo súboru interagujúcich koncentrických zón, ktoré sa odlišujú svojim energetickým stavom (skupenstvom), fyzikálnymi, chemickými a mechanickými vlastnosťami. Aristoteles ich vo svojom diele *Meteorologica* pomenoval geosféry. Z jeho myšlienok až do súčasnosti vychádzali mnohí autori, zo súčasných spomenieme práce Naveh a Liebermann (1994), Huggett (1995) a Bastian et al. (2002), v ktorých sa definuje a podrobne opisuje atmosféra, hydrosféra, litosféra, biosféra, pedosféra a antroposféra. Geosféry sú koncentrické vrstvy so stredom v ťažisku Zeme, nemusia byť však nevyhnutne súvislými vrstvami. Zahŕňajú hmotu a energiu konkrétneho stavu, organizácie a prejavu. Geosférický model usporiadania Zeme je vhodný pre definovanie zemského povrchu na základe kritéria rozdielnosti skupenstva (energetického stavu) jednotlivých sfér. Blair (2003) používa termín „earth boundary surfaces“, čo v preklade znamená zemské povrchové rozhrania a definuje ich ako rozhrania medzi dvoma skupenstvami ako atmosféra-litosféra, atmosféra-hydrosféra a litosféra-hydrosféra. Geosféry sú samy o sebe systémami, ktoré zároveň interagujú medzi sebou ako aj s ich okolím (Krcho, 1979). Zóna najintenzívnejšej interakcie sa nazýva geografická sféra, krajinná sféra (Bastian et al., 2002, Krcho, 1979, Mičian a Zatkálík, 1986), alebo geoeekosféra (Huggett, 1995). Trojdimenzionálny výrez krajiny sféry, ktorý zahŕňa jej horný aj dolný okraj, sa nazýva krajina. Plošný rozsah krajiny závisí od mierky skúmania, napr. kontinent, štát, povodie, geotop. Tento filozofický koncept v modernej geografii založil v 19. storočí Alexander von Humboldt (1840), ktorý definoval krajinu ako totálnu percepciu (celkový obraz) určitého územia (Bastian et al., 2002). Humboltove myšlienky boli neskôr rozvinuté v prácach Carla Trolla (Troll, 1939) a jeho nasledovníkov Neefa a Haaseho. Carla Trolla považujeme za zakladateľa krajiny ekológie (geoekológie). U nás túto vednú disciplínu rozvíjali alebo stále rozvíjajú Ľudovít Mičian, František Zatkálík, Jozef Minár, Vladimír Falt'an a iní.

Z pohľadu geografie, krajiny ekológie a geomorfológie je zemský povrch taktiež vnímaný ako osobitá geosféra, ktorá sa v uvedených vedách chápe ako nehmotné a statické rozhranie medzi atmosférou, hydrosférou na jednej strane a litosférou a pedosférou na druhej strane. Statickú povahu georeliéfu treba

vnímať v určitom časovom intervale a priestorovom rozlíšení. Napríklad zemský povrch na svahu sa môže javiť v priebehu jedného dňa ako nehybný avšak v priebehu roka ho deformujú svahové procesy ako zosuvy alebo vodná erózia. Podľa Huggetta (1995) ide skôr o problém definovania geosfér ako takých. V geologických vedách sa napríklad považujú pôdy za nekonsolidovaný sediment (regolit), ktorý je súčasťou litosféry. Naproti tomu v geografických a environmentálnych vedách sú pôdy vnímané ako osobitá sféra Zeme nazývaná pedosféra. Litosféra a pedosféra spoločne s procesmi formujúcimi georeliéf sa v týchto vedných disciplínach označuje ako geomorfosféra (Dikau, 1989, Krcho, 1990, Minár, 1992, Dikau a Schmidt, 1999, Bastian et al., 2002) alebo georeliéfna sféra (Büdel, 1982). Huggett a Chessman (2002) rozšírili chápanie georeliéfu na povrchu všetkých pevných objektov a nazývajú ho toposférou. Podľa Bastian et al. (2002) by mal byť však tento termín určený pre pomenovanie prirodzeného zemského povrchu, ako súčasti geomorfosféry.

Na základe energetického stavu hmoty a geosférického modelu Zeme možno identifikovať niekoľko rozhraní, ktoré možno považovať za zemský povrch (Blair, 2003). Obr. 1.2 zobrazuje rôzne rozhrania medzi geosférami ako sú používané v tomto učebnom texte. Existuje viacero ďalších uhlov pohľadu na definovanie georeliéfu. Táto podkapitola bola venovaná ich vnímaniu najmä v anglosaskej vedeckej literatúre a jej integrácii so slovenskou geografickou školou. V ďalšom texte sú vysvetlené kľúčové typy zemského povrchu ako rozhrania medzi geosférami.

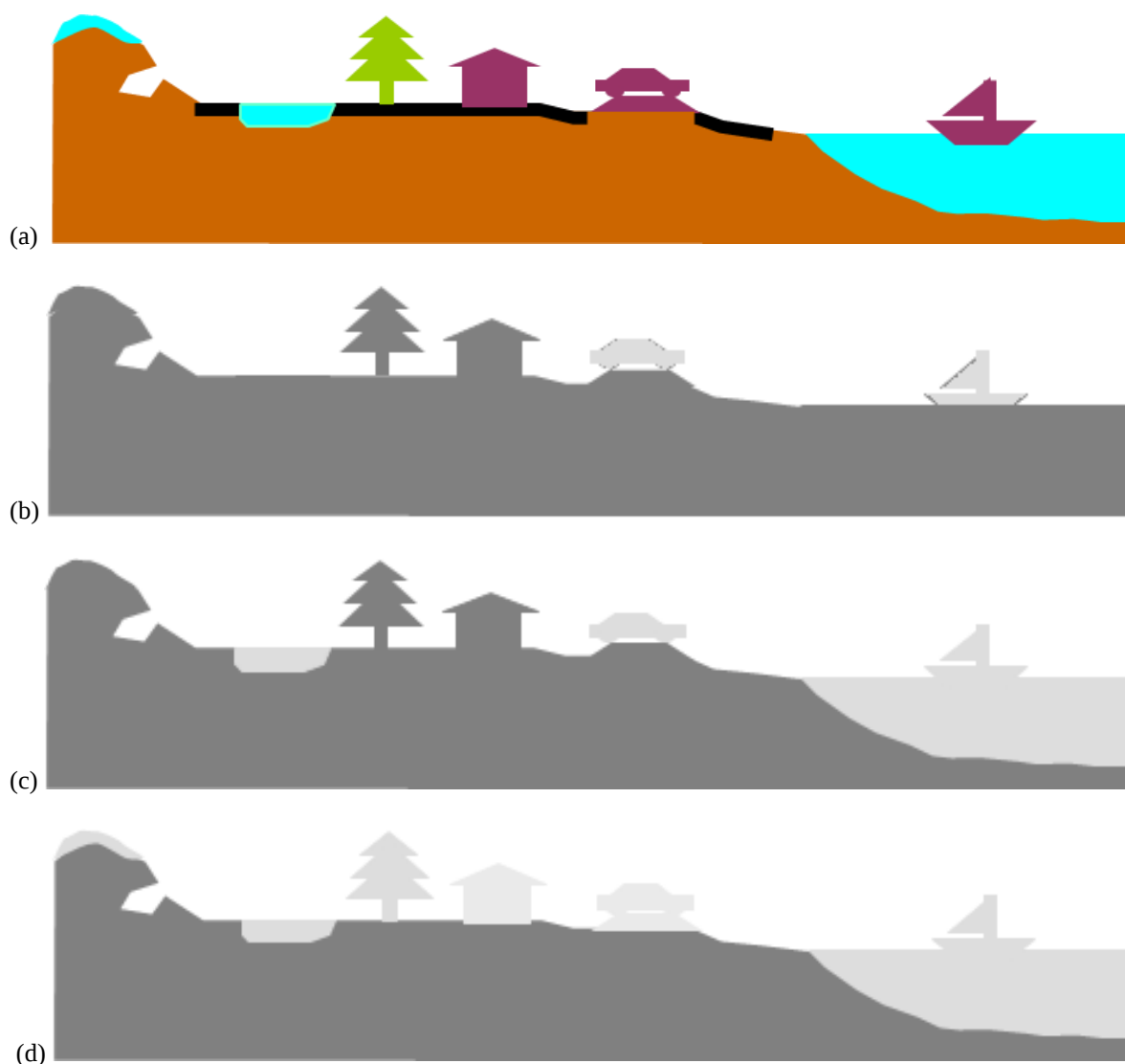
Medzi plynnou atmosférou a tuhou či kvapalnou zemskou hmotu možno rozlíšiť rozhranie, ktoré zahŕňa povrch všetkých pevných predmetov, vody alebo ľadu ako baldachýn. Toto rozhranie existuje medzi atmosférou na jednej strane a hydrosférou, pedosférou, biosférou, a technosférou na druhej strane. Bude označované ako *povrch krajinného krytu* (Obr. 1.2b). V angličtine sa zvykne používať termín „landscape canopy surface“.

Ďalšie rozhranie ako typ zemského povrchu možno určiť medzi pevnými objektmi teda pedosférou, litosférou, biosférou a technosférou na jednej strane a atmosférou a kvapalnou hydrosférou na strane druhej (Obr. 1.2c). Huggett a Chessman (2002) ho nazývajú súhrne „topography“ alebo „topographic surface“. V preklade by išlo o *topografiu* resp. *topografický povrch*, čo sa však u nás za týmto účelom zriedkavo používa. Huggett a Chessman (2002) definujú topografický povrch ako všeobecnú konfiguráciu pevného zemského povrchu, ktorá zahŕňa terén a prirodzené či antropogénne objekty na ňom vrátane povrchu oceánskeho dna. Termín *topografia* je odvodený od gréckeho *topos* - miesto a *graphein* – písať (Jackson et al., 2005). Používa sa na všeobecné označenie miesta alebo polohy objektov s nerovným povrchom napr. kolonická topografia (Yao et al., 2009), topografia planét (Bue a Stepinski, 2006), topografia kovov (Blunt a Jiang, 2003), topografia kryštálov (Lukács a Riesz, 2001). Topografia je chápaná ako synonymum topografického povrchu, teda povrchu pevných objektov (z tuhých látok) na zemskom povrchu, obzvlášť v anglofónnej a frankofónnej komunite (Lexique topographique, 2000).

Rozhranie medzi prírodnými abiotickými pevnými geosférami (pedosféra a litosféra) a tekutými geosférami (atmosféra a hydrosféra) je všeobecne akceptovaným definovaním *georeliéfu* (obr. 1.2d). Je povrchom pevných objektov a hmoty prírodného pôvodu pričom nezahŕňa povrch ľadovej, ľadovcovej a snehovej pokrývky ako aj antropogénnych pevných objektov. Napriek jasnej definícii tohto rozhrania je jeho terminologické pomenovanie nejednotné a nejednoznačné pri porovnaní literárnych zdrojov rôzneho jazykového pôvodu.

Medzinárodne najpoužívanejším termínom je *terén* (Pike, 2002), čo vyplýva z rozšíreného používania anglického a francúzskeho jazyka v odbornej literatúre. Cambridge Advanced Learner's Dictionary (2008) alebo Lexique topographique (2000) charakterizujú terén ako plochu zahŕňajúcu prírodné prvky krajiny. Slovo je odvodené z latinského *terrenus* - zo zeme alebo ako zem. Huggett a Chessman (2002) na základe toho špecifikujú terén ako povrch prírodných fyzických prvkov krajiny (vynímajúc umelé prvky). V regióne Strednej Európy ovplyvnenej nemeckou školou sa namiesto slova terén uprednostňuje odborný termín *relief* alebo *georeliéf* pre výsledok pôsobenia endogénnych a exogénnych síl (Pravda, 2004). Tieto termíny sa na druhej strane neobjavujú v anglofónnej literatúre (Vojtičko et. al, 1998; Pravda, 2004).

V uvedenom význame slova terén nájdeme definíciu georeliéfu napríklad v prácach Krcho (1964, 1990, 2001), Büdel (1982), Kugler (1974), Minár (1992), Dikau (1989), Bastian et al. (2002), Pravda (2004). Používanie slova georeliéf a reliéf by malo byť viazané na prezentovanie vedeckej práce v rámci stredoeurópskej komunity, ktorá im rozumie, pretože pre anglofónnu komunitu ide o zmätočný termín. Huggett (1995) a Jackson et al. (2005) vysvetľujú, že v užšom slova zmysle je „relief“ vyjadrením vertikálneho rozdielu výšok medzi najvyšším a najnižším bodom v regióne (vertikálna členitosť). Hengl a Reuter (2008) preferujú anglický termín *land surface* pre povrch súše a *sea floor topography* alebo *sea floor terrain* pre povrch morského dna. Napriek jasnej definícii georeliéfu ako prírodného, pôvodného povrchu Zeme sa tento termín implicitne vzťahuje aj na vyjadrenie povrchu antropogénnych a biogénnych foriem. Človek, živočíchy a rastliny sú totiž aktívnymi exogénnymi činiteľmi formujúcimi prírodný povrch Zeme a vytvárajú špecifické geomorfologické formy (mraveniská, termitiská, koralové útesy, navážky, úvozy), ktoré sú súčasťou georeliéfu (Krcho, 1979; 1990). Pre jednoznačnosť v ďalšom texte budeme vychádzať z definície georeliéfu podľa Krcho (1990) pre vyjadrenie rozhrania medzi pevnými a tekutými geosférami vrátane biogénnych a antropogénnych foriem.



Obr.1.2 Schematické zobrazenie rôznych rozhraní medzi geosférami. (a) Geosféry sú reprezentované farbami a objektami v schematickom priečno reze krajinou: hnedá - litosféra, čierna - pedosféra, modrá - hydrosféra vrátane vody v pevnom skupenstve, zelená - biosféra, fialová - antroposféra. Na nasledujúcich obrázkoch (b-d), obrys tmavošedej plochy označuje rez povrchom krajinného krytu (b), topografickým povrchom (c), a georeliéfom resp. terénom (d) tak, ako sú používané v tomto učebnom texte.

1.3 Kartografické modely georeliéfu

Všeobecne je výskum zemskeho povrchu a jeho vplyvu na rôzne javy a procesy alebo záujmy človeka realizovaný dvomi odlišnými spôsobmi. Prvým z nich je poznávanie priamym pozorovaním reality. Druhý spôsob zahŕňa inferenciu na základe modelov zemskeho povrchu. Model je vždy zjednodušením reality, teda je menej komplexný ale o to ľahšie zrozumiteľný. Modelovanie zemskeho povrchu je procesom vytvárania rozličných zjednodušených foriem reprezentácie skutočného povrchu

Verné znázornenie povrchu Zeme bolo vždy výzvou a je rovnako staré ako sama civilizácia. Jaskynné maľby možno považovať za príklad najstarších topografických modelov prehistorických ľudí, ktorí znázorňovali základnú tvár krajiny. Využitie tohto druhu modelov pre orientáciu a meranie v rámci zobrazeného regiónu je obmedzené vzhľadom na nízku geometrickú presnosť (Li, 2008). Postupný vývoj meračskej techniky už od staroveku znamenal zvýšenie kvality reprezentácie krajiny vo forme mapy, v ktorej sa používali symbolické a obrázkové znaky (Li et al., 2005). Mapy sú dodnes široko používaným modelom zemskeho povrchu krajiny a teda aj zemskeho povrchu, hoci kartografické metódy reprezentácie krajiny a technológie výroby máp sú omnoho sofistikovanejšie. Výrazné zlepšenie kartografického znázorňovania georeliéfu nastalo v druhej polovici 19. storočia (Hojovec et al., 1987, Thrower, 2007), keď sa začali používať rôzne spôsoby tieňovania a neskôr sa prešlo na vrstevnice (isohypsy). Vrstevnice sú doposiaľ najvyužívanejšou formou, pretože vyjadrujú nielen tvar, ale priamo tiež nadmorskú výšku ako kvantitatívny parameter. Niektoré príklady znázornenia georeliéfu predstavuje Obr. 1.3. Mapy alebo rezy georeliéfom sú dvojrozmernými (2D) ortogonálnymi priemetmi georeliéfu do roviny. Účelné sú však aj blokdiagramy ako dvojrozmerné perspektívne (šikmé) pohľady na výrez georeliéfu. Metóda má exaktné matematické základy a vychádza z deskriptívnej geometrie. Využíva sa predovšetkým v geológii a geomorfológii. Veľmi pútavou formou sú skutočné trojrozmerné (3D) modely georeliéfu. Zvyčajne sú zhotovené z hliny, gumy alebo plastu (Obr. 1.4a). Oficiálna stránka Ústavu kartografie a geoinformatiky ETH Zürich (<http://www.terrainmodels.com>) alebo stránka Solid Terrain Modelling (<http://www.stm-usa.com/>) uvádzajú príklady a podrobnosti o histórii, aplikácii a spôsobe výroby týchto analógových 3D modelov. Moderné technológie skenovania a premietacej techniky v kombinácii s modifikovateľnými 3D modelmi vyrobenými z modifikovateľných materiálov ako piesok alebo plastelína umožňujú v reálnom čase interaktívne meniť tvar 3D modelov a premietat' na ne ich parametre (Mitasova et al. 2006). Trojrozmerný priestorový vnem z 2D obrazov reliéfu možno získať pomocou anaglyfových máp (Obr. 1.4b), lentikulárnych máp alebo hologramov.

Modely georeliéfu môžu byť klasifikované z rôznych uhlov pohľadu. Chorley a Haggett (1969) a Demek (1987) prezentujú rozsiahlu charakteristiku modelov vo vzťahu ku geografii. Najvšeobecnejším kritériom je prostriedok reprezentácie reality. Myšlienková konštrukcia v mysli človeka vytvorená na základe jeho vedomostí alebo skúseností spojená s reálnym objektom alebo situáciou sa nazýva *konceptuálny model* (Li et al. 2005). Vyjadriť ho možno slovným opisom ako na Obr. 1.3b. Materiálna reprezentácia geometricky proporcionálna a podobná reálnemu objektu je jeho *fyzikálnym modelom* (napr. Obr. 1.4a). Reálny tvar georeliéfu môže byť modelovaný aj matematickými prostriedkami ako teória, sada čísiel, rovníc, funkcií a pod. Uvedené sú príkladmi *matematických modelov* (Obr. 1.3f).

Iným uhlom pohľadu na modely georeliéfu je forma údajovej reprezentácie modelov a údajov z nich odvodených. *Analógové údaje a modely* sú reprezentované hodnotami spojitá sa meniacej fyzikálnej veličiny. Príkladom je plastický 3D model, tlačená mapa alebo letecká snímka, pretože jej existencia je materiálna a spojitá v čase a priestore (Obr.1.3a, c-e, 1.4a). Analógové modely obsahujú istú dávku podobnosti s reálnym objektom preto fyzikálne modely spomenuté vyššie možno považovať za formu analógových modelov (Li et al., 2005). V podobnom duchu, hárok papiera so zápisom trojice súradníc reprezentujúcich body na povrchu georeliéfu je analógovou formou numerického modelu reliéfu. Papier je fyzikálna forma hmoty hoci zapísané údaje sú diskretným (nespojitém) vyjadrením georeliéfu pomocou čísiel (angl. digits). *Digitálne údaje a modely* sú vyjadrené formou diskretných hodnôt fyzikálnej veličiny. Koreňové slovo *digit* pochádza z latinčiny a znamená prst, ako diskretná jednotka



(a)

Exhumovaná výplň
vulkanického komína
vystupujúca ako
samostatný vrch z okolitej
roviny.

(b)



(c)



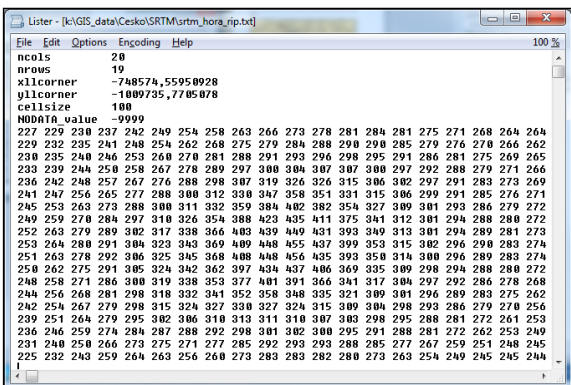
(d)



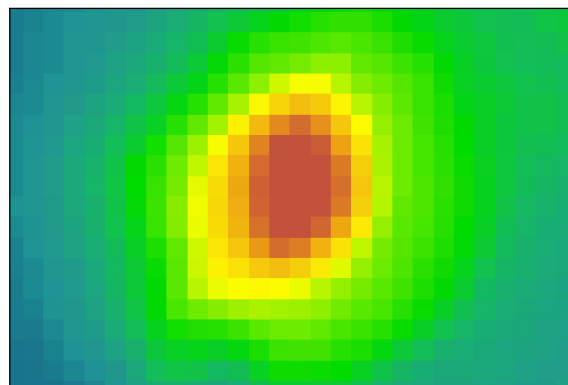
(e)



(f)



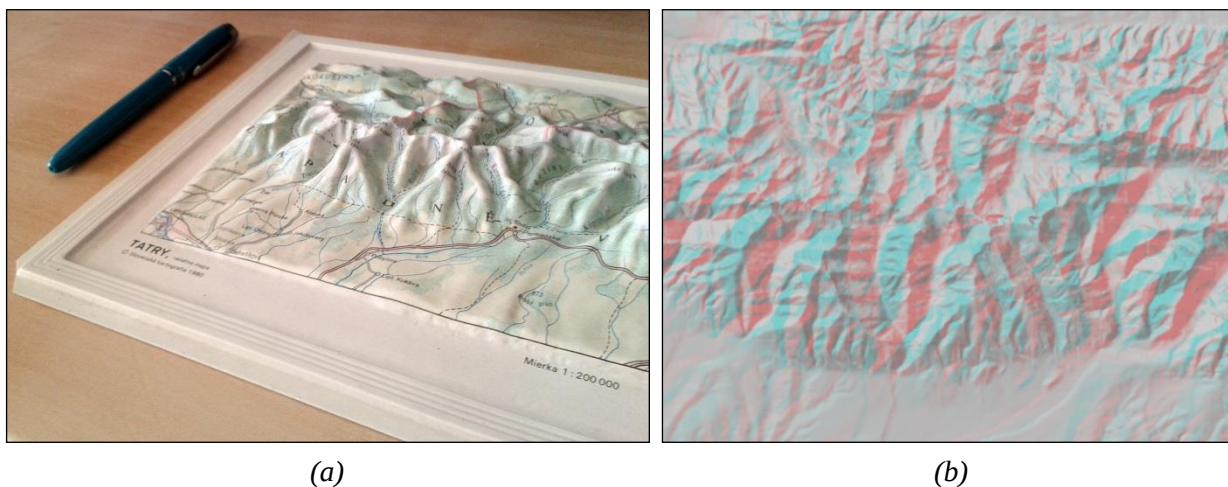
(g)



(h)

c - ©Historický ústav AV ČR - <http://www.hiu.cas.cz>, d - © 1. a 2. vojenské mapovanie, Rakúsky štátny archív / Vojenský archív, Viedeň, © Laborař geoinformatiky Univerzita J.E. Purkyně - <http://www.geolab.cz>, ©Ministerstvo životního prostředí ČR - <http://www.env.cz>, e - © 2007 Intergraph ČR, spol. s r.o., © ČÚZK - <http://geoportal.cuzk.cz/wmsportal/>, f - © Google, image © GEODIS Brno, © GeoContent, © TerraMetrics

Obr. 1.3: Rozličné reprezentácie georeliéfu hory Říp v Českej republike. Fotografia (a) predstavuje skutočný pohľad na horu Říp a sama o sebe je analógovým modelom povrchu. Kvalitatívna textová charakteristika hory je jej konceptuálnym modelom (b). Topografická mapa je ďalším príkladom analógového modelu. Müllerova mapa Českých zemí z roku 1720 (c) znázorňuje georeliéf obrázkovou formou ako bočný pohľad na horu bez vzťahu k mierke mapy. Neskôr počas prvého vojenského mapovania v 60-tych rokoch 18. storočia (d) bola hora znázornená ortogonálnym priemetom do roviny proporcionálne k mierke mapy a jej reliéf vyjadrený rozličnou hustotou šrafáže v závislosti od sklonu svahu. Moderné mapy používajú vrstevnice a oveľa presnejšiu projekciu zemského povrchu do roviny (e). Perspektívny pohľad na horu Říp (f) je zobrazením digitálneho modelu reliéfu (DMR) s naloženou ortofotosnímkou. Tento model je digitálnou reprezentáciou reliéfu, ktorá je v pamäti počítača zapísaná v textovom formáte formou dvojdimenzionálnej matice hodnôt nadmorských výšok (g). Ide o rastrový údajový formát, v ktorom majú hodnoty výšok v štvorcovej sieti pravidelný rozstup 100x100 metrov. Dvojdimenzionálne DMR zobrazenie v spojitý farebnej škále je (h).



Obr. 1.4: Ukážka plastickej reliéfnej mapy Tatier (a) a anaglyfovej mapy toho istého územia (b). Anaglyf možno vnímať trojdimenzionálne použitím okuliarov s červeným a modrým sklíčkom.

najjednoduchšej formy počítania pomocou prstov na ruke. V širšom slov zmysle sú všetky znaky ako slová, čísla alebo Morseov kód digitálnymi reprezentáciami údajov. V modernej dobe prívlastok 'digitálny' vyjadruje binárnu údajovú reprezentáciu sekvenciou dvoch logických hodnôt 1 a 0. Tieto hodnoty stotožňujú existenciu (1) alebo neexistenciu (0) elektrického pulzu v polovodičových obvodoch. Týmto spôsobom možno zakódovať, spracovať a uchovávať tak spojité ako aj diskrétné údaje digitálne v počítači alebo úložiskovom médiu. Údaje obsiahnuté na analógovom nosiči (magnetofónová páska, dierkový štítok, papierová mapa) ako zoznam nadmorských výšok a ich polohových súradníc môžu byť teda konvertované na digitálne údaje a z nich môže byť v procese odvodený digitálny model georeliéfu. Proces konverzie analógových údajov na digitálne (binárne) sa nazýva digitalizácia.

1.4 Vyjadrenie tvaru georeliéfu

Georeliéf ako plocha má istý tvar, teda geometrickú štruktúru, ktorú možno vydať rôznymi kvantitatívnymi alebo kvalitatívnymi parametrami. Meraním alebo určením týchto parametrov možno získať údaje, z ktorých sa dá vytvoriť digitálny model reliéfu. Cez príklady reprezentácie zemského povrchu na Obr. 1.3 možno rôznym spôsobom vnímať tvar reliéfu. *Kvalitatívne* (opisné) *parametre* poskytujú všeobecnú informáciu o genéze konkrétneho reliéfu (sopečný kužeľ, ľadovcové údolie), krajinej pokrývky (ľadovec, cesty, budovy, les), fyziografii (planina, vrchovina, rokľina) (Li et al., 2005). Takéto parametre možno využiť pre všeobecné plánovanie alebo výskum. *Kvantitatívne parametre* presnejšie a jednoznačnejšie opisujú zemský povrch, pretože vyjadrujú jeho tvar číselnými a merateľnými

údajmi. Nazývajú sa tiež *geomorfomterické parametre*. Veda zaoberajúca sa kvantitatívnou analýzou tvaru reliéfu a modelovaním jeho parametrov sa nazýva *geomorfometria* (Evans, 1972, Krcho, 1973, Pike, 2002, Hengl a Reuter, 2008). Z hľadiska modelovania zemského povrchu je primárnym a najdôležitejším parametrom výška povrchu (angl. elevation, altitude). Určuje sa ako zvislá vzdialenosť medzi bodom a referenčným povrchom, ktorým je priemerná hladina svetového oceánu aproximujúca ekvipotencionálnu plochu gravitačného poľa Zeme. Z toho dôvodu sa nazýva nadmorská výška. Všetky ostatné morfometrické parametre zemského povrchu môžu byť odvodené z hodnôt výšky v bodoch a jej rozdielov vzhľadom na iné body v priestore ako napríklad uhol sklonu svahu, orientácia svahu, krivosti spádnic, dĺžka svahu. Existujú aj komplexnejšie parametre ako spektrálna frekvencia alebo fraktálna dimenzia zemského povrchu (Li et al., 2005). Nadmorská výška je však jednoducho merateľným a v priestore lokalizovateľným parametrom, ktorý možno zároveň jednoducho spracovať a použiť pre modelovanie reliéfu.

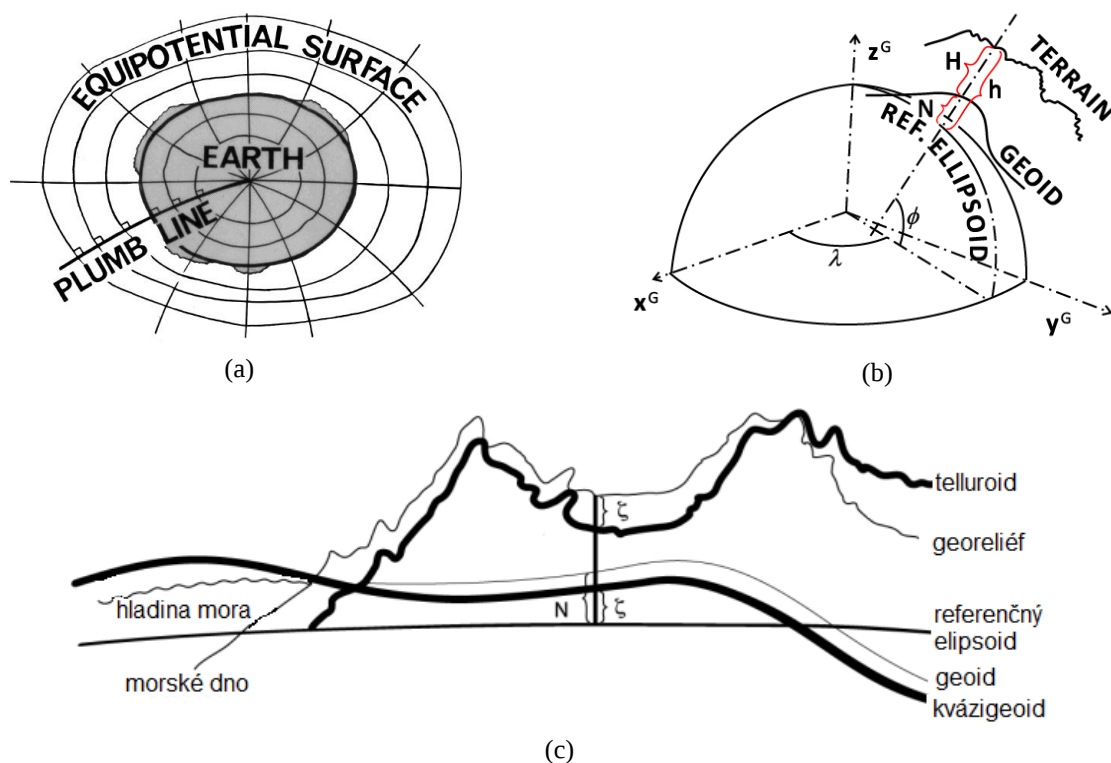
1.5 Súradnicové systémy a nadmorská výška

Georeliéf je dvojrozmernou zakrivenou plochou v trojrozmernom priestore. Určovanie polohy bodu na ploche georeliéfu sa vykonáva meraním polohy bodu v trojrozmernom referenčnom súradnicovom systéme. Referenčný systém môže byť definovaný viacerými spôsobmi, pričom je podstatné definovať pevným bodom určujúci počiatok systému so súradnicami $[0,0,0]$, ďalej orientáciu troch osí prechádzajúcich týmto pevným bodom a mernými jednotkami používanými pre meranie. V prípade geocentrických súradnicových systémov je referenčným (počiatočným) bodom ťažisko Zeme (gravitačné centrum), ktoré sa stotožňuje so stredom referenčného telesa. V prípade lokálnych systémov pre jednotlivé krajiny a menšie územia môže byť referenčný bod pre určenie polohy na ploche určený inak. V trojrozmernom súradnicovom systéme je potrebné merať tri súradnice $[x, y, z]$ ako vzdialenosti bodu od počiatku systému pozdĺž jeho osí. Takto definovaný súradnicový systém sa nazýva *karteziánsky systém*. Napríklad merania pomocou globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS) sú realizované v karteziánskych súradniciach. V praxi sa tieto hodnoty prepočítavajú na uhlové súradnice určené v polárnom systéme ako uhly merané od nulte rovnobežky (*zemepisná šírka*) a od nultého poludníka (*zemepisná dĺžka*). Trojrozmerný referenčný systém definovaný pre meranie na Zemi sa nazýva *geodetický referenčný systém* (angl. geodetic datum). Má horizontálnu zložku určujúcu polohu bodu na ploche referenčného telesa a vertikálnu zložku, ktorou sa definuje výška bodu nad referenčnou plochou. *Horizontálna zložka* (angl. horizontal datum) je definovaná východným referenčným bodom pre určovanie polohy na ploche referenčného telesa. *Vertikálna zložka* geodetického súradnicového systému (angl. vertical datum) je definovaná ako jednorozmerný systém skalárnych hodnôt výšok stanovených od nulovej referenčnej plochy.

Povrch zemského telesa je zložitý a pre účely merania ho možno iba aproximovať jednoduchšími telesami. Základom pre vyjadrenie zjednodušenej reprezentácie zemského povrchu je *geoid* (Listing, 1873). Plocha geoidu je totožná s ekvipotenciálnou plochou gravitačného (ťažového) poľa Zeme, ktorú označujeme W_0 a je ňou stanovená nulová hladina nadmorskej výšky. Hlavnou vlastnosťou geoidu je, že ťažnica (zvislica) je kdekoľvek na Zemi kolmá na plochu geoidu (Obr. 1.5a), vďaka čomu možno merania výšok vzhľadom na geoid použiť globálne. Ploche geoidu sa najlepšie približuje globálna stredná hladina oceánov a morí predĺžená popod súš. Pokiaľ by bola Zem homogénnym telesom, jej gravitačná hladinová plocha by dokonale kopírovala tvar telesa Zeme. Zem je však materiálovo nehomogénna a rozloženie hustoty hmoty pod zemským povrchom nepoznáme. Z toho dôvodu je presný výpočet geoidu nemožný a zároveň je zložitý geoid matematicky definovať. Geoid sa pre meracie (geodetické) a mapovacie (kartografické) účely aproximuje jednoduchším telesom, ktorým je *rotačný elipsoid*. Matematicky ho možno vyjadriť definovaním rozmeru polosí a ich orientácie. Ak by bola Zem hustotne homogénna a tekutá, jej tvar by zodpovedal rotačnému elipsoidu s osou rotácie stotožnenou s rotačnou osou Zeme prechádzajúcou jej pólmi. Parametre elipsoidu možno definovať rôznymi spôsobmi tak, aby čo najlepšie vyhovovali mapovaniu zvoleného územia. Pre globálne účely je definovaný elipsoid

WGS1984 resp. WGS84 (World Geodetic System 1984), ktorý je geocentrický a používa sa pre určovanie polohy pomocou amerického globálneho satelitného navigačného systému GPS. Pre regionálne účely je dôležitým parametrom elipsoidu určenie *referenčného bodu elipsoidu*. Je to miesto na zemskom povrchu, ktorým je vedená ťažnica na geoid, ktorá je zároveň totožná s normálou referenčného telesa pri definovaných parametroch elipsoidu (rozmery polosí a ich orientácia). Napríklad pre územie Ruska je použitý Krasovského elipsoid s referenčným bodom elipsoidu prechádzajúcim hviezdárňou v Pulkove, pre Nemecko je použitý Besselov elipsoid s referenčným bodom elipsoidu prechádzajúcim Helmer Hurn a pod.

V kartografii sa pre *zobrazovanie polohy objektov* geoid nahrádza jednoduchšími referenčnými plochami, ktoré vystihujú jeho tvar a používajú sa na premietanie objektov. Ide už o spomenutý *rotačný elipsoid*, ďalej o *sféroid* (guľu) a *rovinu*. Všetky plochy využiteľné na zobrazovanie povrchu Zeme sú konštruované v závislosti od tvaru, polohy a veľkosti zobrazovaného územia, ako aj od účelu mapovania, pričom hlavným zmyslom ich zavedenia je možnosť vyjadriť ich matematickými funkciami (analyticky). Pre rozsiahle územia ako veľké regióny, kontinenty alebo celá Zem sa používa rotačný elipsoid. Sféroid (referenčná guľa) sa používa pre menšie územia s polomerom do niekoľkých stoviek kilometrov. Napríklad sféroid bol použitý v Křovákovom zobrazení pre premietnutie územia Československa z Besselovho elipsoidu. Zo sféroidu sa územie premietlo na kužeľ, ktorého plochu možno rozvinúť do roviny. Na rovinnej ploche je potom definovaný národný projekčný súradnicový systém Česka a Slovenska, ktorý sa nazýva Systém jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK). Pomyselný počiatok sa nachádza vo Fínskom zálive medzi Helsinkami a Talinom, pretože tento bod bol určený ako vrchol kužeľa. Vzhľadom na tento bod sa u nás určujú karteziánske súradnice $[x, y]$. Môžu nadobúdať kladné hodnoty v ľavotočivej súradnicovej sústave alebo záporné hodnoty v pravotočivej sústave, ktorá sa používa v geografických informačných systémoch (GIS). Pre zobrazenie ešte menších území s rozsahom do niekoľkých stoviek štvorcových kilometrov sa používa referenčná rovina, kde zakrivenie Zeme nie je brané do úvahy. Pre praktické určenie výšky v nejakom bode musí byť známa poloha strednej hladiny mora pod kontinentmi vzhľadom na určovaný bod.



Obr. 1.5: Ekvipotenciálne plochy gravitačného poľa Zeme zobrazené v priečnom reze zemou (a) a ich vzťah k výške georeliéfu nad geoidom a elipsoidom (b, c). Olovnica (plumb line) je vždy kolmá na ekvipotenciálne plochy. Upravené podľa Vaniček et al. (2012).

Priemerná hladina mora sa veľmi približuje k ploche s konštantným gravitačným potenciálom W_0 , ktorej vyjadrením je geoid. Hoci stredná hladina mora sa od priebehu skutočnej ekvipotenciálnej plochy geoidu odchyľuje v rozsahu do 2 m, určovať výšku vzhľadom na hladinu mora je zmysluplným konceptom. Gravitačné pole Zeme v ňom hrá veľmi dôležitú úlohu pri praktickom určovaní výšky. Taktiež geodetické prístroje sú pri meraní libelami zosúladené s miestnym tiažovým vektorom (zvislicou) smerujúcim kolmo na ekvipotenciálne plochy gravitačného poľa.

Nadmorská výška meraná pozdĺž zvislice, ktorá je kolmá na povrch geoidu a smeruje do ťažiska Zeme, sa nazýva *ortometrická výška* (H). Takto určená výška je dĺžkou dotýčnice k tiažovému vektoru medzi geoidom a meraným bodom. Vertikálna vzdialenosť bodu meraná v smere normály na plochu referenčného elipsoidu sa nazýva *elipsoidická výška* alebo aj *geodetická výška* (h). GNSS prijímače udávajú elipsoidickú výšku vzhľadom na elipsoid WGS1984. Pre určenie ortometrickej výšky je potrebné poznať rozdiel medzi výškou geoidu nad plochou elipsoidu (N) pozdĺž normály ku elipsoidu. Tento rozdiel sa tiež nazýva výškou geoidu (angl. geoid undulation, Obr. 1.5b, c). Odčítaním výšky geoidu (N) od elipsoidickej výšky meraného bodu (h) získame ortometrickú výšku (H). Keďže gravitačné zrýchlenie nie je na Zemi konštantné pre rôznorodú hustotu zemského telesa, na veľké vzdialenosti sa prejavujú rozdiely v určení ortometrickej výšky v rámci tej istej úrovne (napr. 1000 m n.m.) a táto výška musí byť korigovaná. Napríklad, gravitačné zrýchlenie je na severe USA o 0,1% vyššie ako na juhu krajiny. Bod v ortometrickej výške 1000 m n.m. v Montane bude mať v Texase 1001 m n.m. Pre praktické a presné aplikácie na veľké vzdialenosti musí byť použitý model gravitačného potenciálu Zeme, z ktorého možno odvodiť model geoidu.

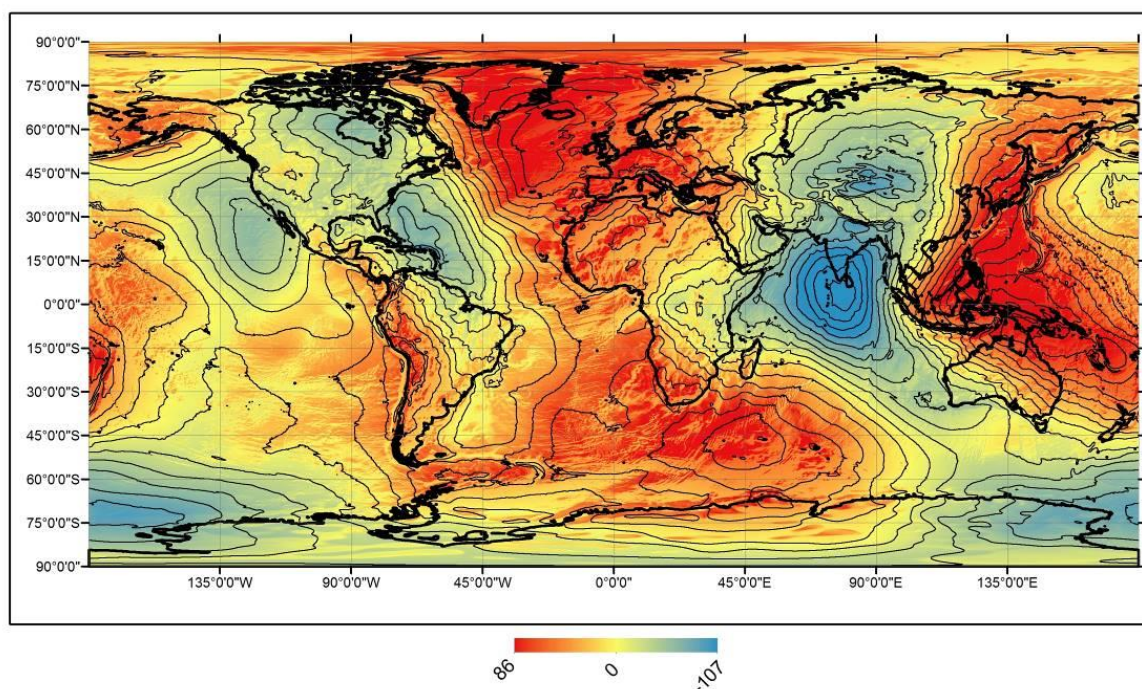
Pre výpočet ortometrickej výšky H je potrebné poznať strednú hodnotu gravitačného zrýchlenia pozdĺž ťažnice medzi zemským povrchom a geoidom. Zmerať gravitačné zrýchlenie vo vnútri Zeme nie je možné, preto sa určuje pomocou matematických aproximácií. Pre ich výpočet je treba poznať rozloženie hustoty hmoty medzi povrchom a geoidom, čo sa určuje veľmi náročne. Donedávna bolo zložité modelovať plochu geoidu pomocou pozemných meraní s požadovanou presnosťou. V období po II. svetovej vojne preto predstavil ruský geodet Molodenskij (Molodenskij et al., 1960) novú koncepciu riešenia tvaru Zeme za účelom merania nadmorskej výšky. Vychádzal z teórie určovania výšok na základe povrchových nivelačných a tiažových meraní bez nutnosti použitia hypotéz a rozložení hustoty hmoty v zemskom telese. Molodenského úvaha viedla k využitiu hodnôt, ktoré možno odmerať priamo na zemskom povrchu a to je *normálna výška* (H_N) a *výšková anomália* (ζ) (Obr. 1.5c). Ich súčet vyjadruje elipsoidickú výšku h . Výškové anomálie zodpovedajú rozdielom výšok zemského povrchu od plochy telluroidu meraných pozdĺž normály k ploche referenčného elipsoidu. *Telluroid* je telesom s plochou podobnou ploche georeliéfu avšak posunutou smerom dovnútra Zeme o hodnoty výškových anomálií (ζ). Toto teleso nemá fyzikálny význam, ale je určiteľné z tiažových meraní na povrchu Zeme. Molodenskij využil výškové anomálie pre konštrukciu *kvázigeoidu*, ktorý je plochou výškových anomálií (ζ). Kvázigeoid nevyjadruje gravitačnú ekvipotenciálnu plochu a nemá teda fyzikálne vyjadrenie. Je však veľmi podobný geoidu, pričom na hladine morí a oceánov je plocha kvázigeoidu totožná s geoidom. Vo vysokých pohoriach môžu byť rozdiely medzi obidvomi plochami do 1,5 m (Vaníček et al., 2012). *Normálna výška* je definovaná pre bod na georeliéfe ako vzdialenosť medzi zodpovedajúcim bodom na telluroide a referenčným elipsoidom meraná pozdĺž normály k ploche elipsoidu. Normálna výška je ekvivalentná výške bodu na georeliéfe meraná ako vzdialenosť medzi týmto bodom a kvázigeoidom pozdĺž normály na plochu kvázigeoidu. Vzájomný vzťah medzi rôznymi typmi výšok podľa spôsobu ich merania znázorňuje Obr. 1.5b. Vzhľadom na uvedené výškové rozdiely medzi geoidom a kvázigeoidom sa ortometrické a normálne výšky najviac odchyľujú vo vysokých pohoriach a to o približne 1,5 m. Výškový systém založený na určovaní normálnych výšok zaviedli začiatkom druhej polovice 20. storočia krajiny Sovietskeho zväzu a tiež Francúzsko, Nemecko, Švédsko, Poľsko, Československo, Maďarsko, Rumunsko a Bulharsko (Vaníček et al., 2012). Detailné prepočty medzi ortometrickými, normálnymi a elipsoidickými výškami uvádza Sedlák (1997).

Dlhodobé, početné a presné pozemné a letecké gravimetrické merania ako aj merania parametrov obežných dráh družíc umožnili spresnenie tvaru geoidu a vytvorenie jeho globálneho modelu s vysokou presnosťou. Pre vyjadrenie geoidu sa v súčasnosti používa digitálny model gravitačného potenciálu Zeme, tzv. Earth Gravity Model 2008 (EGM2008), (Pavlis et al., 2012). Výšky geoidu vzhľadom na elipsoid WGS1984 odvodené z údajov EGM2008 sú zobrazené na Obr. 1.6.

Pre vyjadrenie nadmorských výšok v národných súradnicových systémoch jednotlivých krajín sa používajú rôzne výškové systémy (nulové výškové body), ktoré sú odvodené z dlhodobých meraní výšok rôznych hladín morí (Augath and Ihde, 2002). Stredné hladiny svetových morí určované na týchto miestach však nie sú na rovnakej hladinovej ploche a predstavujú lokálne aproximácie geoidu v danom mieste. Príčinou je pôsobenie slapových javov, zmeny atmosférického tlaku, prevládajúceho smeru vetra, teploty a salinity vody, v dôsledku čoho sa miestne stredné hladiny morí odchyľujú od plochy geoidu. Napríklad výškový rozdiel medzi strednou hladinou mora v Kronštade a Terste je -0,40 m.

Pre územie Slovenska sa od prvého presného nivelačného merania prebiehajúceho v druhej polovici 19. storočia na území vtedajšieho Rakúska-Uhorska za nulový bod výškového systému používala stredná hladina Jadranského mora v Terste. Následne vzniknutý tzv. Jadranský výškový systém sa používal aj v Československu až do druhej svetovej vojny. Československo sa zanedlho stalo súčasťou východného bloku, v ktorom padlo rozhodnutie zjednotiť geodetické výškové systémy vo všetkých štátoch bloku. Československo tak postupne prešlo na nový výškový systém, v ktorom sa ako nulový referenčný bod používal vodočet v meste Kronštadt na ostrove Kotlin v Baltskom mori pri Sankt Peterburgu.

Od roku 1952 sa tak v Československu začalo prechádzať na baltský systém. Výškový vzťah medzi Jadranským a Baltským systémom sa určil predbežnou hodnotou 46 cm, ktorá sa odčítala od hodnôt výšok určených v jadranskom výškovom systéme (odtiaľ označenie B46). Od roku 1957 bol oficiálne zavedený systém "Baltský po vyrovnaní" (B.p.v.), ktorý bol založený na meraní normálnej (Molodenského) výšky vzhľadom na kvázigeoid. Predtým však bolo nutné vykonať zložité prepočty ortometrických nadmorských výšok štátnej nivelačnej siete, teda jej vyrovnanie. Podrobnosti uvádza napríklad Hojovec et al. (1987). V systéme B.p.v. sa majú vykonávať všetky výpočty výšok bodov, i keď pri stavebno-technických prácach lokálneho významu volíme niekedy miestny výškový systém. Rozdiel výšok medzi jadranským výškovým systémom a B.p.v. je -40 cm.

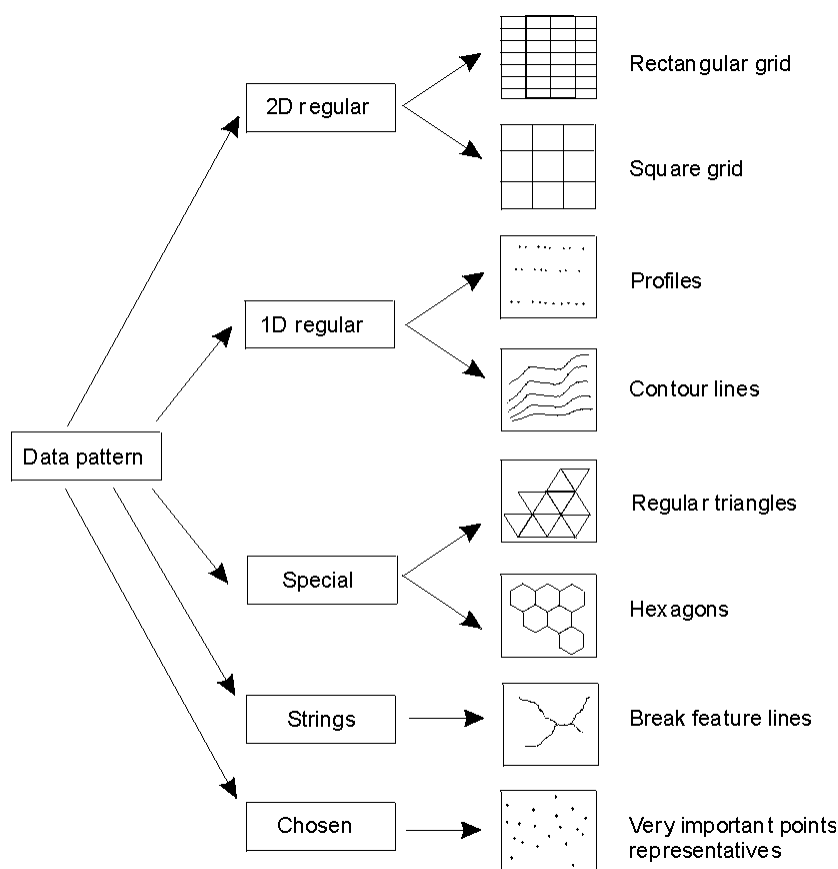


Obr. 3.2: Výška geoidu nad referenčným elipsoidom WGS1984 vyjadrená v metroch (interval izolínií 10 m) určená na základe gravimetrického modelu EGM 2008 (Pavlis et al. 2008).

Rozdiely výškových systémov medzi jednotlivými krajinami boli hlavným faktorom budovania kontinentálnych a globálnych vertikálnych referenčných systémov. V Európe prebieha od 70. rokov 20. storočia spoločné úsilie zaviesť a používať jednotný nivelačný systém odvodený od referenčného bodu na pobreží Severného mora v Amsterdame (Augath a Ihde, 2002). Koncepcia rozvoja nových geodetických základov Slovenska do roku 2005 predpokladá vyrovnanie štátnej nivelačnej siete v Amsterdamskom výškovom systéme, ktorý sa vzťahuje na hladinu Severného mora. Amsterdamský výškový systém (EUVN 2000) zmení výšky B.p.v v priemere o +0,15 m. Rozdiel výšok bude premenlivý v rozsahu +0,11 m až +0,19m pre územie SR.

1.6 Mierka a úroveň podrobnosti

Miera podrobnosti, ktorou model zemského povrchu zachytáva jeho skutočný stav, súvisí s priestorovou hustotou merania nadmorských výšok (angl. sampling) a presnosťou merania (Li et al. 2005). Súbor bodov s určenou nadmorskou výškou v súradnicovom systéme označujeme ako *bodové pole nadmorských výšok*. Obr. 1.7 zobrazuje príklady rôznych stratégií pre rozmiestnenie meracích bodov, ktorých voľba súvisí s priestorovou variabilitou zemského povrchu. Zatiaľ čo niekoľko bodov postačuje pre reprezentáciu charakteru plochého povrchu, hustejšie meranie je potrebné pre zaznamenanie variability nadmorskej výšky komplexnejšieho povrchu ako sú pohoria. Vernosť modelu povrchu je presnejšia pokiaľ sú použité presnejšie metódy merania v porovnaní s menej presnými metódami pri rovnakom bodovom poli. Z praktického hľadiska nemožno mapovať zemský povrch tak, aby sme zachytili každú nerovnosť či mikroformu. Hovoríme, že charakter reliéfu je mierko závislý (angl. scale-dependent), čomu sa bližšie venuje Atkinson a Tate (2000). Určovaním výšok iba v niektorých bodoch reality dochádza k strate informácie o nej. Modelom potom vyjadrujeme iba redukovanú časť reálneho povrchu, ktorú pri zvolenom spôsobe a hustote mapovania (mierke) môžeme zachytiť (Obr. 1.8).



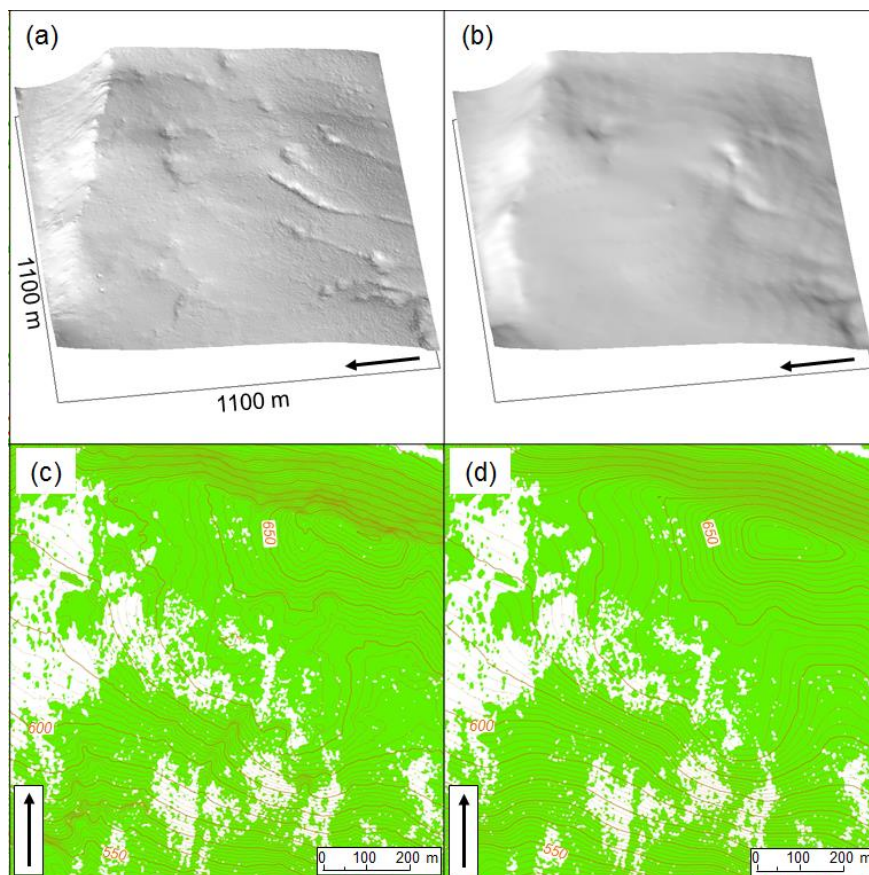
Obr. 1.7: Stratégie zberu nadmorských výšok podľa Li et al. (2005).

Mierková závislosť javov je v geovedách dôležitým filozofickým konceptom, pretože je typická pre všetky environmentálne javy a procesy (Lam a Quattrochi, 1992, Atkinson a Tate, 2000, Lloyd, 2007). Rozlíšiť možno *časový* a *priestorový aspekt* mierky (Lam a Quattrochi, 1992, Li, 2008). Pre digitálne modelovanie zemského povrchu všeobecne sa dôraz kladie na priestorové hľadisko a povrch Zeme sa uvažuje ako statická plocha v určitom časovom úseku. V geoinformatických publikáciách sú definované štyri rôzne typy priestorového aspektu mierky (Lam a Quattrochi, 1992, Quattrochi a Goodchild, 1997, Goodchild, 2001, Li, 2008) ako:

1. *úroveň abstrakcie*, tiež označovaná ako kartografická mierka, miera zovšeobecnenia reality pre jej zobrazenie, reprezentatívna časť celku
2. *úroveň detailu*, priestorové rozlíšenie, hustota alebo interval meraní výšok,
3. *územný rozsah*, alebo tiež geografický rozsah, veľkosť (plocha) záujmového územia
4. *územný rozsah, v rámci ktorého pôsobí geografický proces*, operatívna mierka.

Prvý aspekt je spojený so zobrazením priestoru na mape. Pre danú kartografickú mierku je možné z technologického hľadiska zobraziť iba určité objekty, ktoré nie sú zobraziteľné pri menšej mierke. V počítačovom prostredí neexistujú obmedzenia pre zobrazovanie údajov na akejkoľvek úrovni preto je tu koncept kartografickej mierky irelevantný, napríklad mapu v mierke 1:50 000 možno priblížiť (mierka 1:10 000) alebo oddialiť (mierka 1:100 000). Samozrejme, priestorové rozlíšenie informácie zachytenej v mape sa so zmenou zobrazovacej mierky nemení.

Úroveň detailu závisí od hustoty zberu informácií v priestore, v prípade vyjadrenia georeliéfu od hustoty určovania výšok na ňom. Napríklad, mapovať možno reliéf meraním výšky každých 10 krokov alebo podľa zvoleného intervalu vrstevníc.



Obr. 1.8: Mierková závislosť georeliéfu vyjadrená dvomi modelmi časti Jasovskej planiny perspektívne zobrazenými v 3D (a,b) a vrstevnicami (c,d) v 2D. Model (a,c) je vytvorený z hustejšieho bodového poľa ako model (b,d).

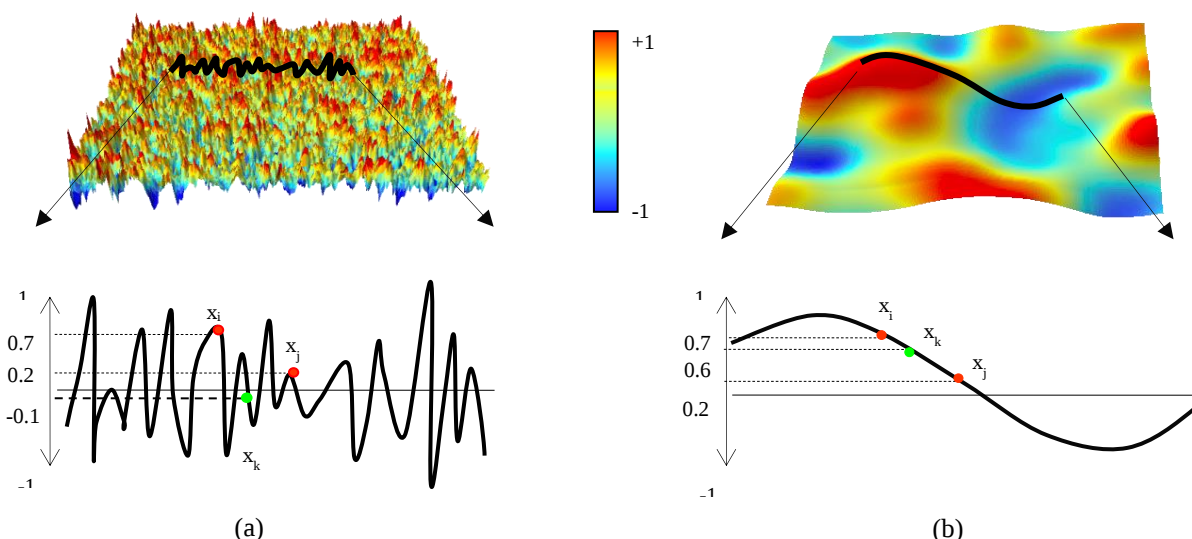
Úrovníou detailu sa myslí najkratšia vzdialenosť medzi dvomi bodmi merania (Quattrochi a Goodchild, 1997). Z tohto pohľadu Atkinson a Tate (2000) rozlišujú dva druhy priestorového rozlíšenia: *mera priestorovej variácie nadmorských výšok* a *mierka merania*. Priestorová variácia je polohovo závislá a je objektívnou vlastnosťou zemského povrchu, ktorá je nezávislá na meraní. Mierka merania závisí od už spomenutej stratégie merania a je závislá od subjektívneho rozhodnutia merača. Mierka merania má dva aspekty: *vzťažná plocha merania* (angl. measurement support) a *rozsah oblasti pokrytej meraniami* (angl. spatial coverage). Vzťažná plocha merania je daná geometrickým tvarom, veľkosťou plochy a orientáciou územnej jednotky, ku ktorej sa merania vzťahuje. Napríklad meranie nadmorskej výšky pomocou výtyčky s GNSS prijímačom sa vzťahuje na bod, na ktorom sa výtyčka dotýka zeme. Pri mapovaní povrchu satelitným radarom je meraná nadmorská výška priemernou hodnotou pre kruhovú plochu s rozsahom niekoľko metrov štvorcových, ktorá zodpovedá ploche georeliéfu ožiareného radarovým žiarením. Pri laserovom skenovaní je táto plocha menšia, rádovo pol metra štvorcového a má kruhový, prípadne eliptický tvar.

Dôležité je rozlišovať medzi priestorovým rozlíšením údajov a hustotou výškového bodového poľa zdrojových údajov. Predpokladajme, že nadmorská výška na zemskom povrchu je určená každých 10 metrov. Metódami priestorovej interpolácie alebo geoštatistiky je možné odhadnúť nadmorské výšky s hustejším výskytom v priestore, napr. každé 2 metre. Zahustením sme obohatili pôvodný údajový súbor bez určenia priestorovej variácie georeliéfu skutočne meranými hodnotami výšky. Na kratšie vzdialenosti (tu každé 2 metre) ako pôvodná hustota merania (tu každých 10 metrov), sú hodnoty nadmorských výšok určené s istou dávkou neurčitosti v závislosti od matematickej funkcie použitej pre výpočet výšok s intervalom 2 metre. Ako uvádza Goodchild (2001) priestorové rozlíšenie prevzorkovaného modelu reliéfu obsahuje nevyhnutne menej spoľahlivú informáciu o geometrii skutočného reliéfu (viac neurčitosti), ako keby sme priamo určili nadmorské výšky s hustejším krokom (2 metre). Priestorová interpolácia nadmorských výšok ale aj iných typov priestorových údajov je mierkovo závislá a z toho dôvodu môžu byť výsledky pre rôzne mierkové úrovne odlišné.

Tak ako tvar georeliéfu aj procesy na ňom pôsobiace a reliéf formujúce sú mierkovo závislé. Pri ich modelovaní je dôležité uvedomiť si pri akej priestorovej mierke sa proces prejavuje a vzhľadom na túto mierku voliť priestorové rozlíšenie modelu reliéfu. Napríklad stružková erózia vytvára úzke ryhy (stružky) široké niekoľko centimetrov. Pre ich zachytenie modelom reliéfu je teda potrebné mapovať ho s hustotou väčšou ako je šírka stružiek. Taktiež pri modelovaní stružkovej erózie očakávame tvorbu foriem určitej veľkosti a vzhľadom na ňu je potrebné voliť priestorové rozlíšenie výstupných údajov modelovania. Iným príkladom je modelovanie ľadovcovej erózie, ktorá vytvára oveľa väčšie formy (trógy, kary). V tomto prípade by postačovala procesná mierka na úrovni niekoľkých desiatok metrov pre vyjadrenie foriem ako výsledkov procesu ľadovcovej erózie. Zároveň pre jej modelovanie postačuje podobné priestorové rozlíšenie DMR.

1.8 Priestorová závislosť geografických javov

Geovedný výskum krajiny sa opiera o predpoklad priestorovej závislosti javov a procesov. Znamená to, že vlastnosti (atribúty) krajiny na dvoch rôznych, ale blízkych miestach sú si viac podobné v porovnaní s miestami od seba väčšími vzdialenými. Štatisticky tento predpoklad možno vyjadriť pojmom pozitívna priestorová autokorelácia, teda že hodnoty zvoleného atribútu priestoru na dvoch rôznych miestach sú navzájom korelované (Schabenberger and Gotway, 2005). Na tomto princípe americký geograf Waldo Tobler (1970) sformuloval „prvý zákon geografie“. V skutočnosti sa naozaj mnohé javy a procesy v krajine správajú podľa tejto zákonitosti, ako napríklad nadmorská výška a iné parametre reliéfu, teplota vzduchu, tlak vzduchu, koncentrácia prvkov v pôde. Podobne ako pri Pearsonovom korelačnom koeficiente, používanom v analýze štatistickej závislosti dvoch alebo viacerých premenných, možno aj pri priestorovej autokorelácii hovoriť o pozitívnej alebo negatívnej korelácii. Väčšina prírodných, ale aj socioekonomických javov vykazuje pozitívnu autokoreláciu, pri ktorej podobnosť miest vzrastá so znižujúcou sa vzdialenosťou



Obr 1.9: Ukážka javu vyjadreného povrchmi s nulovou (a) a silnou pozitívnou priestorovou autokoreláciou (b) a ich priestorová interpolácia. Červené body reprezentujú miesta merania hodnoty javu na základe ktorých je úlohou určiť hodnotu javu v zelenom bode, v ktorom nebolo vykonané meranie.

vzdialenosťou medzi nimi. Naopak pri negatívnej priestorovej autokorelácii podobnosť javu na dvoch miestach narastá s rastúcou vzdialenosťou medzi nimi. Negatívna autokorelácia reliéfu by znamenala veľmi drsný povrch až náhodne sa meniaci charakter povrchu (Obr. 1.9a). Silná pozitívna autokorelácia znamená hladko, postupne sa meniaci povrch (Obr. 1.9b). Predpoklad pozitívnej priestorovej autokorelácie geografických atribútov krajiny je kľúčovou myšlienkou priestorovej interpolácie a extrapolácie. Ak by sa javy správali náhodne, teda ich autokorelácia by bola blízka nule, nebolo by možné predpovedať ich hodnoty v priestore, čím by akákoľvek geografická analýza stratila zmysel (Lloyd, 2007). Ukážkou je situácia na Obr. 1.9, ktorý zobrazuje povrch s nulovou priestorovou autokoreláciou (Obr. 1.9a) a hladko sa meniaci jav s pozitívnou priestorovou autokoreláciou. V oboch prípadoch nadobúda jav hodnoty medzi -1 a 1 a priečny rez označený čiernou čiarou vyjadruje skutočný priebeh javu na zvolenom úseku. Chceme určiť hodnotu javu k v bode x_k , ktorý sa nachádza medzi bodmi x_i a x_j . V týchto bodoch sme odmerali hodnotu javu 0,2 a 0,7. Jav na Obr. 1.9a môže v bode x_k nadobúdať s rovnakou pravdepodobnosťou hocikáku hodnotu medzi -1 a 1, keďže nie je priestorovo autokorelovaný. Avšak pri pozitívne autokorelovanom jave na Obr. 1.9b v tom istom bode x_k sa bude hodnota javu s vysokou pravdepodobnosťou nachádzať v intervale od 0,2 do 0,7.

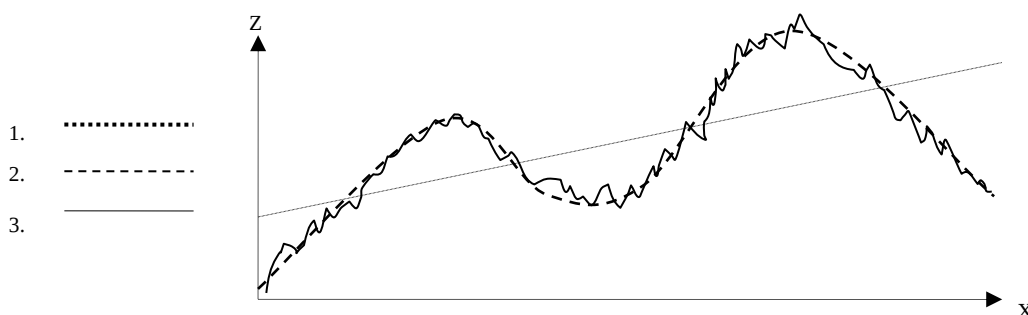
Vlastnosti geografických javov a procesov sa v priestore nemenia úplne náhodne ani nie sú úplne pozitívne autokorelované. *Priestorová autokorelácia je mierково závislá* a javí sa inak pri rôznej úrovni priestorového rozlíšenia skúmaného javu. Výskyt hodnôt javu vyjadreného povrchom na obr. 1.9a sa pri zvolenom priestorovom rozlíšení (mierke, hustote merania) javí ako náhodný. Ak by sme zvýšili hustotu meraní pre ten istý jav, teda zvýšili podrobnosť mapovania, dala by sa na základe nameraných hodnôt identifikovať silnejšia autokorelácia a tak zvýšiť pravdepodobnosť správneho určenia hodnoty v bode x_k . Pre geografické javy a procesy možno určiť ich *priestorovú štruktúru*, ktorá vyjadruje závislosť atribútu vzhľadom na priestorové rozlíšenie. Pre jej analytické vyjadrenie sa hodí štatisticko-fyzikálny koncept priestorových náhodných polí, ktorého teóriu bližšie opisuje napr. Schabenberger and Gotway (2005). Priestorovo náhodné pole premenej $Z(x)$ možno rozložiť na *deterministickú (fyzikálne podmienenú) zložku* $m(x)$ a *stochastickú (náhodnú) zložku* $R(x)$, pričom platí:

$$Z(x) = m(x) + R(x)$$

$Z(x)$ je definovaná ako náhodná premenná (napr. nadmorská výška reliéfu), ktorá sa mení v závislosti od polohy x (Lloyd, 2006), ktorú by sme mohli pre dvojdimenzionálne pole vyjadriť funkciou $f(x,y)$. Deterministická zložka predstavuje systematický trend v hodnotách poľa.

Stochastická zložka zahŕňa dva komponenty variability hodnôt poľa, a to priestorovo autokorelovanú variabilitu a úplne náhodnú variabilitu (Obr. 1.10). Jav, ktorého priestorová štruktúra sa v priestore nemení nazývame *stacionárny jav*. Takýto jav má kdekoľvek v záujmovom území rovnaké štatistické vlastnosti (napr. priemer a variancia). Pri modelovaní reliéfu však nastáva skôr situácia, keď je priestorová autokorelácia javu rôzna v rôznych častiach záujmového územia. Takýto jav nazývame z pohľadu priestorových náhodných polí *nestacionárny*. Jeho štatistické ukazovatele sa menia v závislosti od lokality v záujmovom území (Lloyd, 2007). V prípade, že sa priemerná hodnota javu v závislosti od lokality mení, hodnoty tohto javu obsahujú systematický trend (Obr. 1.10).

Priestorovú závislosť možno vyjadriť niekoľkými ukazovateľmi, ktoré zohľadňujú priestorovosť dát. V modelovaní georeliéfu a jeho analýze sú najbežnejšie používané Moranovo I (Wood 1996, Gallay et al. 2010), semivariogram (Mulla 1988, Lloyd a Atkinson 2002), fraktálna dimenzia (Wood 1996, Gallay 2010), alebo wavelety (Jordan and Scott, 2005). Stanovenie miery priestorovej autokorelácie je kľúčovým konceptom geoštatistických metód priestorovej interpolácie. V súvislosti s tvorbou modelov reliéfu sa geoštatistike venuje kapitola 3.3.



Obr. 1.10: Jednotlivé zložky priestorového poľa nadmorských výšok georeliéfu podľa teórie priestorových náhodných polí. 1. – systematická zložka (globálny trend), 2. – priestorovo autokorelovaná zložka, 3. – náhodná zložka bez priestorovej autokorelácie.

1.7 Digitálne výškové údaje a modely

Digitálne modely zemského povrchu vznikajú z priestorovo lokalizovaných meraní nadmorskej výšky, ktoré sú uložené v digitálnom formáte v počítači alebo na pamäťovom médiu. Koncept digitálnej manipulácie nadmorských výšok je výsledkom vedeckého úsilia v 50. rokoch 20. storočia realizovaného na Massachusetts Institute of Technology (MIT) v Bostone v Spojených štátoch amerických. Weisberg (2008) vo svojom prehľade o histórii o inžinierskeho dizajnu vysvetľuje, že metódu modelovania digitálneho terénu na MIT vyvinula výskumná skupina pod vedením profesora Charlesa L. Millera. Postup vychádzal z myšlienky, že zemský povrch možno štatisticky vyjadriť súborom množstva bodov s 3D súradnicami $[x, y, z]$. Tento návrh bližšie opisuje Miller a LaFlamme (1958), ktorý prvýkrát zaviedli pojem *digitálny model terénu (DTM)*, ktorý v domácej terminológii nahrádzame termínom *digitálny model reliéfu (DMR)* (Šíma, 2002). DMR, je širokou komunitou vnímaný ako množina parametrov povrchu vo zvolenom súradnicovom systéme, ktoré sú uložené v digitálnej forme (Wise, 1998, Pike, 2002; Li et al., 2005; Fisher a Tate, 2006; Zhou et al., 2008). Užší pohľad na DMR zdôrazňuje úplnosť

pokrytia vymedzeného priestoru údajmi o reliéfe, čo znamená, že v ktoromkoľvek bode tohto priestoru možno z modelu určiť parameter reliéfu (Krcho, 1990, Hengl and Reuter, 2008). Tým je daná podmienka spojitosti plochy DTM, ktorú napríklad nespĺňajú digitalizované vrstevnice alebo súbor bodov, ak by mali byť vnímané ako modely reliéfu v užšom slova zmysle. Parametre kvantitatívne charakterizujúce georeliéf nazývame geomorfometrické parametre a medzi bežne používané patria nadmorská výška, sklon reliéfu, orientácia voči svetovým stranám, krivosť reliéfu (Evans, 1990, Krcho, 1990).

Na začiatku využívania digitálnej reprezentácie zemského povrchu sa jej použitie sústredilo na praktické aplikácie súvisiace s terénom ako napríklad výpočet kubatúr pri zemných prácach súvisiacich s budovaním železníc a ciest. Neskôr si tento nový smer v inžinierstve vyžiadal modelovanie iných typov povrchu ako napríklad povrchu krajinného krytu. Pre analýzy viditeľnosti krajiny, šírenia rádiového signálu, leteckú navigáciu je kľúčové *použitie digitálnych modelov povrchu krajinného krytu* (angl. *digital surface model, DSM*), pretože zahŕňajú aj povrch objektov na teréne, ako sú budovy, stromy a iné. Pre iné aplikácie ako je modelovanie erózie pôdy alebo stavebníctvo je zase potrebný DMR.

DSM a DMR sú najčastejšie reprezentované v podobe modelov nadmorských výšok, pre ktoré sa v medzinárodnej terminológii používa skratka *DEM* (angl. *digital elevation model*, nem. *Digitales Höhenmodell*). Priamy preklad *digitálny výškový model (DVM)* sa u nás používa zriedkavejšie. V užšom ponímaní DVM znamená spojitú digitálnu reprezentáciu povrchu bez ohľadu na to, či ide o terén alebo povrch krajinného krytu (Hengl a Reuter, 2008). V širšom pohľade ide o súbor priestorovo lokalizovaných hodnôt nadmorských výšok (Wise, 1998, Li et al., 2005, Fisher a Tate, 2006).

Plocha reprezentovaná prostredníctvom DVM úplne presne nevyjadruje teoretický koncept rozhraní geosfér, ako to bolo opísané v kapitole 1.2. Príčinou sú praktické obmedzenia určovania výšok a možnosti vyjadrenia plochy digitálnym zápisom, ako aj efektivity. Z hľadiska merania nemožno určiť nadmorskú výšku prírodného reliéfu pod umelými navážkami, budovami alebo vo výkopoch. Z geoinformatického hľadiska je jednoduchšie a efektívnejšie pre jeden typ povrchu uvažovať iba jednu hodnotu nadmorskej výšky vzťahujúcu sa k jednému bodu na ploche. Pre digitálne modelovanie sa nadmorské výšky uvažujú ako skalárne hodnoty dvojdimenzionálneho spojitého fyzikálneho poľa, ktoré možno vyjadriť bivariačnou matematickou funkciou f :

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

pričom z je nadmorská výška reprezentovanej plochy (skalárna hodnota) a (x, y) sú súradnice bodu v dvojrozmernom karteziánskom súradnicovom systéme $(0, x, y)$. Pre jeden bod so súradnicami (x, y) existuje iba jedna hodnota z . Táto podmienka obmedzuje vyjadrenie reliéfu v prípade skalných previsov, lomových stien, útesov, banských tunelov alebo jaskýň, či v prípade krajinného krytu komplexných tvarov budov. Preto sa o takýchto modeloch hovorí ako o 2,5D povrchoch či modeloch. Hoci reliéf (terén) nezahŕňa hladinu riek, jazier alebo morí, ich hladina je súčasťou DMR, pretože z praktického hľadiska ide o eróznú bázu, ku ktorej sa vzťahujú napríklad procesy svahovej modelácie a zároveň je jednoduchšie zmapovateľná ako povrch dna. Z uvedeného vyplýva, že DEM, či už vo forme DMR alebo DSM, parametrizuje jednu plochu.

1.8 Význam digitálnych výškových údajov a modelov

Spoločným menovateľom vyjadrujúcim významnosť používania digitálnych výškových údajov a modelov zemského povrchu je *efektívnosť*, ktorú prinášajú v porovnaní s analógovými formami reprezentácie. Príchod digitálnej doby v 50. rokoch 20. storočia a následný prudký rozvoj digitálnych počítačov stimuloval taktiež použitie veľkých údajových súborov vrátane výškových údajov o georeliéfe. Hengl a Reuter (2008) ako aj Weisberg (2008) podrobnejšie opisujú súvisiacu históriu a vysvetľujú, že skutočný pokrok v digitálnom modelovaní reliéfu nastal v 60. až 70. rokoch 20. storočia. Tento rozvoj

súvisel najmä s rastúcou výpočtovou kapacitou počítačov na báze polovodičov a zväčšovaním úložiskovej kapacity pamäťových médií.

Predtým než boli geodetické údaje o reliéfe spravovateľné v digitálnej podobe, boli hlavným zdrojom údajov o reliéfe papierové mapy a letecké stereosnímky. Manipulácia s týmto typom údajov ako aj výpočty s nimi boli veľmi zdĺhavé, zložité a v mnohých prípadoch prakticky nemožné (Hengl a Reuter, 2008). Prevodom priestorovo lokalizovaných údajov o nadmorskej výške reliéfu do digitálnej podoby je možné doslova jedným kliknutím myšou vypočítať sklonitosť svahov alebo dynamicky zobrazovať reliéf z ľubovoľného uhla pohľadu. Matematické analýzy topografických máp boli a stále sú veľmi prácne, časovo náročné a vzhľadom na vynaložené úsilie a získaný výsledok neefektívne. Táto skutočnosť bola hnacím faktorom prvých pokusov modelovať reliéf digitálne pomocou DMR v skupine okolo Charlesa L. Millera na MIT, pretože bolo nutné pre výstavbu medzištátnych cestných komunikácií v USA spracovať rozsiahle oblasti.

Počítačové spracovanie údajov otvorilo vo vede v 60. rokoch minulého storočia dvere kvantitatívnej revolúcii, ktorá pravdaže zasiahla aj geovedy najmä v súvislosti s analýzou geometrie georeliéfu. Zhou et al. (2008) zdôrazňuje, že práve tieto disciplíny potrebovali a neustále potrebujú väčšmi aplikovať vo výskume kvantitatívny prístup, pričom práve digitálne modelovanie reliéfu je správnou cestou. Li et al. (2005, s. 7) definuje štyri špecifické aspekty ako *hlavné výhody DMR* v porovnaní s tradičnými analógovými reprezentáciami:

- *rozmanitosť spôsobov reprezentácie* – z digitálnej formy možno jednoducho vytvoriť rôzne výstupy ako napríklad mapy, priečne rezy, animácie, perspektívne 3D vizualizácie,
- *bezstratovosť údajov v čase* – digitálne údaje si zachovávajú svoje hodnoty a presnosť, zatiaľ čo papierové mapy a snímky sa starnutím deformujú a blednú,
- *automatizácia spracovania v reálnom čase* – aktualizácia, integrácia, distribúcia digitálnych údajov sú oveľa flexibilnejšie,
- *jednoduchosť viacmierkovej reprezentácie* – DMR možno pretvárať do rôznych úrovní detailu, ktoré zodpovedajú rôznej mierke výskumu, čo je veľmi zložité s papierovou mapou.

1.9 Aplikácie digitálneho modelovania georeliéfu

Digitálne výškové údaje a modely nachádzajú uplatnenie najmä v aplikáciách súvisiacich s plochou reliéfu (terénom) a plochou krajinného krytu. Vo všeobecnosti sa DMR a DSM používajú vo všetkých oblastiach kde je cieľom analyzovať tvar povrchu. Li et al. (2005) za prvé aplikácie DMR považuje výstavbu diaľnic a krajinné plánovanie v 50. rokoch minulého storočia, kedy bolo nutné spracovať veľké množstvo leteckých snímok a pre túto úlohu bolo navrhnuté ich spracovanie pomocou počítača za účelom výpočtu objemu stavebného materiálu potrebného pre násypy alebo objemu výkopových prác pre budovanie cestných zárezov. Neskôr rozširovanie digitálnej výpočtovej technológie umožnilo vykonávanie geomorfometrických analýz. Geomorfometria bola a stále je založená na teórii diskretnej reprezentácie reliéfu ako spojitého fyzikálneho poľa nadmorských výšok, ktorú paralelne rozpracovali Evans (1972, 1990) a Krcho (1973, 1990).

Hlavné oblasti aplikácie DMR vidí mnoho autorov v mapovaní a modelovaní krajiny. V práci Wilson a Gallant (2000) možno nájsť konkrétne príklady na aplikácie DMR v pedológii, hydrológii, geomorfológii a ekológii. Li et al. (2005) ako aj El-Sheimy et al. (2005) identifikujú päť hlavných domén, v ktorých sa digitálne výškové modely používajú: stavebníctvo, geovedy, riadenie zdrojov a životného prostredia, diaľkový prieskum Zeme a mapovanie, vojenstvo. Hengl a Reuter (2008) prezentujú prípadové štúdie použitia geomorfometrie pre štúdium svahových deformácií, geomorfologických hrozieb, pre pôdne mapovanie, analýzu vegetácie a ekosystémov, meteorológiu, topoklimatológiu a precízne

poľnohospodárstvo. Tab. 1.2 podáva prehľad oblastí a citačných odkazov poukazujúcich na rozmanitosť použitia digitálneho modelovania zemského povrchu. Uvedené aplikácie môžu byť agregované do troch skupín: (a) vizualizácia, (b) tvorba (odvodenie) nových údajov, a (c) určovanie polohy (navigácia, mapovanie).

V oblasti vizualizácie je predmetom zlepšenie vnímania a pochopenia charakteru zemského povrchu, ako aj komunikácia javov a procesov vzťahujúcich sa k povrchu pomocou vhodných farieb, nasvietenia, alebo uhla pohľadu v 3D priestore. Vhodné prostriedky vizualizácie údajov o zemskom povrchu uľahčujú ich interpretáciu a robia výsledky práce atraktívnejšie pre verejnosť a odborníkov z iných oblastí. Viac informácií k tejto problematike možno nájsť v prácach Mitášová et al. (1994), Wood (1996), Oosterom et al. (2008).

Druhá skupina aplikácií zahŕňa matematickú analýzu DMR a DSM s cieľom vypočítať geomorfometrické parametre ich povrchu. Teda ide o získavanie nových údajov, ktoré možno odvodiť z nadmorských výšok. Príkladom sú volumetrické analýzy, prostredníctvom ktorých možno určiť objem uzavretý formou reliéfu alebo medzi dvomi plochami, čo možno využiť pre detekciu zmeny povrchu po zosuvoch alebo v stavebníctve pre výkopové práce (Pan et al. 2005). Širokú paletu uplatnenia majú geomorfometrické aplikácie so zámerom kvantifikovať tvar a zhodnotiť priestorovú distribúciu parametrov reliéfu (Hengl a Reuter, 2008). Prehľad parametrov reliéfu uvádza Wilson a Gallant (2000, p.7). Väčšinou sú používané pre geomorfologické mapovanie, analýzu toku látok a energie. V hydrológii a pedológii sú využívané pre modelovanie povrchového toku vody, jej koncentrácie a eróznej kapacity. Slnečné žiarenie dopadajúce na plochu reliéfu je príkladom javu priamo súvisiaceho s orientáciou reliéfu a jeho sklonom. Oslnenie sa modeluje za účelom stanovenia fotovoltického potenciálu pre výrobu elektriny, vlhkostných pomerov v pôdach pre vhodné sadobné a oševné postupy a pod. Určenie relatívnych výškových rozdielov reliéfu je potrebné pre modelovanie rizika záplav a analýzu viditeľnosti územia z daného bodu. Analýza viditeľnosti s použitím DMR sa vykonáva pri modelovaní šírenia elektromagnetickej energie v krajine, ako napríklad signálu mobilnej telekomunikačnej siete a má taktiež význam pri vojenskom plánovaní. Pri analýze dynamiky reliéfu (zosuvy, pohyb dún, zemetrasenia) sa využívajú časové rady DMR. Geomorfometrické parametre sa dajú použiť pre predpovedanie výskytu javov, ktoré s nimi výrazne v priestore korelujú, ako napríklad pôdy, vegetačné spoločenstvá, ekosystémy, nerastné suroviny.

Treťou oblasťou použitia DMR je určenie polohy v 3D priestore. DMR sú nutné pre digitálnu ortorektifikáciu fotografických snímok pre automatizovanú navigáciu v reálnom čase v leteckej, pozemnej alebo námornej doprave (Wysocky a Hoper, 1995). Novou aplikáciou DMR je navigácia vozidiel pomocou systému ADAS (advanced driver assistant systems), ktoré automaticky monitorujú pohyb vozidla vzhľadom na 3D geometrické parametre vozovky (krivosť zákrut, stúpanie, klesanie, šírka), optimalizujú spotrebu paliva a zvyšujú bezpečnosť jazdy.

Aplikácia digitálnych modelov zemského povrchu je mierkovo závislá (Wilson a Gallant, 2000, s.7). Napríklad pre modelovanie globálnej atmosférickej cirkulácie v klimatológii postačuje DMR s priestorovým rozlíšením niekoľko kilometrov. Na druhej strane modelovanie povodní vyžaduje čo najpresnejší model vo vysokom rozlíšení, napr. niekoľko metrov.

Tab. 1.2: Súčasnité oblasti aplikácie digitálnych modelov zemského povrchu.

aplikačná oblasť	úloha	publikácia
geomorfológia	vizuálna interpretácia dmr	Byrne, P. K., van Wyk de Vries, B., Murray, J. B. and Troll, V. R. (2009). The geometry of volcano flank terraces on Mars. <i>Earth and Planetary Science Letters</i> , 281, 1-13.
	automatická identifikácia a kvantifikácia geomorfologických vlastností reliéfu	Klingseisen, B., Metternicht, G. and Paulus, G. (2008). Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. <i>Environmental Modelling & Software</i> , 23, 109-121.
	automatická identifikácia špecifických foriem	Bishop, M. A. (2009). A generic Classification for the Morphological and Spatial Complexity of Volcanic (and other) Landforms. <i>Geomorphology</i> , In Press, Accepted Manuscript.
	geomorfologické mapovanie	Pánek, T., Hradecký, J., Minár, J., Hungr, O. and Dusek, R. (2009). Late Holocene catastrophic slope collapse affected by deep-seated gravitational deformation in flysch: Ropice Mountain, Czech Republic. <i>Geomorphology</i> , 103, 414-429.
pedológia	pôdne mapovanie	Debella-Gilo, M. and Etzelmüller, B. (2009). Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway. <i>CATENA</i> , 77, 8-18.
	priestorové modelovanie výskytu pôd	Thompson, J. A., Pena-Yewtukhiw, E. M. and Grove, J. H. (2006). Soil-landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability. <i>Geoderma</i> , 133, 57-70.
ekológia a lesníctvo	modelovanie ekosystémov	Falkowski, M. J., Evans, J. S., Martinuzzi, S., Gessler, P. E. and Hudak, A. T. (2009). Characterizing forest succession with LiDAR data: An evaluation for the Inland Northwest, USA. <i>Remote Sensing of Environment</i> , 113, 946-956.
	predikcia priestorového rozšírenia druhov	Goetz, S., Steinberg, D., Dubayah, D. and Blair, B. (2007). Laser remote sensing of canopy habitat heterogeneity as a predictor of bird species richness in an eastern temperate forest, USA. <i>Remote Sensing of Environment</i> , 108, 254-263.
	modelovanie olistenia	Richardson, J. J., Moskal, L. M. and Kim, S.-H. (2009). Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR. <i>Agricultural and Forest Meteorology</i> , 149, 1152-1160.
	mapovanie vegetácie	Jutras, P., Prasher, S. O. and Mehuys, G. R. (2009). Prediction of street tree morphological parameters using artificial neural networks. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , In Press. doi:10.1016/j.compag.2009.02.008.
	výpočet biomasy	Skowronski, N., Clark, K., Nelson, R., Hom, J. and Patterson, M. (2007). Remotely sensed measurements of forest structure and fuel loads in the Pinelands of New Jersey. <i>Remote Sensing of Environment</i> , 108, 123-129.
geológia	výška vegetácie	Sexton, J. O., Bax, T., Siquera, P. and Swenson, J. J. (2009). A comparison of LiDAR, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America. <i>Forest Ecology and Management</i> , 257, 1136-1147.
	modelovanie svahových deformácií	Munoz-Salinas, E., Renschler, C. S. and Palacios, D. (2009). A GIS-based method to determine the volume of lahars: Popocatepetl volcano, Mexico. <i>Geomorphology</i> , doi: 10.1016/j.geomorph.2008.09.028.
	volumetrické analýzy	Chiverell, R. C., GThomas, G. S. P. and Foster, G. C. (2008). Sediment-landform assemblages and digital elevation data: Testing an improved methodology for the assessment of sand and gravel aggregate resources in north-western Britain. <i>Engineering Geology</i> , 99, 40-50.
	detekcia zmien reliéfu	Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A. and Wojciechowski, T. (2009). InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. <i>Engineering Geology</i> .
poľnohospodárstvo	precízna výsadba a zber úrody	Amiama, C., Bueno, J., Álvarez, C. J. and Pereira, J. M. (2008). Design and field test of an automatic data acquisition system in a self-propelled forage harvester. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , 61, 192-200.
	modelovanie šírenia živín	Kang, M. S., Srivastava, P., Tyson, T., Fulton, J. P., Owsley, W. F. and Yoo, K. H. (2008). A comprehensive GIS-based poultry litter management system for nutrient management planning and litter transportation. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , 64, 212-224.
	modelovanie výnosnosti	Gutiérrez, P. A., López-Granados, F., Peña-Barragán, J. M., Jurado-Expósito, M., Gómez-Casero, M. T. and Hervás-Martínez, C. (2008). Mapping sunflower yield as affected by <i>Ridolfia</i> segetum patches and elevation by applying evolutionary product unit neural networks to remote sensed data. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , 60, 122-132.

Tab. 1.2: Súčasnité oblasti aplikácie digitálnych modelov zemského povrchu (pokračovanie).

klimatológia a meteorológia	modelovanie oslnenia	Hofierka, J. and Kanuk, J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. Renewable Energy, In Press, Corrected Proof.
	modelovanie pohybu vzduchu	Gál, T. and Unger, J. (2009). Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. Building and Environment, 44, 198-206.
	modelovanie úhrnu zrážok	Lloyd, C. D. (2005). Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. Journal of Hydrology, 308, 128-150.
	modelovanie teploty vzduchu	Benavides, R., Montes, F., Rubio, A. and Osoro, K. (2007). Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. Agricultural and Forest Meteorology, 146, 173-188.
hydrológia	modelovanie prúdenia vody	Du, J., Xie, H., Hu, Y., Xu, Y. and Xu, C.-Y. (2009). Development and testing of a new storm runoff routing approach based on time variant spatially distributed travel time method. Journal of Hydrology, 369, 44-54.
	modelovanie snehovej pokrývky	Teufelsbauer, H. (2009). Linking laser scanning to snowpack modeling: Data processing and visualization. Computers & Geosciences, In Press, Corrected Proof.
	modelovanie povodní	Sanders, B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. Advances in Water Resources, 30, 1831-1843.
	automatizovaná identifikácia hydrologických foriem	Gong, J. and Xie, J. (2009). Extraction of drainage networks from large terrain datasets using high throughput computing. Computers & Geosciences, 35, 337-346.
technické vedy, najmä stavebníctvo	automatická identifikácia objektov	Alexander, C., Smith-Voysey, S., Jarvis, C. and Tansey, K. (2009). Integrating building footprints and LiDAR elevation data to classify roof structures and visualise buildings. Computers, Environment and Urban Systems, In press.
	výpočet objemov	Pan, X., Nakamura, H., Liu, Y. and Lang, Y. (2005). Automatic analysis algorithm for side-slope cut-fill based on digital elevation model. Geoinformatics, 16, 35-40.
	dizajn stavieb a ich vymedzenie	Hasmadi, M. and Taylor, J. C. (2008). Sensitivity analysis of an optimal access road location in hillyforest area: a GIS approach. American Journal of Applied Sciences, 5, 1686-1692.
	analýza viditeľnosti	Sawadam, M., Cossette, D., Wellar, B. and Kurt, T. (2006). Analysis of the urban/rural broadband divide in Canada: Using GIS in planning terrestrial wireless deployment. Government Information Quarterly, 23, 454-479.
	mapovanie a modelovanie urbánnych štruktúr	Aubrecht, C., Steinnocher, K., Hollaus, M. and Wagner, W. (2009). Integrating earth observation and GIScience for high resolution spatial and functional modeling of urban land use. Computers, Environment and Urban Systems, 33, 15-25.
urbanizmus	riadenie mesta	Filin, S., Borka, A. and Doytsher, Y. (2009). Generation of parcelation proposals aided by LiDAR derived spatial cues. Computers, Environment and Urban Systems, In Press, Corrected Proof.
	vizuálna interpretácia dmr	Entwistle, J. A., McCaffrey, K. J. W. and Abrahams, P. W. (2009). Three-dimensional (3D) visualisation: the application of terrestrial laser scanning in the investigation of historical Scottish farming townships. Journal of Archaeological Science, 36, 860-866.
archeológia	analýza viditeľnosti	Ogburn, D. E. (2006). Assessing the level of visibility of cultural objects in past landscapes. Journal of Archaeological Science, 33, 405-413.
	identifikácia potenciálnych lokalít	Vaughn, S. and Crawford, T. (2009). A predictive model of archaeological potential: An example from northwestern Belize. Applied Geography, In Press, Corrected Proof.
kriminalistika	vizuálna interpretácia dmr	Ritz, K., Dawson, L. and Miller, D. (Eds.) (2009). Criminal and Environmental Soil Forensics, Springer. 520 p.
	modelovanie toku vody	Ritz, K., Dawson, L. and Miller, D. (Eds.) (2009). Criminal and Environmental Soil Forensics, Springer. 520 p.
	analýza viditeľnosti	Ruffel, A. and McKinley, J. (2008). Geoforensics, John Wiley and Sons Ltd. 328 p.

Tab. 1.2: SúčasnÉ oblasti aplikácie digitálnych modelov zemského povrchu (pokračovanie).

dial'kový prieskum Zeme	úprava rádiometrických vlastností snímok	Wu, J., Bauer, M. E., Wang, D. and Manson, S. M. (2008). A comparison of illumination geometry-based methods for topographic correction of QuickBird images of an undulant area. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63, 223-236.
	ortorektifikácia snímok	Elaksher, A. F. (2009). Using LIDAR-based DEM to orthorectify Ikonos panchromatic images. Optics and Lasers in Engineering, 47, 629-635.
navigácia a doprava	3d vizualizácia analýza viditeľnosti	Fleming, S., Jordan, T., Madden, M., Usery, E. L. and Welch, R. (2009). GIS applications for military operations in coastal zones. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 213-222.
	simulácia	Zhang, G. (2008). Real time visualization of large terrain in flight simulation. In 2008 Asia Simulation Conference - 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. ICSC, pp. 36-39. URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4675322&isnumber=4675314 .
	navigácia	Campbell, J. L. (2006). Application of airborne laser scanner-aerial navigation. Russ College of Engineering and Technology. PhD thesis. http://oak.cats.ohiou.edu/~jc233095/diss/campbell_diss_version_2.pdf
	bezpečnosť vozidiel	Wysocki a Hoper (1995)
telekomunikácie	analýza viditeľnosti	Dalela, P. K., Prasad, M. V. S. N. and Mohan, A. (2008). A New Method of Realistic GSM Network planning for Rural Indian Terrains. International Journal of Computer Science and Network Security, 8, 362-371.
zábavný priemysel	3d vizualizácia	Zhou, H., Sun, J., Turk, G. and Rehg, J. M. (2007). Terrain Synthesis from Digital Elevation Models. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 13, 834-848.

2.1 Stručný úvod a klasifikácia metód

Výškové digitálne dáta reprezentujúce zemský povrch môžu byť získavané rôznymi metódami (Tab. 2.1). V tejto súvislosti môžeme hovoriť o primárnych a sekundárnych digitálnych geodátoch. Primárne geodáta boli získané meraním (mapovaním), či už priamo v teréne alebo metódami diaľkového prieskumu Zeme (DPZ). Sekundárne geodáta boli odvodené z existujúcich (primárnych) podkladov (napr. z existujúcich máp alebo leteckých ortofotosnímkov).

Geografické dáta existujú buď v analógovej alebo digitálnej podobe. Analógové dáta existujú na nejakom fyzikálnom médiu (napr. papierová mapa, fotografický film, textový zoznam súradníc a atribútov) a pre ich použitie v počítačovom prostredí GIS-u sa musí najprv vykonať digitalizácia, t.j. konverzia z analógovej do digitálnej formy. Priamy spôsobom sa digitálne geodáta získavajú priamou digitalizáciou zachyteného signálu, teda najmä odrazeného elektromagnetického žiarenia od objektov na Zemi metódami diaľkového prieskumu Zeme alebo elektronickou tachymetriou. Pokiaľ sú dáta v digitálnej podobe, rozlišujeme vektorové a rastrové dáta. V rámci GIS projektu často vznikne požiadavka na konverziu z jedného dátového modelu do druhého. Taktiež je zvyčajne potrebné zabezpečiť transformáciu digitálnych dát do požadovaného kartografického súradnicového systému.

Tab. 2.1: Rozdelenie digitálnych priestorových údajov pre modelovanie georeliéfu podľa metódy zberu.

Rozdelenie	Metódy zberu rastrových dát	Metódy zberu vektorových dát
primárne	multispektrálne skenovanie	elektronická tachymetria
	letecká fotogrametria	globálne navigačné satelitné systémy (GNSS)
	radar	banské meračstvo
	sonar	laserové skenovanie
sekundárne	rasterizácia analógových podkladov (skenovanie máp, fotografií)	priama vektorizácia analógových podkladov na digitizéri
	odvodenie rastrových digitálnych modelov reliéfu z vektorových dát	vektorizácia rastrových podkladov (napr. skenovaných máp)

Prvé pokusy o zachytenie tvárnosti zemského povrchu meraním sa datujú až do staroveku, kedy sa začali rozvíjať geodetické meračské metódy (Bannister et al., 1998). Pozemné a námorné meračské metódy boli od tých čias až do 19. storočia jediným spôsobom presného určovania polohy a výšky. Nový pokrok nastal po objavení princípov tvorby fotografického záznamu a s prvými pokusmi o lety balónom. Tieto udalosti boli začiatkom technológie bezkontaktného mapovania pomocou diaľkového prieskumu Zeme, ktorého rozvoj postupoval v ďalšom období veľmi rapídne a súvisel s použitím lietadiel. Od druhej polovice minulého storočia sú využívané aj vesmírne družice (satelity).

Možno teda rozlíšiť *priame* a *bezkontaktné meranie*. Priame meranie vyžaduje priamy kontakt so objektom alebo javom, ktorého polohu určujeme. Do tejto kategórie patria metódy pozemnej geodézie ako *tachymetria* a *globálne navigačné satelitné systémy* (GNSS). Pri bezkontaktnom spôsobe mapovania sa poloha a vlastnosti objektov a javov určuje bez priameho kontaktu meracieho zariadenia s nimi, preto hovoríme o diaľkovom prieskume Zeme (angl. remote sensing, nem. die Fernerkundung) (Lillesand et al. 2004). Takéto metódy využívajú fotografovanie (fotogrametria) alebo skenovanie od povrchu odrazeného

elektromagnetického žiarenia (multispektrálne skenovanie, technológia RADAR a LIDAR) alebo zvuku (SONAR). Podľa typu nosiča meracieho zariadenia (senzora) rozlišujeme *pozemný, letecký alebo satelitný diaľkový prieskum*. Pre správne zoriento vanie údajov získaných mapovaním metódami diaľkového prieskumu je potrebné určiť polohu a orientáciu nosiča vzhľadom na zvolený geodetický systém v priebehu zberu údajov. Z hľadiska zdroja žiarenia sa metódy DPZ rozdeľujú na *aktívne* a *pasívne*. Aktívne metódy využívajú senzory, ktoré samy vysielajú žiarenie (LIDAR a RADAR) alebo zvuk (SONAR) a jeho odrazenú zložku zaznamenávajú. Pasívne senzory zaznamenávajú žiarenie, ktoré bolo vyžiarené Slnkom a je odrážané od povrchu mapovaného územia (fotogrametria, multispektrálne skenovanie).

Zdrojom primárnych GIS dát sú priame merania objektov. Primárne dáta sú získavané buď v rastrovom alebo vektorovom formáte. Zber rastrových dát je doménou diaľkového prieskumu Zeme (DPZ) najmä pomocou fotogrametrie a multispektrálneho skenovania. Z hľadiska získavania dát pre GIS sú v súčasnosti najvýznamnejšími zdrojmi letecké snímky, technológia LIDAR a RADAR a multispektrálne satelitné dáta. Metódami DPZ možno získavať aj vektorové dáta, a to predovšetkým fotogrametricky alebo laserovým skenovaním. Nasledujúce podkapitoly sa venujú zberu primárnych vektorových dát priamym pozemným meraním pomocou tachymetrie a globálnych satelitných navigačných systémov (GNSS) ako je napríklad GPS (Global Positioning System). Podstatou zberu vektorových geodát je záznam o polohe a geometrii objektov explicitne v podobe karteziánskych alebo polárnych súradníc.

Celý proces od získania a prípravy dát po ich použitie v digitálnom modelovaní reliéfu zahŕňa niekoľko etáp. Plánovanie je na začiatku každého projektu a súvisí so stanovením potrieb cieľovej skupiny (napr. zákazníka), zhromaždenie potrebného hardvéru, softvéru a personálu, ako aj definovanie plánu projektu. Potom nasleduje príprava podkladov, získanie potrebných povolení pre zber dát, digitalizácia analógových podkladov. Vlastné získanie dát nasleduje až v tretej etape, keď sa realizuje zameranie objektov záujmu v krajine (mapovanie) a záznam potrebných atribútov o objektoch. S tým nevyhnutne súvisí súradnicové priradenie geodát alebo ich kartografické transformácie, tak aby výsledné dáta boli dodané v požadovanom kartografickom systéme. Môže sa realizovať pred zberom dát (napr. oskenovaná mapa sa pred vektorizáciou v počítači súradnicovo priradí - georeferencuje), počas zberu (napr. GPS zaznamenáva súradnice v systéme WGS 1984), alebo po zbere (napr. súradnice WGS 1984 sa transformujú do systému JTSK). Štvrtou etapou procesu zberu geodát je ich editovanie, kontrola a opravy. Zahŕňa stanovenie chyby merania, chyby atribútov, topologické chyby. Taktiež sa k získaným geodátam zaznamenávajú metadáta, ktoré sú informáciou o metóde ich zberu, autorských a legislatívnych vzťahoch, kartografickom systéme a pod. Napokon v poslednej, piatej fáze dochádza k vyhodnoteniu projektu za účelom stanovenia potrebných doplnkových úloh. Uvedené etapy sú často iteratívne a teda v priebehu riešenia projektu sa zopakujú.

Digitálne modelovanie zemského povrchu úzko súvisí s GIS, nakoľko toto prostredie zahŕňa množstvo nástrojov potrebných pre spracovanie výškových údajov, tvorbu modelu, ako aj jeho analýzu a tvorbu vizualizácií. Tvorba modelov reliéfu je však možná aj na platforme počítačového dizajnu (CAD). Výhodou GIS prostredia je však možnosť integrácie viacerých typov priestorových údajov a modelovania krajiny, pri ktorom sú potrebné tieto údaje.

2.2 Tradičné geodetické meranie - tachymetria

Tachymetrické meranie patrí medzi najstaršie geodetické metódy používané od staroveku. Je založené na princípe určovania polohy bodu pomocou merania uhlov a vzdialeností z bodov so známou polohou. Pôvodne využívané teodolity, nivelačné prístroje a meracie pásma sú v súčasnosti nahradené elektrooptickými zariadeniami - tzv. totálnymi stanicami, ktoré umožňujú merať uhly aj vzdialenosti s presnosťou až 1 mm. Totálna stanica v sebe integruje laserový diaľkomer, optický teodolit a počítačovú jednotku, v ktorej sa vykonáva spracovanie meraných geometrických veličín do požadovanej podoby

súradníc, uhlov, vzdialeností a pod. Meranie vykonávajú zvyčajne dve osoby, jedna obsluhuje merací prístroj a druhá sa pohybuje v teréne s odrazným terčom, ktorý sa umiestňuje na merané miesto alebo objekt. Existujú však aj tzv. jednoosobové stanice (Obr. 2.1) vybavené automatickým sledovaním terča, ktoré dokáže na diaľku plne obsluhovať iba jedna osoba. Diaľkové ovládanie umiestnené na tyči so zrkadlovým hranolom (terčom) umožňuje jednej obsluhujúcej osobe ovládanie stanice, ktorá automaticky sleduje hranol. Namerané dáta sa priamo prenášajú do laboratórneho počítača, prípadne priamo do GIS prostredia pre ďalšie spracovanie. Pre zákryty je zvyčajne nutné stanicu premiestniť na niekoľko stanovísk a presuny merača medzi meranými bodmi taktiež vyžadujú čas. Z toho dôvodu je tachymetrické meranie pomalé a pomerne drahé, preto je vhodné pre mapovanie menších oblastí alebo menšieho počtu objektov. Na druhej strane umožňuje získať dáta s milimetrovou presnosťou. Z hľadiska zberu dát pre GIS sa geodetické merania využívajú najmä na domeranie, resp. na získavanie dát v oblastiach neprístupných pre GNSS a leteckú fotogrametriu (napr. v lese alebo v zastavaných oblastiach). Pri mapovaní teodolitom alebo totálnou stanicou v lokálnej sieti sa priamo merajú ortometrické výšky. Taktiež pre prepočet do národného výškového systému (napr. B.p.v.) je potrebné použiť transformačné kľúče na prepočet do normálnych (Molodenského) výšok. Podrobne sa o princípoch geodetického merania možno dozvedieť z prác Sütti (1987) alebo Banister et al. (1998).



Obr. 2.1: Totálna stanica TPS 1200+ od firmy Leica Geosystems s hranolom na výtyčke s diaľkovým ovládaním stanice pre jednoosobový režim merania.

2.3 Globálne navigačné satelitné systémy

V súčasnosti ide o veľmi populárny spôsob určovania polohy pre vysokú presnosť merania porovnateľnú s elektronickou tachymetriou (niekoľko milimetrov), lenže s oveľa vyššou efektivitou zberu dát. K meraniu pomocou GNSS postačuje jedna osoba, ktorá postupne prechádza mapovaným územím a zaznamenáva súradnice bodov, línií alebo areálov. Súradnice sú automaticky ukladané vo zvolenom kartografickom systéme. Existuje viacero globálnych systémov (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU), avšak princíp fungovania je rovnaký (Tab. 2.2). GNSS tvoria tri segmenty: *satelitný, kontrolný a užívateľský segment*. Sieť satelitov v okolí Zeme vysiela signál obsahujúci dáta (napr. o vlastnej polohe a čase) pre presné určenie polohy zariadení prijímajúcich tento signál (prijímače) pomocou geografickej šírky (angl. latitude), geografickej dĺžky (angl. longitude) a nadmorskej výšky

(angl. height, elevation). Pre určenie polohy kdekoľvek na Zemi potrebuje GNSS na orbite 20-30 satelitov rozmiestnených tak, aby boli nad obzorom pozorovateľa aspoň 4 satelity.

Tab. 2.2: Prehľad parametrov existujúcich a budovaných GNSS.

Názov GNSS	Prevádzkovateľ	Plná funkčnosť	Počet orbitálnych dráh	Orbitálna výška nad Zemou	Počet aktívnych satelitov	Zdroj informácií
NAVSTAR GPS	USA	od 1994	6	20 200 km	24	http://www.gps.gov
GLONASS	Rusko	od 1996	3	19 100 km	24	https://glonass-iac.ru/en
Galileo	EÚ a ďalšie krajiny	od 2020	3	23 222 km	30	http://www.gsa.europa.eu
BeiDou (Compass)	Čína	od 2020	3 3	21 500 km 36 000 km	30 5	http://en.beidou.gov.cn

Princíp fungovania GNSS je v meraní času, ktorý uplynie medzi vyslaním signálu zo satelitu a prijatím signálu prijímaču na Zemi. Každý GNSS satelit vysiela jedinečný signál, ktorý informuje GNSS prijímač o čase na satelite. Každý satelit má tiež jedinečnú polohu na obežnej dráhe vo vesmíre. GNSS satelity vysiela navigačné správy, z ktorých možno určiť ich polohu na obežnej dráhe a čas. GNSS prijímač tak pozná teoretickú polohu všetkých GNSS satelitov a vie, kde by mali byť. Prijímač pozná svoj čas meraný na Zemi a pozná čas vyslania signálu každým satelitom nad obzorom. Na základe týchto informácií o čase a teoretickej polohe satelitov (x_i, y_i, z_i), pričom $i=(1, 2, 3, 4)$, dokáže prijímač určiť časový rozdiel medzi vyslaním a prijatím signálu jednotlivými satelitmi t_{r1}, t_{r2}, t_{r3} . Pri známej rýchlosti šírenia sa svetla vo vákuu ($c = 299\,792\,458\text{ m.s}^{-1}$) sa tak dá vypočítať vzdialenosť k satelitom (R_1, R_2, R_3). Výpočet polohy prijímača využíva *princíp trilaterácie* pomocou priesečníkov guľových plôch reprezentujúcich vzdialenosti medzi prijímačom a satelitmi. Teoreticky postačujú pre určenie polohy bodu so súradnicami (x_p, y_p, z_p) v 3D priestore 3 body (Obr. 2.2):

$$\begin{aligned}
 R_1 &= t_{R1} \cdot c = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 + (z_1 - z_p)^2} \\
 R_2 &= t_{R2} \cdot c = \sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2 + (z_2 - z_p)^2} \\
 R_3 &= t_{R3} \cdot c = \sqrt{(x_3 - x_p)^2 + (y_3 - y_p)^2 + (z_3 - z_p)^2}
 \end{aligned}$$

Po zhromaždení signálov z troch satelitov je v rámci súradnicového systému GNSS možné presne určiť iba dve súradnice prijímača (zemepisnú šírku a dĺžku). Pre rozdielnu presnosť merania času hodinami na satelite a v prijímači vzniká časová odchýlka (ΔT), ktorá je ďalšou, štvrtou neznámou. Pre určenie tretej súradnice (z_p), ktorou je výška prijímača nad referenčnou plochou elipsoidu (elipsoidická výška) alebo hladinou mora (nadmorská výška), je potrebné zistiť vzdialenosť k ďalšiemu satelitu. *V skutočnosti teda pre lokalizáciu objektov v 3D priestore pomocou GNSS potrebujeme prijímať signál aspoň zo 4 satelitov.*

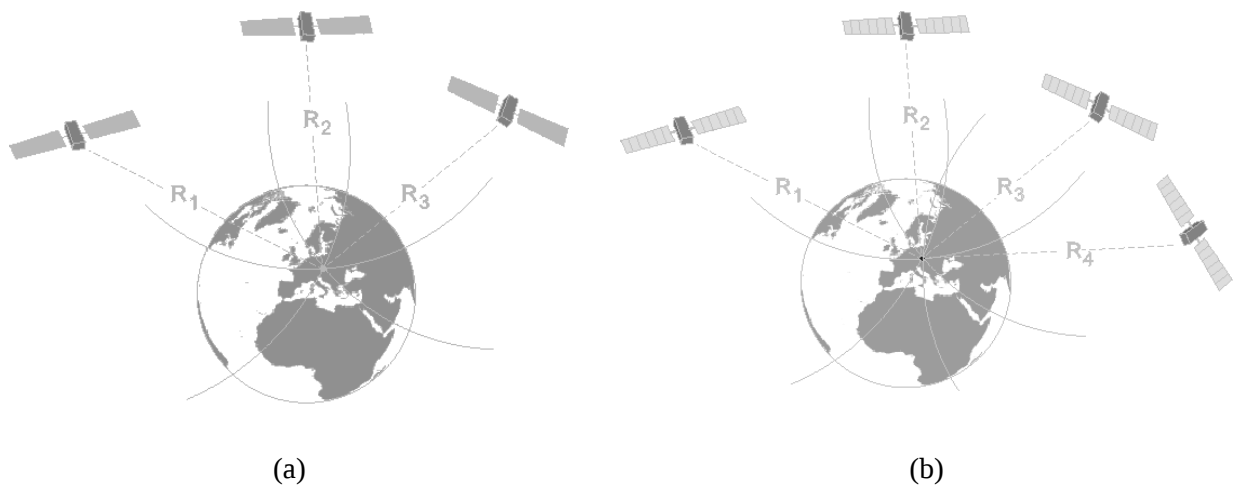
$$R_1 = t_{R1} \cdot c = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 + (z_1 - z_p)^2} - c \cdot \Delta T$$

$$R_2 = t_{R2} \cdot c = \sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2 + (z_2 - z_p)^2} - c \cdot \Delta T$$

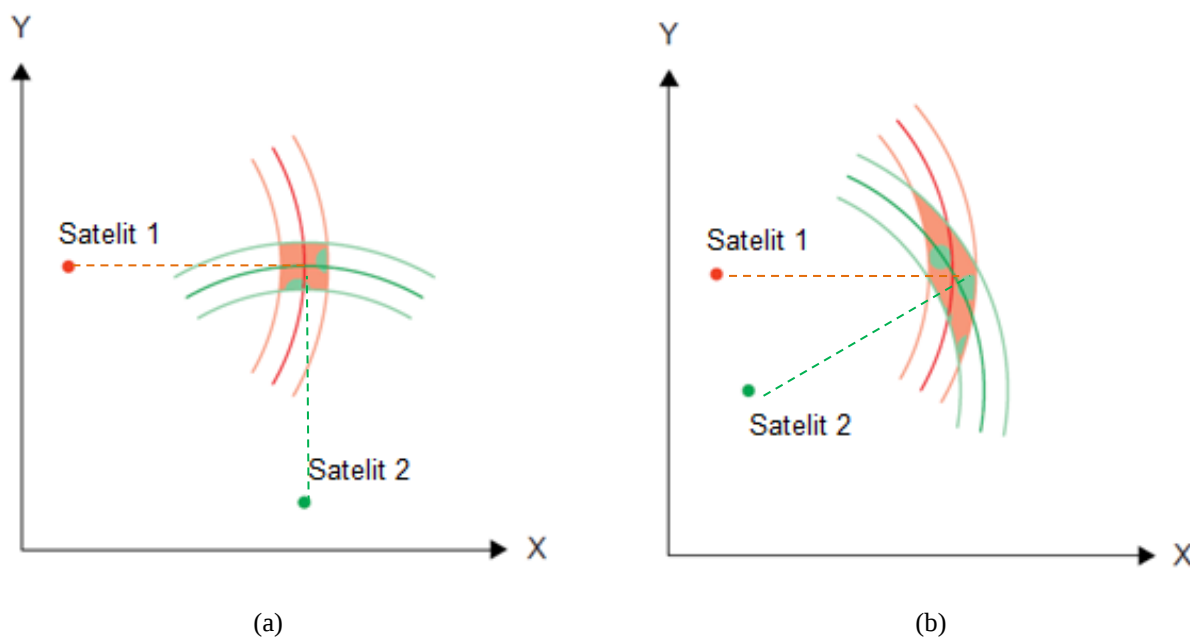
$$R_3 = t_{R3} \cdot c = \sqrt{(x_3 - x_p)^2 + (y_3 - y_p)^2 + (z_3 - z_p)^2} - c \cdot \Delta T$$

$$R_4 = t_{R4} \cdot c = \sqrt{(x_4 - x_p)^2 + (y_4 - y_p)^2 + (z_4 - z_p)^2} - c \cdot \Delta T$$

Počet a rozmiestnenie viditeľných satelitov ovplyvňuje presnosť a rýchlosť merania. Indikátorom kvality konštelácie satelitov na oblohe je bezrozmerný parameter zhoršenia presnosti (PDOP, angl. Positional Dilution Of Precision). Jeho efekt zjednodušene v dvojdimenzionálnom prevedení znázorňuje Obr. 4.3. Vzdialenosť medzi prijímačom a satelitom je naznačená prerušovanou čiarou a neurčitosť merania zónou neurčitosti okolo výseku kružnice (tenká čiara). Poloha prijímača je kdesi v ploche ohraničenej prienikom zón neurčitosti merania vzdialenosti zo satelitu 1 a 2. Zhoršenie presnosti (DOP) má výraznejší vplyv na určenie polohy prijímača v prípade na Obr. 2.3b, pretože plocha prieniku zón neurčitosti jednotlivých satelitov je väčšia ako na Obr. 2.3a. Hlavným obmedzením pri mapovaní s GNSS je, že prijímač musí mať nezakrytý výhľad na minimálne 3 satelity a v prípade určovania nadmorskej výšky na 4 satelity. To býva problémom v zónach vysokej stromovej vegetácie a v zastavaných územiach s vysokými budovami.



Obr. 2.2: Princíp trilaterácie - na základe známych vzdialeností (R_1, R_2, R_3) k trom bodom (družiciam) je teoreticky možné určiť súradnice neznámeho bodu v 3D priestore (a). V skutočnosti pre lokalizáciu objektov v 3D priestore pomocou GNSS potrebujeme avšak prijímať signál aspoň zo 4 satelitov (b).



Obr. 2.3: Vplyv priestorového rozmiestnenia GNSS satelitov na zhoršenie presnosti určenia polohy (PDOP) v 2D priestore (v rovine). V prípade (a) je hodnota PDOP nižšia (presnosť merania je vyššia) ako v prípade (b).

Na otvorených priestranstvách je zvyčajne nad horizontom k dispozícii 6-10 satelitov v rámci jedného navigačného systému (napr. GPS). Podrobne sa princípom GNSS venuje napr. Pisca (2005) alebo Rapant (2002).

V súčasnosti je možné využívať signál z dvoch plne funkčných globálnych satelitných systémov (Tab. 4.2). Najpopulárnejším je Globálny polohový systém známy ako GPS. Presný názov je NAVSTAR GPS (NAVigation Signal for Timing And Ranging Global Positioning System) a tento systém je spravovaný letectvom armády USA. Ruská letecké obranné sily spravujú systém GLONASS (GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistema). Na rozdiel od GPS a GLONASS, Európska únia v spolupráci s ďalšími krajinami buduje systém Galileo, ktorý má fungovať ako civilný systém. Jeho spustenie v plnej funkcionalite sa však pre zložité financovanie už viackrát oddialilo. Čína má ambíciu rozšíriť svoj regionálny systém BeiDou na globálny systém pokrývajúci celú Zem. Okrem čínskeho BeiDou existujú ďalšie regionálne navigačné systémy ako indický IRNSS a japonský QZSS, ktoré pomáhajú spresňovať navigáciu v regióne týchto krajín a dopĺňajú funkcionalitu globálnych systémov GPS a GLONASS.

Globálny polohový systém, taktiež Globálny systém určenia polohy (GPS) je v súčasnosti významným zdrojom geografických dát, preto sa mu v nasledujúcej stati venujeme podrobnejšie. USA ho budovali od 70. rokov 20. storočia a v plnom operačnom režime je od roku 1994. Využitie GPS ďaleko presahuje sféru GIS-ov a okrem pôvodných vojenských aplikácií zasahuje napr. aj do turistiky a motorizmu. GPS tvorí sieť 24 až 32 satelitov NAVSTAR, viacerých kontrolných a monitorovacích staníc a individuálnych prijímačov. Poloha meraného bodu sa určuje voči referenčnému elipsoidu WGS1984, ktorý aproximuje skutočný tvar Zeme. GPS pôvodne vznikol pre potreby armády USA a veľa rokov mala prístup k presným dátam len americká armáda. Toto obmedzenie bolo odstránené v roku 2000, takže v súčasnosti všetci používatelia systému môžu relatívne ľahko a so štandardným vybavením získať merania s chybou menšou ako 10 m (Longley et al., 2011). Rozhodnutie prezidenta a vlády Spojených štátov 1. mája 2000 zrušiť selektívnu dostupnosť GPS signálu (angl. Selective Availability - S.A.), ktorou sa umelo zhoršovala presnosť určenia polohy pre verejnosť, prinieslo doslova revolúciu v mapovaní a navigácii, čo priamo stimulovalo ďalšie aplikácie GIS.

Určovanie vzdialenosti medzi prijímačom a satelitmi je pri GNSS vykonávané dvomi základnými spôsobmi. Prvý je určovanie vzdialenosti tzv. kódovým meraním a druhým spôsobom je meranie fázy nosnej vlny. Predstavíme stručný úvod k týmto metódam s uvedením parametrov pre americký GPS. Viac informácií uvádza Sickles (2001), El-Rabbany (2002), Rapant (2002) alebo Piska (2005). Kódové a fázové merania sa odlišujú v spôsobe spracovania signálu šíreného z družíc GPS. GPS družice vysielajú dva rádiové signály s rôznymi frekvenciami nazývanými L1 (1575,42 MHz) a L2 (1227 MHz) signály. Zodpovedajú im vlnové dĺžky 19 cm a 24 cm. Moduláciou signálov L1 a L2 sa na ich frekvenciách vysielajú kód s inou frekvenciou (frekvencia modulácie). Preto sa signály nazývajú aj nosné vlny (carrier wave). Vysielané sú dva typy kódu: C/A kód (angl. coarse acquisition, 1,023 MHz, vlnová dĺžka 300 m) a P-kód (angl. precise, 10,23 MHz, vlnová dĺžka 3 m) s desaťkrát vyššou frekvenciou modulácie ako C/A kód. P-kód je však oveľa zložitejšie dekódovateľný ako C/A kód a je vyhradený pre účely armády Spojených štátov. Armáda ho môže kedykoľvek zašifrovať, potom sa nazýva Y-kód.

Kódové meranie využíva pseudonáhodný kód, ktorý je jedinečný pre každý spomedzi GPS satelitov. V podstate ide o sekvenciu pulzov znamenajúcich 0 a 1. GPS prijímač pozná algoritmy generujúce tieto kódy (ako jedinečné hudobné skladby) a generuje sám pre seba ich repliky približne synchronne so satelitmi. Potom čo prijímač zachytí z daného satelitu jeho kód, sa tento nezhoduje so svojou replikou v prijímači, pretože vzniká časový posun medzi vyslaním kódu zo satelitu a jeho zachytením v prijímači. Prijatý kód a jeho replika sa vzájomne posúvajú dovtedy, kým sa nezistí zhoda, z čoho možno určiť spomenutý časový posun. Pri známej rýchlosti šírenia elektromagnetického signálu je potom možné jej vynásobením s hodnotou časového posunu vypočítať vzdialenosť ku GPS satelitu, ktorú nazývame nepravá vzdialenosť (angl. pseudorange). Dôvodom je, že jej výpočet nezahŕňa vyrovnanie chyby vznikajúcej v dôsledku menej presného merania času v prijímači v porovnaní s presnými atómovými hodinami na družici, ďalej chyby v dôsledku spomalenia signálu pri prechode atmosférou a ďalšie faktory (Tab. 2.3). Presnosť kódového merania je približne na úrovni 1% vlnovej dĺžky modulácie nosnej vlny Sickles (2001). Pri C/A kóde možno teda dosiahnuť maximálnu presnosť 3 m a pri P kóde presnosť 0,3 m.

Meranie fázy nosnej vlny (angl. carrier-phase measurement) je založené na zisťovaní fázového rozdielu nemodulovaného L1 a L2 signálu porovnávaním s ich replikou generovanou GPS prijímačmi. V dôsledku časového posunu medzi vyslaním a prijatím signálu z družice vzniká posun signálu a jeho repliky (fázový posun), podobne ako posun kódu pri kódovom meraní. Vzdialenosť medzi družicou a prijímačom možno určiť ako sumu celých cyklov vlny a frakcie, ktorú vyjadruje fázový rozdiel, vynásobenú rýchlosťou šírenia sa svetla vo vákuu. Zatiaľ čo dĺžku zodpovedajúcu fázovému rozdielu možno určiť veľmi presne, počet celých cyklov je potrebné zisťovať komplikovanými algoritmami a postupmi. Vzhľadom na to, že signál L1 a L2 má oveľa kratšiu vlnovú dĺžku, je fázové meranie presnejšie ako kódové. Teoreticky možno použitím pravidla o 1% z vlnovej dĺžky dosiahnuť fázovým meraním presnosť 1,9 mm pre signál L1 a 2,4 mm pre signál L2.

Moderné GNSS prijímače môžu prijímať naraz signál z rôznych GNSS systémov (napr. GPS a GLONASS) a tak zvýšiť presnosť merania. V geodézii pri meraní na otvorených priestranstvách GNSS prijímače vytláčajú totálne stanice. Navigácia s presnosťou niekoľkých metrov je možná aj vďaka lacným GNSS čipom v tabletoch a smartfónoch. GNSS prijímače sa odlišujú aj počtom kanálov, pomocou ktorých prijímajú signál zo satelitov. Modernjšie prístroje sú aspoň 12-kanálové, t.j. môžu komunikovať aspoň s 12 satelitmi naraz. Lacnejšie GPS zariadenia (napr. turistické GPS, PDA GIS zariadenia, smartfóny) určujú polohu pomocou kódového merania, zatiaľ čo drahšie prijímače určené pre presnú geodéziu a navigáciu pracujú na princípe fázového merania vzdialenosti (Obr. 2.4). GNSS sa využívajú najmä na získanie polohy referenčných bodov pre diaľkový prieskum Zeme a lokalizáciu bodových, líniových a plošných objektov nielen v geodetických úlohách, ale vo všetkých oblastiach vedy a praxe. Z hľadiska mapovania krajiny je veľmi dôležité použitie GNSS pre presné určenie polohy leteckých zariadení nesúcich snímače DPZ. Nahrádza sa tak nevyhnutnosť zamerania kontrolných bodov na zemskom povrchu a šetrí sa čas i finančné zdroje potrebné pre nasnímanie územia.

Určovanie výšok sa vzťahuje na výškový systém používaný v danej krajine. Pri meraní pomocou GNSS sa primárne určuje zemepisná šírka, zemepisná dĺžka a elipsoidické výšky nad elipsoidom WGS1984 fixovanom ku gravitačnému stredu Zeme. GNSS prijímač má väčšinou uložený model geoidu vhodný pre danú krajinu (SK-geoid, AUSGEIOD98) alebo globálny model geoidu s menším priestorovým rozlíšením (DMA 10x10, EGM96), ktoré využíva pre prepočet elipsoidických výšok na nadmorské výšky (ortometrické). Pre prevod polohy WGS1984 do národných geodetických systémov a projekčných kartografických systémov prijímač GNSS navyše používa transformačné kľúče, vďaka ktorým určuje súradnice v národnej súradnicovej sieti. Nastavenie treba pri meraní GNSS poznať a prekontrolovať vzhľadom na územie, v ktorom sa mapovanie realizuje.

Presnosť určovania polohy pomocou GNSS závisí aj od použitia rôznych techník, ktoré sa odlišujú z hľadiska potrebnej dĺžky observácie družíc prijímačom, počtom prijímačov, parametrov ich antény a ďalších. Presnosť určovania polohy pomocou GNSS je ovplyvnená viacerými faktormi. Ich významnosť pre GPS uvádza Tab. 2.3. Najväčší vplyv majú vlastnosti atmosféry, ďalej odrazy signálu od viacerých zdrojov, drobné výkyvy polohy satelitov, nepresnosti v prijímačoch a v meraní času. Presnosť GNSS meraní je možné výrazne zvýšiť diferenciálnym určovaním polohy, ktoré sa v súvislosti s GPS označuje ako D-GPS. Pri tomto spôsobe merania sa používajú dva prijímače. Jeden je počas merania pevne umiestnený (báza, referenčná stanica) a druhý sa používa na zber dát (rover) (Obr. 2.4c). Obe prijímače synchronne určujú svoju polohu. Presná poloha bázy je známa alebo sa musí vopred určiť. Báza určuje odchýlky (diferencie) svojej polohy v čase t vzhľadom na známu presnú polohu. Odchýlky možno aplikovať pre spresnenie polohy rovera v rovnakých časových momentoch t . Merania pomocou DGPS obsahujú chyby menšie ako 1 m, s viacfrekvenčnými geodetickými prijímačmi je možné dosiahnuť až milimetrové presnosti v meraní polohy. Odchýlky sa k roveru môžu vysielat' v reálnom čase (angl. Real Time Kinematic - RTK), alebo sa pomocou špeciálneho softvéru po skončení meraní spracujú dáta z oboch prijímačov a odstránia sa chyby (angl. post-processing).



(a)



(b)



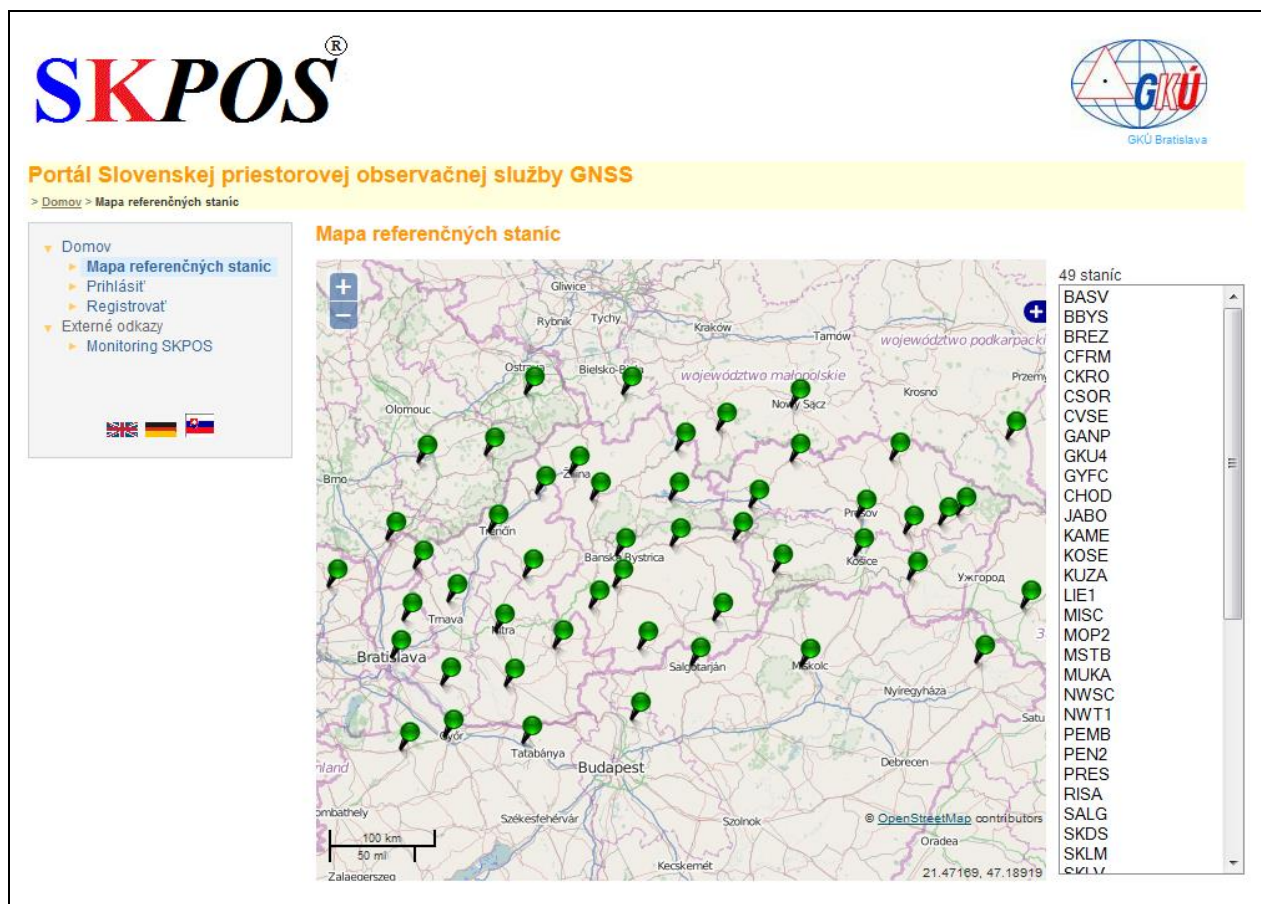
(c)

Obr. 2.4: Rôzne typy GNSS prijímačov: ručné PDA GIS prijímače od Trimble (a) Juno SB s menej presnou a (b) GeoXT s presnejšou anténou, (c) zostava dvoch presných geodetických GNSS prijímačov TOPCON Hyper II pre diferenciálne určovanie polohy.

V mnohých krajinách sa dáta potrebné na korekciu chýb šíria rozhlasovými vysielacími, čo umožňuje okamžite, t.j. už počas meraní, výrazne spresniť spresniť merania. Príkladom takejto DGPS služby je zdarma dostupný EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), ktorý je európskou aplikáciou SBAS (Satellite-Based Augmentation System). Pre presné geodetické merania bola v SR vybudovaná sieť permanentných staníc SKPOS (Slovenská priestorová observačná služba) využívajúca 49 referenčných staníc, z ktorých 17 je mimo územia SR (Obr. 2.5). Prevádzkovateľom služby je Geodetický a kartografický ústav SR a jej použitie je poplatné. Diferenciálne meranie pomocou siete SKPOS a GNSS prijímačov umožňuje určenie polohy na úrovni 0,25 m (pri kódovom meraní) a 0,015 m (pri fázovom meraní).

Tab.2.3: Zdroje chýb v GPS meraniach. Zdroj: <http://www.trimble.com/>

Chyba merania z jedného satelitu [m]	Štandardné GPS	Diferenciálne GPS
Satelitné hodiny	1,5	0
Orbitálne chyby	2,5	0
Ionosféra	5,0	0,4
Troposféra	0,5	0,2
Šum prijímača	0,3	0,3
Odraz signálu	0,6	0,6



Obr. 2.5: Rozmiestnenie referenčných staníc SKPOS pre diferenciálne GNSS určovanie polohy. Zdroj: <http://www.skpos.gku.sk/>

2.4 Fotogrametria

Vedecko-technická disciplína, ktorá sa venuje priestorovým meraniam a geometrickej analýze krajiny pomocou fotografického záznamu sa nazýva fotogrametria. Z hľadiska zdroja EMG žiarenia ide o pasívnu metódu DPZ. Fotografický záznam patrí medzi prvé technológie využité za účelom diaľkového prieskumu Zeme. Prirodzene sa nástup fotogrametrie odvíjal od vynájdenia princípu fotografickej komory a záznamu na svetlomitlivý papier v prvej polovici 19. storočia, ako aj od prvých úspechov v letectve na prelome 19. a 20. storočia. Analýze snímok vyhotovených z leteckých nosičov sa venuje letecká fotogrametria (angl. long-range / aerial photogrammetry). Snímky získané pozemným fotografovaním analyzuje blízka (pozemná) fotogrametria (angl. close-range photogrammetry). Princípy sú si v oboch prípadoch podobné a vychádzajú z rekonštrukcie skutočných objektov na báze stereoskopického videnia. Základnými meranými veličinami sú poloha objektov, vzdialenosť medzi nimi, rozmery objektov, nadmorská výška, prevýšenie, plocha. Základným produktom fotogrametrie sú *letecké meračské snímky*, ktoré sú získavané kalibrovanými fotografickými prístrojmi, tzv. *fotogrametrickými kamerami*. Snímky sú v podstate fotografie, ktoré majú presne dané rozmery a navyše na okrajoch obsahujú rámové značky pre určenie geometrického stredu snímky. Ďalej sú na nich uvedené údaje o lete, dátume, čase a poradí vyhotovenia snímky, nadmorskej výške letu, náklone a ohniskovej vzdialenosti kamery, prípadne aj ďalšie údaje o parametroch kamery. Letecké meračské snímky sú významným zdrojom dát pre veľkomierkové mapovanie. Aj v minulosti sa používali pre tvorbu a aktualizáciu máp vrátane štátnych mapových diel. Z leteckých snímok je možné získať informáciu o reliéfe, stave pôdnej a lesnej pokrývky, či prvkoch urbánnej krajiny (Boltižiar, 2007). Z hľadiska mapovania a použitia v GIS-e sú najdôležitejšie vertikálne snímky, pri ktorých sa povrch Zeme sníma fotografickým prístrojom v kolmici na horizontálnu rovinu. Podrobnejšie teóriu fotogrametrie a jej využitie rozoberajú skriptá Bitterer, L. (2005) alebo Čerňanský et al. (2013).

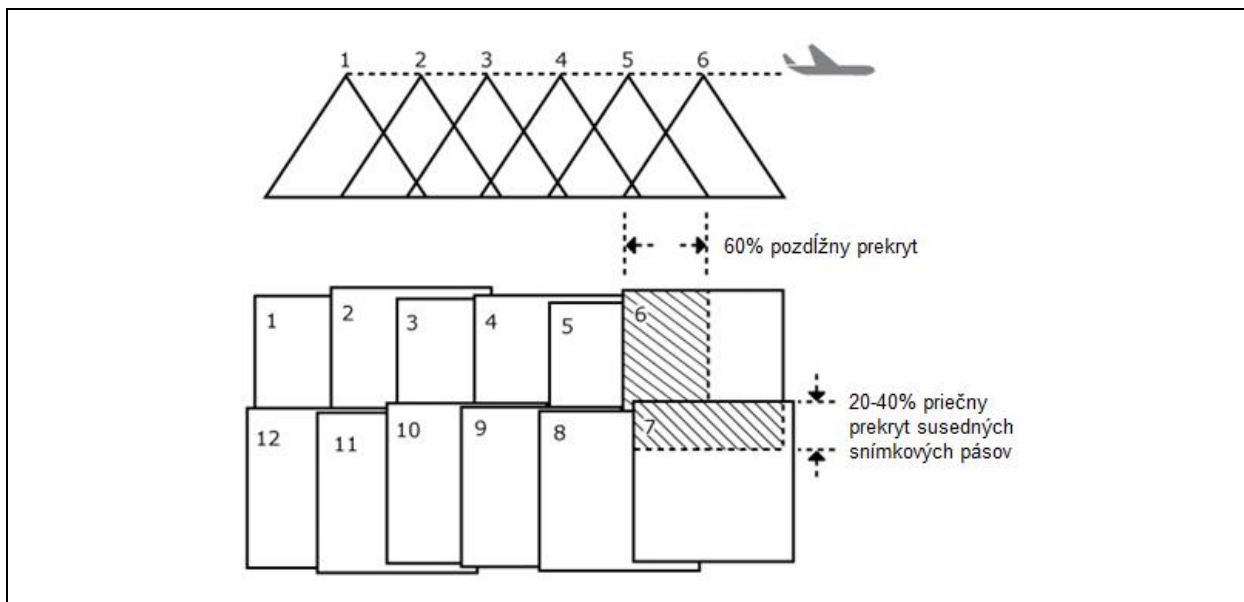
Spracovaním leteckých snímok vznikajú ortofotosnímky, ortofotomapy, tematické dáta odvodené zo snímok (napr. krajinná pokrývka), digitálne výškové modely, alebo trojdimenzionálne (3D) modely budov. Podmienkou tvorby týchto dát sú stereopáry fotografií s dostatočným vzájomným prekrytom (cca 60% medzi snímkami a 30% medzi letovými dráhami) (Obr. 2.6). Z územia prekrytu možno rekonštruovať priestorový 3D model a získať tak 2D a 3D dáta. Obr. 2.7 znázorňuje určenie polohy objektov pomocou stereoskopického premietania. Dve snímky s vertikálnym uhlom pohľadu zachytávajú územie s výrazným prevýšením, ktoré medzi bodmi C a D podmieňuje relatívny posun (parallaxu x) ich obrazu c , d a c' , d' na snímkach. Meraním tohto posunu možno získať polohu bodov v 3D priestore za predpokladu, že poznáme vzdialenosť miest expozície snímok B a ohniskovú vzdialenosť kamery f (konštanta kamery). Z územia prekrytu tak možno rekonštruovať skutočné rozmery a polohu objektov. Pre parallaxu p_{xc} bodu C určovanú v smere osi x platí:

$$p_{xc} = x_c - x'_c,$$

a potom výšku h_c bodu C možno vypočítať podľa:

$$h_c = H - B \cdot f / p_{xc},$$

kde H je výška letu nad referenčnou plochou (napr. nad morom).

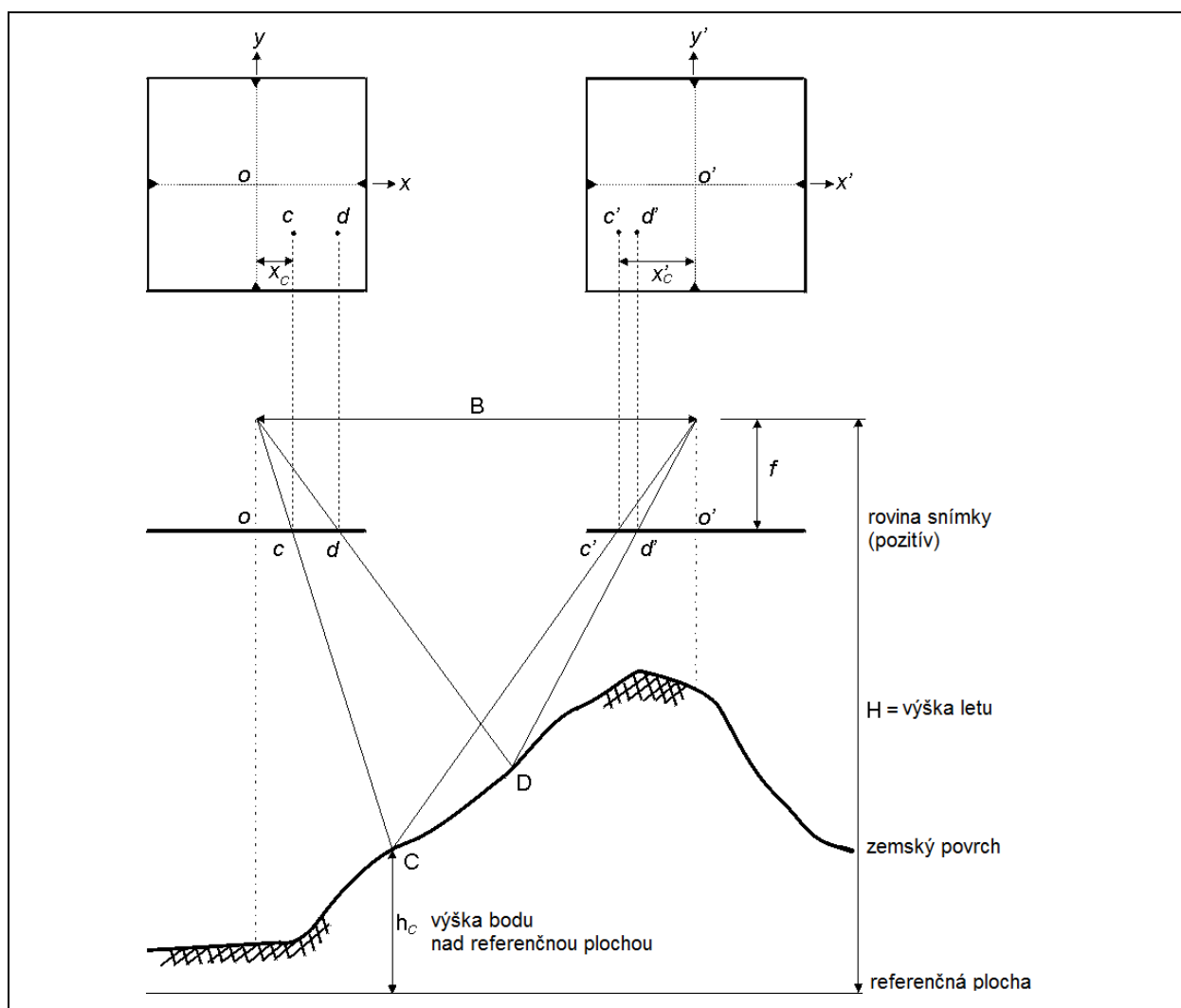


Obr. 2.6: Mozaika prekrývajúcich sa leteckých snímok s poradím vyhotovenia počas letu.

Rozsah územia zachytenom na snímke sa zväčšuje s výškou letu avšak priestorové rozlíšenie snímky klesá. Voľba letových parametrov závisí od účelu mapovania, veľkosti územia, požadovaného rozlíšenia a parametrov kamery. Fotogrametrický prieskum sa vykonáva v prípade pilotovaných lietadiel (Obr. 2.8a) alebo helikoptér vo výškach na úrovni niekoľkých stoviek metrov až kilometrov nad terénom. V súčasnosti sa do popredia dostávajú malé bezpilotné letecké systémy (angl. Unmanned Aerial Systems, UAS) s kompaktnými digitálnymi kamerami, ktorými možno mapovať malé územia z menších výšok, vo veľmi vysokom rozlíšení (Obr. 2.8b) (Sládek a Rusnák, 2013). Nalietavanie územia sa zvyčajne vykonáva v smere východ-západ alebo opačne, najmä z dôvodu minimalizácie efektov oslnenia (napr. tieň).

Spracovanie leteckých snímok a tvorba ortofotomapy

Až do nedávnej minulosti sa snímky zaznamenávali analógovo, teda na fotografický film, a uchovávali sa ako jeho negatívy, resp. pozitívy alebo fotografie (staršie formáty 180 x 180 mm, novšie 230 x 230 mm). V poslednom desaťročí analógové snímkovanie úplne nahradil digitálny záznam svetlocitlivými čipmi (CCD alebo CMOS) digitálnych meračských kamier, ktoré produkujú digitálny obrazový záznam v rastrovom formáte. Pre masové spracovanie analógových leteckých meračských snímok sa pred nástupom výkonnej počítačovej techniky využívali stereoplotre (Obr. 2.9a). V súčasnosti sa merania vykonávajú na *digitálnych fotogrametrických staniciach*, ktoré zahŕňajú výkonný hardvér, 3D monitor a 3D myš (Obr. 2.9b). Spracovanie analógových snímok v počítačovom prostredí predpokladá ich digitalizáciu na skeneroch. Prvotným krokom pri spracovaní leteckých snímok je ich správna orientácia. Najprv sa vykoná *vnútorná orientácia* (angl. interior orientation) individuálne pre každú snímku a potom sa snímky na základe niekoľkých identických bodov zorientujú vzájomne. Tak vznikne snímková mozaika, ktorú je potrebné zorientovať vzhľadom na kartografický systém (napr. SJTSK). Tento proces sa nazýva *vonkajšia orientácia* (angl. exterior orientation). Súradnicové priradenie snímky (georeferencovanie) vyžaduje použitie referenčných (vlicovacích) bodov, ktoré možno jednoznačne určiť na snímkach a presne zamerať v teréne. Zameranie sa realizuje väčšinou pred samotným letom použitím GNSS alebo tachymetricky. Celý proces vnútornej a vonkajšej orientácie uľahčujú v súčasnosti prijímače GNSS a merače náklonu fotogrametrickej kamery (inerciálny merací systém, skr. IMS). Obidva typy zariadení kontinuálne pre každú expozíciu snímky zaznamenávajú polohu kamery v kartografickom súradnicovom systéme a jej náklon vzhľadom na osi x, y, z. Tieto parametre spoločne s parametrami kamery (ohnisková vzdialenosť, skreslenie objektívu, rozmer snímok) možno potom použiť pre automatickú orientáciu snímok v príslušnom softvéri. Ako príklad uvádzame Photomod od f. Racurs, Geomatica od f. PCI Geomatics, Inpho od f. Trimble.



Obr. 2.7: Premietanie obrazu a určenie polohy objektov v rámci prekrytu v stereopáre snímok s vysvetlením v texte. Upravené podľa: Lillesand et al. (2008)



(a)



(b)

Obr. 2.8: Letecké nosiče pre fotogrametrický prieskum. (a) Lietadlo Piper s pilotom a (b) diaľkovo ovládateľný bezpilotný systém DJI Phantom 2. Zdroj: (a) Photomap, s.r.o., (b) Ústav geografie PF UPJŠ v Košiciach

Pre nízkonákladovú fotogrametriu na báze malých bezpilotných systémov možno využiť progresívnu technológiu „structure-from-motion“, ktorú implementuje softvér Photoscan od f. Agisoft alebo voľne šíriteľný VisualSFM od Changchang Wu.

Zorientovaním snímok vzniká optický 3D model územia, na ktorom sa vyhodnocuje obrazová a 3D geometrická informácia. Vektorové objekty sa extrahujú z územia prekrytu stereosnímkov pomocou procesu, ktorý je podobný 2D vektorizácii, avšak s tým rozdielom, že sa získava aj výšková súradnica z, ktorá vyžaduje 3D kurzor (ukazovátka). Operátor pre zabezpečenie 3D vnemu využíva počas vyhodnocovania 3D okuliare. Existujú však aj automatizované postupy získavania 3D dát nevyžadujúce zásah operátora. Fotogrametrické metódy sú najvhodnejšie pre vektorizáciu plošných líniových a bodových objektov ako sú budovy, dopravná infraštruktúra, krajinná pokrývka, terénne hrany, body na teréne. Z bodových a líniových prvkov na reliéfe možno odvodiť digitálne modely reliéfu (DMR) v podobe nepravidelných trojuholníkových sietí (TIN) alebo v rastrovom formáte. Popri vektorových dátach a DMR sú významným produktom spracovania leteckých snímok ortofotosnímky a ortofotomapy v rastrovom dátovom formáte.

Leteckú snímku nemožno priamo použiť pre meranie dĺžok, plôch a smerov tak ako klasickú mapu. Letecká snímka má, na rozdiel od mapy, centrálnu projekciu. Obraz vzniká premietaním cez jeden bod, ktorým je ohnisko kamery. Z toho dôvodu sú objekty na snímke skreslené, čo sa zvyrazňuje smerom k okrajom snímky. Obraz je odklonený od stredu premietania. Ukazuje to Obr. 2.10a, ktorý je výrezom leteckej snímky a stred premietania je v jeho dolnej časti. Vysoké objekty (napr. bytovky, stromy) sa so vzrastajúcou vzdialenosťou od stredu premietania od neho väčšími odkláňajú, hoci v tomto prípade sú bytovky rovnako vysoké. Toto geometrické skreslenie sa zvyrazňuje pri členitom reliéfe a náklone lietadla. Odstrániť sa dá ortorektifikáciou snímky (Obr. 2.10b).

Ortorektifikácia je proces zahŕňajúci geometrickú transformáciu obrazu nespracovanej snímky, ktorou sa odstráni jeho deformácie vznikajúce v dôsledku výškovej členitosti územia a centrálnej projekcie (Obr. 2.11). Obraz získaný stredovým premietaním vo fotogrametrickej kamere sa prevedie do ortogonálnej projekcie, ktorej stred premietania je v nekonečne. Týmto procesom vzniká ortofotosnímka, ktorá dovoľuje vykonávať korektné merania plôch a dĺžok podobne ako prostredníctvom mapy. Ortorektifikácia nie je potrebná na rovinatých územiach a v malých mierkach. Variačné rozpätie výšky by nemalo presiahnuť 1/500 z mierkového čísla z mierky, v ktorej bola snímka nasnímaná. Napríklad pre snímkovanie v mierke 1:25 000 by rozsah nadmorských výšok v snímanom území nemal presiahnuť 50 metrov (25 000/500).



(a)



(b)

Obr. 2.9: Zariadenia pre fotogrametrickú analýzu stereosnímkov: (a) stereoploter A8 od výrobcu Wild Heerbrugg, (b) fotogrametrická stanica so softvérom od firmy Racurs. Zdroj: (a) www.blom-uk.co.uk, (b) Ústav geografie PF UPJŠ v Košiciach.

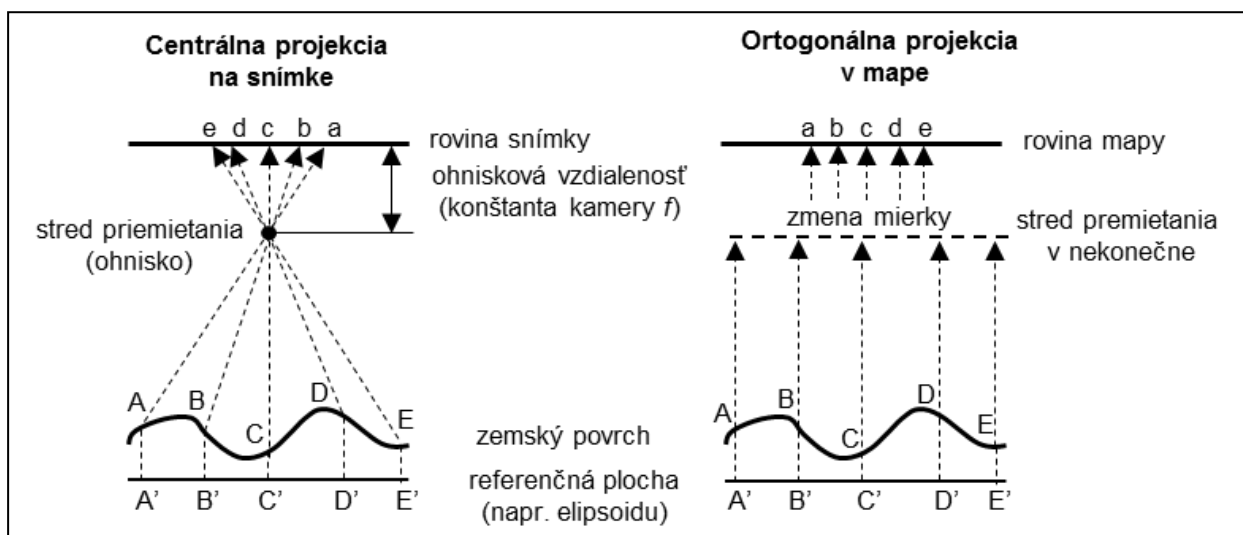


(a)



(b)

Obr. 2.10: Časť sídliska Terasa v Košiciach zachytená na výreze (a) nespracovanej leteckej snímky s centrálnou projekciou, (b) po ortorektifikácii. Zdroj: Photomap, s.r.o.



Obr. 2.11: Porovnanie efektu centrálnej a ortogonálnej projekcie obrazu (premietania).

Ortofotosnímka je teda spracovaná letecká snímka, na ktorej sú odstránené vplyvy náklonov lietadla, smerov jeho pohybu a centrálna projekcia je zmenená na ortogonálnu, pričom sú odstránené aj vplyvy reliéfu (Obr. 2.12b, 2.12d). Ortofotosnímka v tlačenej podobe, ktorá obsahuje aj legendu, mierku, prípadne textové prvky, polohopis a výškopis sa nazýva *ortofotomapa*. Využitie ortofotomáp je všestranné a v mnohých prípadoch nahrádza aj klasické mapy, ktorých obsah veľmi rýchlo zastaráva.

Pri tvorbe ortofotosnímkov je nevyhnutný digitálny model reliéfu (DMR) a referenčné mapy (Obr. 2.12a, b). DMR je potrebný na odstránenie vplyvov reliéfu. Rozlíšenie rastrového DMR by malo byť blízke rozlíšeniu leteckých snímok, ktoré býva veľmi vysoké (aj menej ako 0,2 m). DMR sa zväčša odvodzuje pre menšie rozlíšenie (5 m – 50 m), preto je pre účely ortorektifikácie vhodné prevzorkovať DMR na potrebné rozlíšenie, aby nedochádzalo k polohovým nepresnostiam. Prevzorkovanie sa dosiahne interpoláciou pôvodného DMR do rastra s veľkosťou bunky zodpovedajúcej rozlíšeniu budúcej ortofotosnímky (napr. 0,2 m). Referenčná mapa je potrebná na určenie referenčných bodov medzi snímkom a mapou, aby bolo možné vykonať georeferencovanie snímky. Mierka mapy by mala byť blízka mierke snímky, prípadne aj väčšia. Ak pre dané územie nie je k dispozícii vhodná mapa, potrebné je zamerať referenčné (vlicovacie) body pre ortofotomapu v teréne.

Postup ortorektifikácie približuje Obr. 8.18. Topografická mapa (a) zobrazuje nasnímané územie a jeho hypsometriu vyjadruje DMR (b). V pôvodnej leteckej snímke z roku 1997 (c) sa v procese ortorektifikácie upravili radiálne posuny vznikajúce v dôsledku výraznej výškovej členitosti územia využitím DMR. Vznikla tak ortofotosnímk (d). Naložením cestnej siete odvodenéj z mapy (a) možno porovnať správnosť polohopisu na pôvodnej snímke (e) a ortofotosnímke (f).

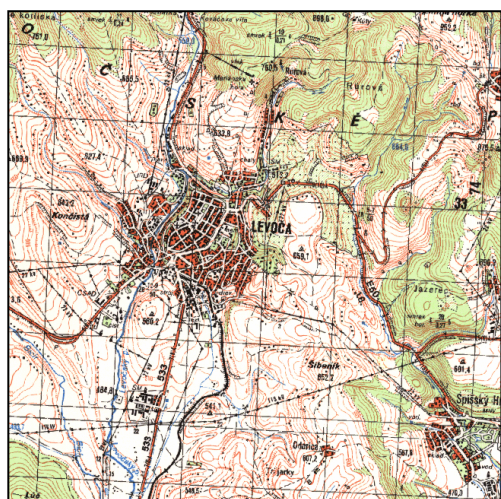
Existujú dva typy ortofotomáp: *pravé ortofotomapy* a *pseudoortofotomapy*. Pri tvorbe pravých ortofotomáp sa vykonáva polohová korekcia všetkých vyvýšených objektov (napr. striech domov) tak, že na ich pôvodnom mieste na snímke nie sú žiadne dáta. Pri tomto type ortofotomáp je potrebné mať nielen DMR ale aj výšky všetkých vyvýšených objektov. Digitálny model povrchu vrátane objektov na ňom sa dá odvodiť pomocou stereopárov leteckých snímok alebo z mračna bodov získaných pomocou laserového skenovania (viď kapitolu 8.9). Pri pseudoortofotomapách sa použije jednoduchší model zahŕňajúci iba terén. Polohový posun obrazu sa tak vykonáva iba vzhľadom na nerovnosti terénu, ale nie v prípade vyvýšených objektov, takže napríklad časť stien budov z pôvodných snímok zostáva viditeľná.

Po výbere DMR a zadaní interných a externých parametrov fotokamery pri snímkovaní je potrebné identifikovať aj niektoré významné body na leteckej snímke definujúce jej geometrické vlastnosti. Na základe referenčných bodov medzi snímkou a mapou (optimálny počet je 12) sa môže vykonať ortorektifikácia. Výška sa automaticky odčítava z DMR. Proces identifikácie referenčných bodov vyžaduje interakciu operátora, ktorý musí ručne identifikovať a zaznamenať body na snímke a mape. Referenčné body môžu byť merané aj pomocou GPS. Presnosť identifikácie bodov a rektifikácie sa sleduje pomocou strednej štvorcovej chyby (angl. root square mean error, RMSE). Akceptovateľná chyba je menšia ako polovica cieľového rozlíšenia.

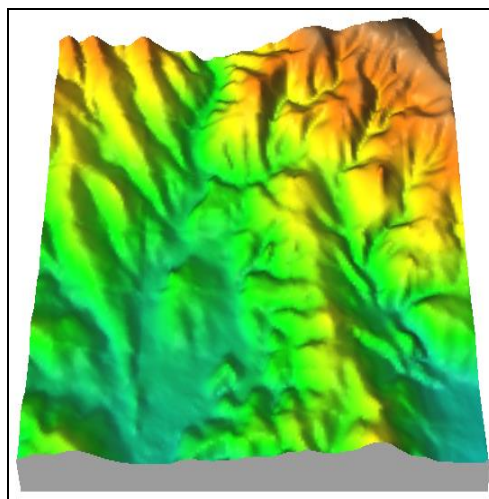
Ortofotomapy sa dajú veľmi dobre použiť nielen namiesto máp, ale aj za účelom klasifikácie krajiny pokrývky. Oproti satelitným dátam je rozdiel najmä v rozlíšení a v tom, že zvyčajne je k dispozícii len 1 spektrálny kanál. Preto preferovaný spôsob spracovania je najmä vizuálna interpretácia. V niektorých GIS-och existujú metódy na poloautomatickú extrakciu prvkov (plôch, hrán). Pri menšom rozsahu územia je možná aj ručná vektorizácia plôch pomocou interpretátora na obrazovke počítača. Najbežnejšie je použitie ortofotomapy v kombinácii s inými vektorovými vrstvami.

2.5 Multispektrálne skenovanie

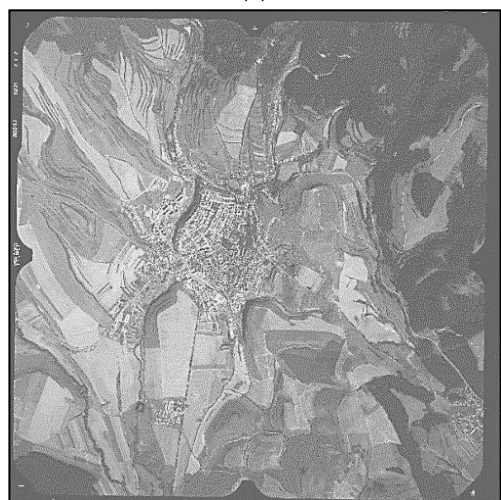
Väčšina súčasných satelitných systémov diaľkového prieskumu poskytuje geoinformácie na báze multispektrálneho skenovania. Ako satelit prechádza nad zemským povrchom, skener sníma slnečné žiarenie odrazené od povrchu Zeme vo viacerých spektrálnych pásmach súčasne. Ide teda o pasívnu metódu DPZ. Podľa počtu pásiem rozlišujeme multispektrálne alebo hyperspektrálne skenovanie. Obrazový záznam vzniká systematickým spôsobom postupne po jednotlivých obrazových elementoch, ktorými môže byť samostatný pixel, alebo riadok pixlov, či súbor takýchto riadkov. Princíp je analogický so stolnými riadkovými skenermi určenými pre digitalizáciu fotografií či dokumentov. Digitálne dáta vytvorené multispektrálnym alebo hyperspektrálnym skenovaním sa ukladajú v rastrovom dátovom formáte, pričom každému pixlu môžeme priradiť 4 parametre: priestor, vlnovú dĺžku, čas a intenzitu EMG žiarenia. Hlavnou výhodou skenovania je práve priama digitalizácia informácie a možnosť jej rádiového prenosu na diaľku. Po predspracovaní dát sa tieto distribuujú užívateľom ako tzv. *scény*, čo sú štandardizované dátové súbory pokrývajúce určitý rozsah územia. Satelitné dáta sa poskytujú v rôznych dátových formátoch. Najbežnejšími formátmi sú CEOS, BIL, BSQ, GeoTIFF, ERDAS/LAN, NCSA/HDF alebo HDF-EOS. Dáta môžu byť súradnicovo priradené (georeferencované), alebo je potrebné ich georeferencovať.



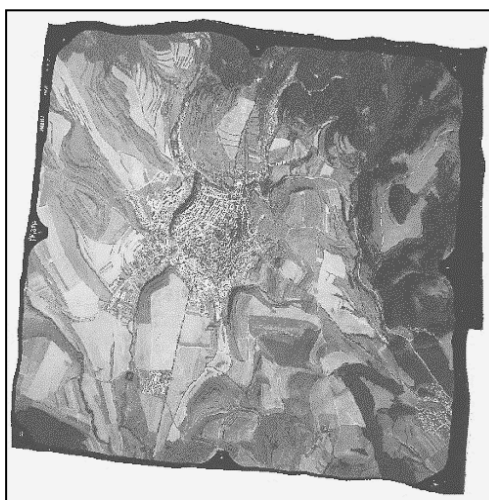
(a)



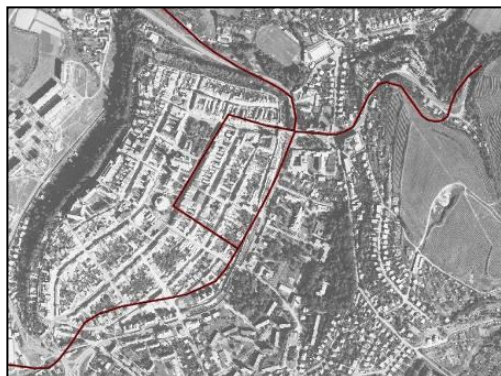
(b)



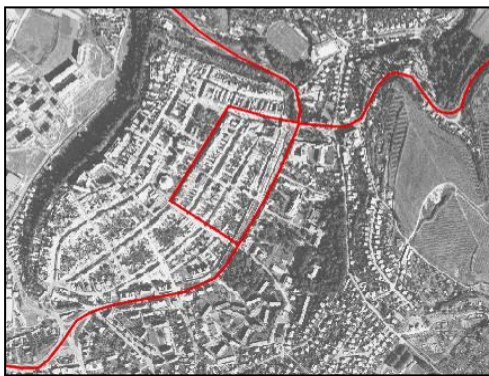
(c)



(d)



(e)

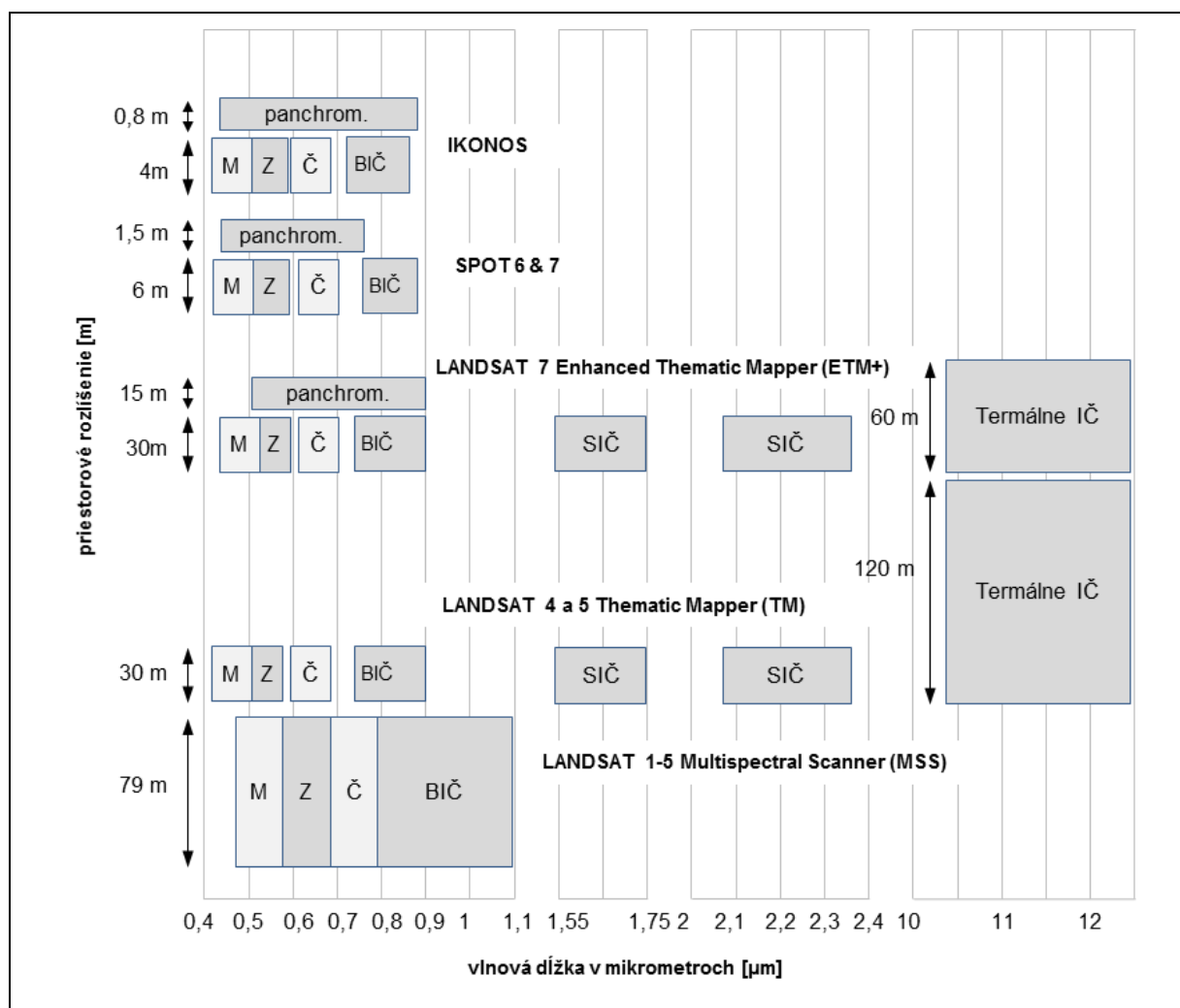


(f)

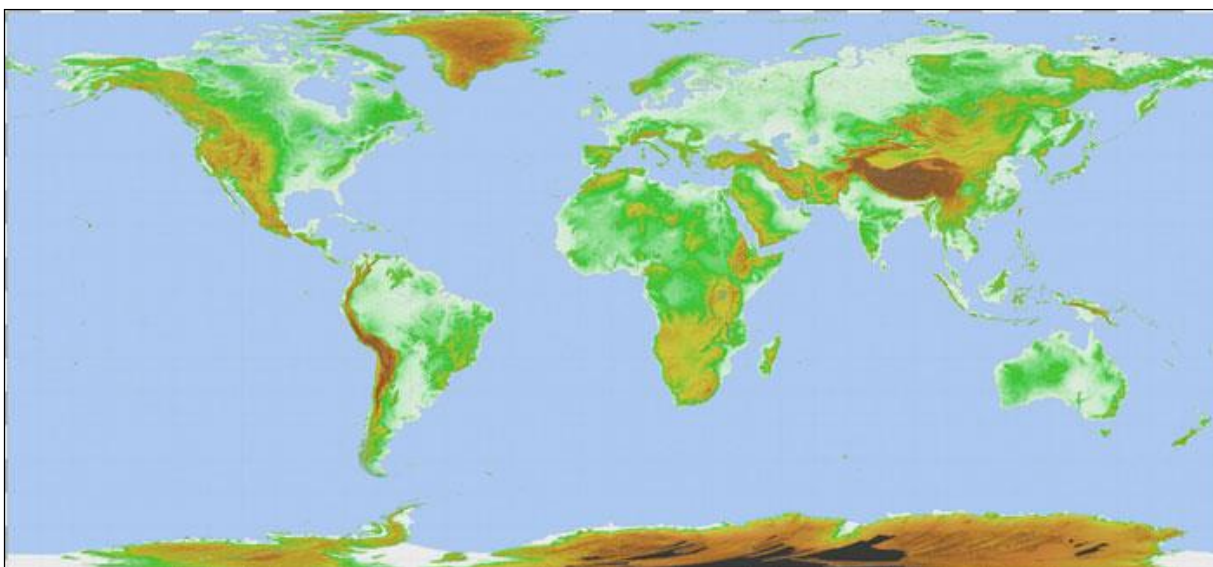
Obr. 2.12: Ukážka nespracovanej leteckej snímky a odvodenej ortofotosnímky pre okolie Levoče s vysvetlením v texte. Zdroj dát: Topografický ústav Banská Bystrica, GKÚ SR

Satelitné dáta sú vhodné najmä pre veľké územia a pre územia ťažko dostupné. Výhodou je aj vysoká periodicita záznamov z daného územia na úrovni niekoľkých dní až hodín, čo umožňuje mapovanie a analýzy zmien sledovaného javu. Spomedzi multispektrálnych satelitných systémov sú príkladom skenery družíc LANDSAT ako MSS (Multi Spectral Scanner), TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), ďalej snímač ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) na družici Terra, snímače družíc SPOT, IKONOS, RESURS, GeoEye. Príkladom satelitných hyperspektrálnych skenerov je Hyperion na americkej družici EO-1. Parametre záznamu vybraných multispektrálnych skenerov sú uvedené na Obr. 2.13.

Zber údajov o nadmorskej výške pre tvorbu DMR na báze multispektrálnych satelitných snímok je analogický fotogrametrickému princípu, teda je nutné získať údaje s prekrytom v stereopároch. Dôležitým DMR produktom, ktorý bol vytvorený touto technológiou je ASTER GDEM. Základom pre jeho tvorbu boli multispektrálne snímky zachytávajúce odrazivosť v blízkej infračervenej časti spektra už spomenutého senzora ASTER. Tento dátový produkt je výsledkom spoločného projektu japonského Ministerstva hospodárstva, obchodu a priemyslu (METI) a amerického Národného úradu pre letectvo a vesmír (NASA). ASTER GDEM je vyhotovený v rastrovom údajovom formáte s priestorovým rozlíšením 30 m a je voľne šíriteľný (<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>). Presnosť vo vertikálnom a v horizontálnom smere sa pohybuje v desiatkach metrov, čo možno považovať za postačujúce pre využitie DMR na globálnej alebo regionálnej úrovni. Oproti iným globálnym DMR má ASTER GDEM výhodu v úplnom pokrytí zemskej súše, čo nedosahuje SRTM DMR. Ich porovnanie z hľadiska geomorfometrie podáva Guth (2010).



Obr. 2.13: Porovnanie priestorového a spektrálneho rozlíšenia vybraných satelitných systémov DPZ. Vysvetlivky: M – modré pásmo, Z – zelené pásmo, Č – červené pásmo, IČ – infračervené pásmo, SIČ – stredné infračervené pásmo, BIČ – blízke infračervené pásmo, panchorm. – panchromatické pásmo. Upravené podľa Jensen (2007).



Obr2.14: Pokrytie Zeme globálnym modelom reliéfu ASTER GDEM so zafarbením podľa nadmorskej výšky. Zdroj: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>

2.6 Radar typu SAR

Radar je systémom aktívneho diaľkového prieskumu, ktorý využíva vlastný zdroj mikrovlnného žiarenia. Pomenovanie radar je akronymom anglického termínu „Radio Detection And Ranging“ (RADAR). Skratka RADAR označuje technológiu snímania radarom. Termín rádiové vlny sa vzťahuje k EMG s vlnovou dĺžkou väčšou ako má infračervené žiarenie (viac ako 1 mm). Konkrétne pre mikrovlny ide o vlnové dĺžky od 1 mm do 1 m, ktorých špecifické hodnoty sú vzostupne označované písmenami K, X, C, S, L, P. Podstatou radarového snímania je určovanie charakteru a polohy objektov, pričom sa meria čas t , ktorý uplynie medzi vyslaním mikrovlnného pulzu, jeho odrazom a následným zaznamenaním radarom. Na základe známej rýchlosti šírenia EMG c možno vypočítať vzdialenosť s k objektom, od ktorých sa pulz odrazil:

$$s = c \cdot t / 2$$

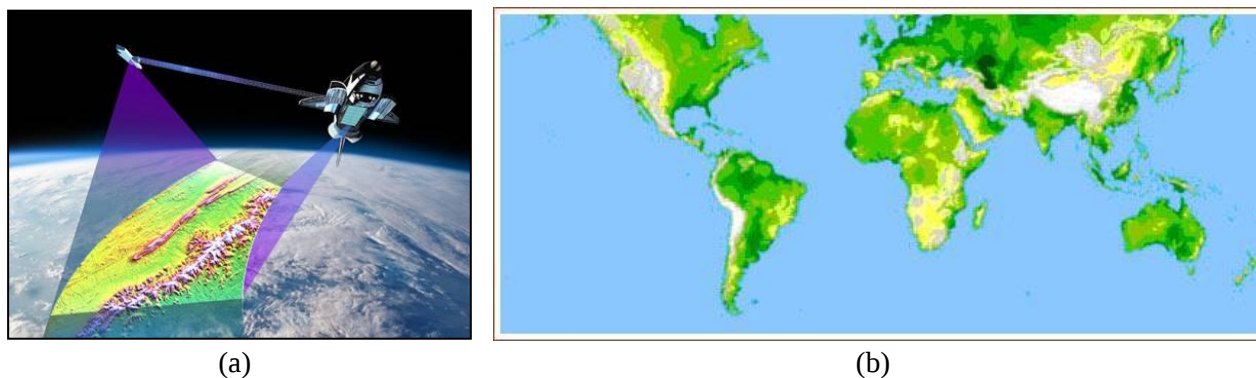
Zároveň sa zaznamenáva intenzita odrazeného žiarenia (amplitúda), ktorá tvorí obrazovú zložku záznamu v rastrovom dátovom formáte. Vďaka aktívnej povahe snímania mikrovlnným žiarením prináša radar pre skúmanie krajiny významné výhody v porovnaní s ostatnými metódami DPZ. Použitie radaru je nezávislé na slnečnom svite, a tak dovoľuje mapovať vo dne i v noci. Mikrovlnné žiarenie preniká oblačnosťou, hmlou, jemným dažďom a smogom, čo sa využíva pre skúmanie v tródoch či v iných oblastiach s vlhkou oceánskou klímou. Radarový záznam poskytuje odlišný pohľad na štruktúru zemského povrchu ako pasívne metódy DPZ, vďaka čomu možno skúmať parametre krajinej pokrývky (výška objektov, hrúbka kmeňov stromov, druhové zloženie vegetácie, štruktúra vegetačného krytu). V závislosti od vlnovej dĺžky a obsahu vody v pôde mikrovlny prenikajú zvetralinovým plášťom a pôdnym krytom, a taktiež snehom a ľadom. Táto vlastnosť sa využíva pri mapovaní pôdnej vlhkosti, hrúbky zvetralín, morských a pevninských ľadovcov a povrchu pod nimi, výšky morských vln. Prvé civilné aplikácie v DPZ boli smerované práve do tropických oblastí Strednej a Južnej Ameriky v 60-tych rokoch 20. storočia za účelom mapovania terénu a krajinej pokrývky. Príkladom satelitných radarových systémov pre mapovanie krajiny sú Seasat-1, SIR-A, SIR-B, SIR-C, Almaz, JERS, RADARSAT, ENVISAT, ERS-1, ERS-2. Radarové dáta sa úspešne používajú v mapovaní geologických štruktúr, druhového zloženia prirodzenej vegetácie a poľnohospodárskych plodín, pre určenie druhov morského ľadu, mapovanie povrchových vôd. Radarový obraz pripomína leteckú fotografiu snímanú pri nízkej výške slnka nad obzorom. Rôzna intenzita odrazeného mikrovlnného žiarenia je vyjadrená v stupňoch šedi, pričom čierne plochy reprezentujú oblasti nachádzajúce sa v čase snímania v radarovom tieni. Radarový záznam

obsahuje informačný šum, ktorý sa v obraze prejavuje ako svetlé a tmavé pixely. Tento vzor sa označuje ako „korenie a soľ“ (angl. salt and pepper). Rôznymi spôsobmi filtrácie obrazu možno tento šum potlačiť.

Pre DPZ sú využívané letecké alebo satelitné radarové systémy so šikmým uhlom snímania (angl. side looking radar, SLR). SLR bol najprv vyvinutý pre vojenské účely, až neskôr sa začal využívať v civilnom sektore pre mapovanie krajiny. V dôsledku šikmého uhla snímania dochádza v radarovom zázname k systematickému skresleniu obrazu v porovnaní s vertikálnymi snímkami, preto radarový záznam musí prejsť výraznými matematickými a geometrickými korekciami. Problém prvých SLR systémov bol v slabom priestorovom rozlíšení obrazu, pretože to je závislé od fyzickej veľkosti antény vysielajúcej mikrovlnné žiarenie (tzv. apertúra). Pre mapovanie krajiny to bol obmedzujúci faktor, nakoľko dosiahnuteľné rozlíšenie bolo prinajlepšom na úrovni niekoľkých desiatok metrov.

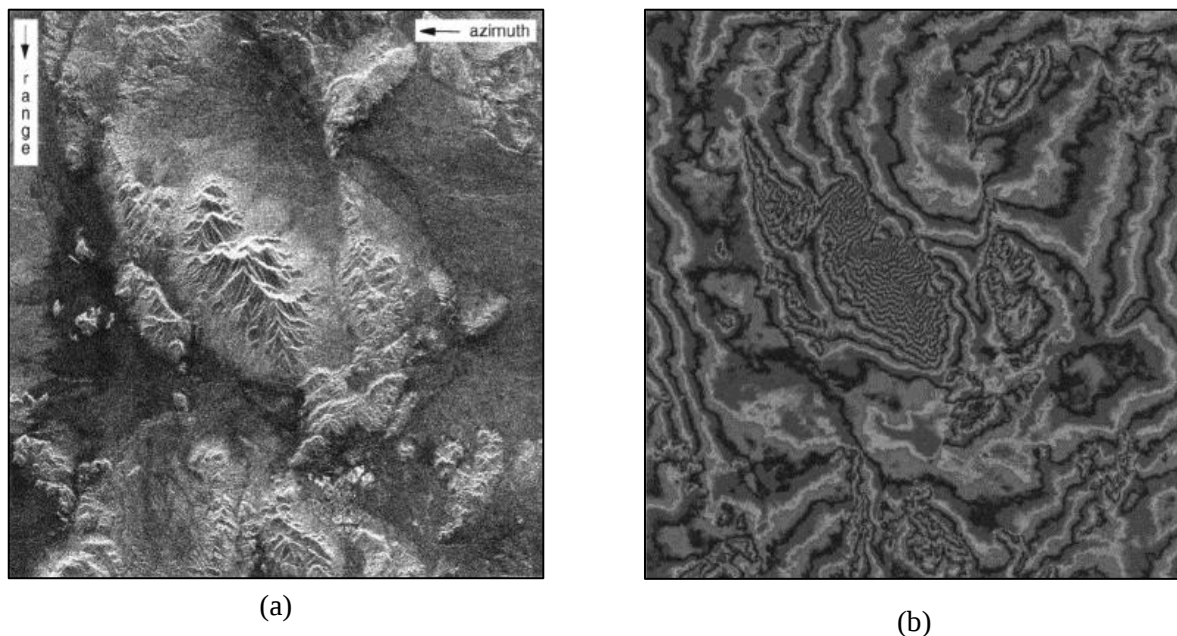
Pokrok priniesol radarový systém, v ktorom sa matematickým prepočtom apertúra umelo zväčšuje nemeniac fyzickú veľkosť antény, čím možno dosiahnuť detailnejšie priestorové rozlíšenie, rádovo v metroch až decimetroch. Tento typ radaru sa nazýva SAR (angl. Synthetic Aperture Radar). Zemský povrch sníma nielen pomocou merania času a intenzity signálu, ale aj frekvencie a fázy žiarenia. Z informácie o fáze vlny možno pri použití dvoch radarových antén odvodiť výšku zemského povrchu. Táto metóda sa nazýva SAR interferometria. Dve antény snímajú povrch pod odlišným uhlom (Obr. 2.15) a vysielajú koherentné žiarenie. V dôsledku odlišnej polohy antén vzhľadom na snímajúci bod a tým rozdielnej vzdialenosti od tohto bodu majú odrazené pulzy žiarenia rozdielnú fázu, ktorú možno veľmi presne merať a využiť pre určenie nadmorskej výšky daného bodu. Základom interferometrie je porovnanie fáz zodpovedajúcich si pixelov dvoch SAR snímkov daného územia. Výsledkom je interferogram (Obr. 2.16), ktorého ďalším spracovaním možno odvodiť digitálny model povrchu krajiny vrátane budov a vegetácie. Filtrovaním sa dá odvodiť model terénu (DMR). SAR interferometria umožňuje topografické mapovanie s relatívnou presnosťou niekoľko metrov alebo mapovanie deformácií zemského povrchu so subcentimetrovou presnosťou. Príkladom je detekcia porúch v dôsledku zemetrasenia, poddolovania, alebo zosuvov (Kianička a Čapková 2005, Svobodová et al. 2013). Ďalšou možnosťou využitia je detekcia zmien výšky povrchu napr. po výrube lesa, zastavaní územia alebo demolácii budov. Pre uvedené výhody radaru a SAR interferometrie bolo radarové snímanie využité pre tvorbu relatívne detailných DMR celej Zeme. V roku 2000 Spojené štáty americké s Nemeckom a Talianskom realizovali misiu SRTM (angl. Shuttle Radar Topography Mission), ktorou bol v priebehu 11 dní získaný interferometrický SAR záznam v priestorovom rozlíšení približne 30 metrov (Obr. 2.17). Vizualizáciu raketoplánu Endeavour počas misie SRTM ukazuje Obr. 2.15.

Najdôležitejším produktom misie SRTM bolo vytvorenie globálneho rastrového DMR pre 80% zemského povrchu, ktorý je verejne dostupný v rozlíšení 90 metrov (<http://srtm.usgs.gov>). Od roku 2015 má byť sprístupnená aj jeho verzia v rozlíšení 30 metrov (Obr. 2.17). Bezplatné poskytnutie SRTM dát



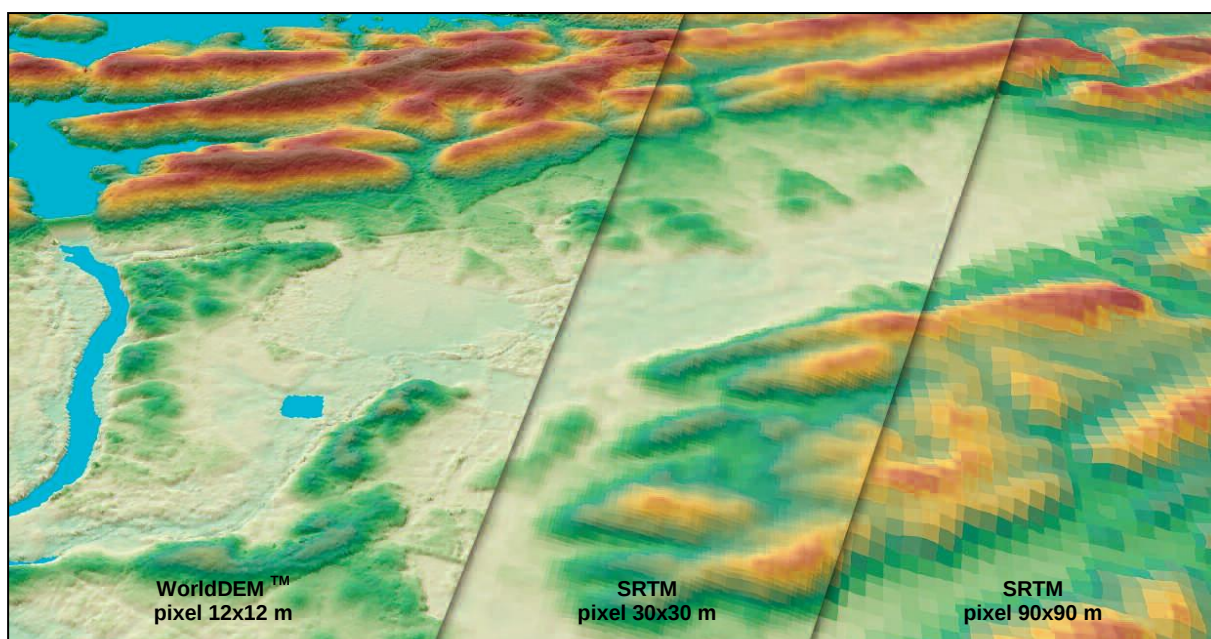
Obr. 2.15: Schematický princíp SAR interferometrie v priebehu misie SRTM (a) bol založený na radarovom snímaní územia dvomi anténami s určitým rozstupom. Výsledný DMR pokrýva 80% planéty. Zdroj: NASA/USGS

predstavuje významný míľnik v geoinformatike, pretože umožnilo výskum doposiaľ nemapovaných odľahlých oblastí a tiež globálnu analýzu reliéfu Zeme vo vysokom rozlíšení, čím stimulovalo záujem širokej vedeckej, ale i laickej komunity o geoinformatické spracovanie týchto dát. Najnovšou iniciatívou mapovania celej Zeme je misia TanDEM-X, ktorej výsledkom je DMR pokrývajúci celú Zem v rozlíšení 12 metrov. Misiu realizuje Nemecké stredisko pre letectvo a kozmonautiku (DLR) a firma Airbus Defence and Space. Dátový produkt sa nazýva *WorldDEM* (<http://www.geo-airbusds.com/worlddem/>) a je k dispozícii na komerčnej báze od roku 2015 (Obr. 2.17). *WorldDEM* bol odvodený z interferometrických SAR dát, ktoré snímali dva súbežne obiehajúce satelity TerraSAR-X.



Obr. 2.16: Ukážka SAR záznamu z oblasti Mohavskej púšti ako (a) intenzita odrazeného mikrovlnného žiarenia a (b) interferogram reprezentujúci relatívne prevýšenie zemského povrchu. Pásky rovnakého odtieňa šedej indikujú rovnaké hodnoty fázového rozdielu, podobne ako vrstevnice nadmorskú výšku.

Zdroj: Bamler and Hartl (1998)



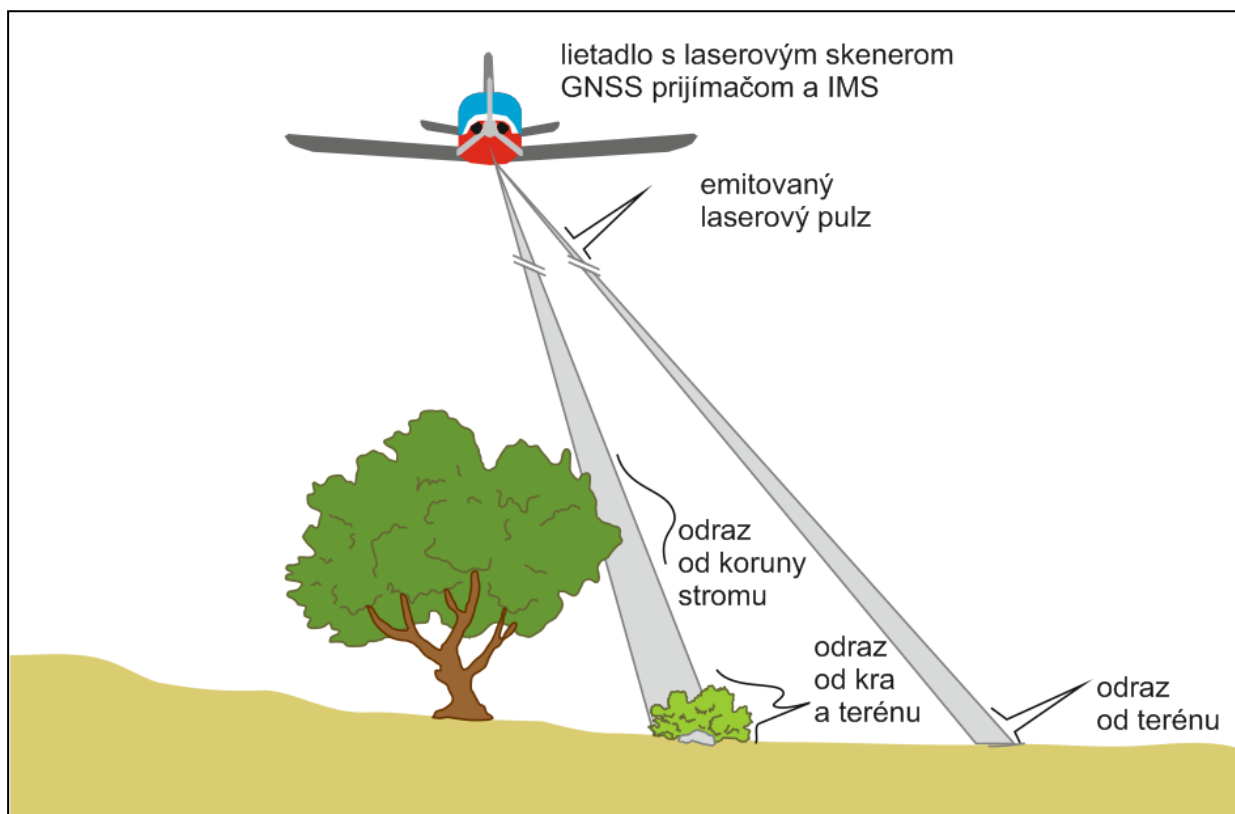
Obr. 2.17: Porovnanie priestorového rozlíšenia DMR produktov odvodených zo satelitných dát získaných SAR interferometriou. Zdroj: Airbus Defence & Space

Najkritickejším faktorom presnosti mapovania radarom typu SAR je presnosť určenia polohy satelitu a relatívnej polohy antény vzhľadom na nosič pomocou INS. SAR interferiou je možné určiť nadmorskú výšku pre každý pixel záznamu, zatiaľ čo radargrametriou je to možné iba pre väčšie okolie pixla (El-Sheimy et al. 2005, Li et al. 2005). Z toho dôvodu modelovanie reliéfu z radargrametrických údajov je menej presné ako v prípade interferometricky získaných údajov. Priestorové rozlíšenie je pri SAR zázname rádovo v metroch, zatiaľ čo pri fotogrametrii je to niekoľko decimetrov až centimetrov. Horizontálna a vertikálna presnosť metódy SAR je teda nižšia ako pri fotogrametrických údajoch alebo LiDAR-e. Výhodou SAR je však nezávislosť snímania na počasí a čase snímania. Komerčne aj výskumne je zaujímavý dátový produkt NextMap získaný pomocou leteckého SAR systému STAR 3i f. Intermap pre rozľahlé územia (napr. USA, západná Európa, Indonézia) dosahuje presnosť medzi 1-3 m a priestorové rozlíšenie medzi 2.5 - 5 m (Tennant and Coyne, 1999).

2.7 Laserové skenovanie (LiDAR)

Laserové skenovanie je zaužívaný termín pre technológiu, ktorá zahŕňa detekciu objektov a meranie vzdialenosti k nim pomocou laserového žiarenia vysielaného z vlastného zdroja. Metóda je známa aj pod skratkou *LiDAR* (Light Detection And Ranging), pričom celý systém na báze laserového skenovania sa nazýva *lidar*. Špecificky pre účely mapovania krajiny sa používa termín topografický lidar alebo topografické laserové skenovanie (Shan a Toth, 2009). Laserové skenovanie je teda aktívnou metódou DPZ a jej princípy sú analogické radarovému snímaniu. Zatiaľ čo radar využíva mikrovlnné žiarenie, lidar vysieľa viditeľné alebo blízke infračervené žiarenie. Laserové žiarenie má *vysoký stupeň koherencie*, čo znamená, že EMG vlny kmitajú v rovnakej fáze a majú veľmi malý rozptyl. Laserový pulz preto aj na relatívne veľkú vzdialenosť osvieti malú plochu, ktorá sa nazýva stopa. Laserová stopa má kruhový alebo eliptický prierez a jej veľkosť, v závislosti od vzdialenosti k povrchu objektov, je bežne menšia ako 1 m². Lidar emituje EMG žiarenie, ktoré sa odráža od povrchu objektov. Čas t , za ktorý svetelný lúč prejde dráhu k objektu od laserového skenera a späť sa používa na určenie vzdialenosti s medzi skenerom a snímaným objektom (pozri rovnicu v kapitole 2.6). Na stanovenie presnej polohy laserovej stopy na povrchu objektu je potrebné veľmi presne poznať polohu skenera vzhľadom na nosič (napr. na palube lietadla). Tá sa meria pomocou IMS vzhľadom na lietadlo a pomocou diferenciálneho GPS vzhľadom na kartografický súradnicový systém. Laserové skenery pre topografické mapovanie využívajú tzv. *pulzný laser*. V tomto prípade sa lúč emituje s vysokou frekvenciou (30 tis. až 100 tis. pulzov za sekundu) a jeho smer mení rotujúce zrkadlo. Vysoká koherencia a energia laserového žiarenia umožňuje meranie s relatívne malým rozstupom (najčastejšie 0,5 – 3 m), pričom vzniká veľmi husté bodové pole. Súbor bodových meraní polohy miesta odrazu laserového lúča sa nazýva preto *mračno bodov* a vo svojej podstate je zaznamenávané vo vektorovom dátovom formáte. Dosahovaná presnosť merania nadmorskej výšky je relatívne vysoká, okolo 10-15 cm, závisí však od viacerých faktorov ako krajinná pokrývka, sklon a orientácia reliéfu, odrazivosť povrchu, vlastnosti atmosféry.

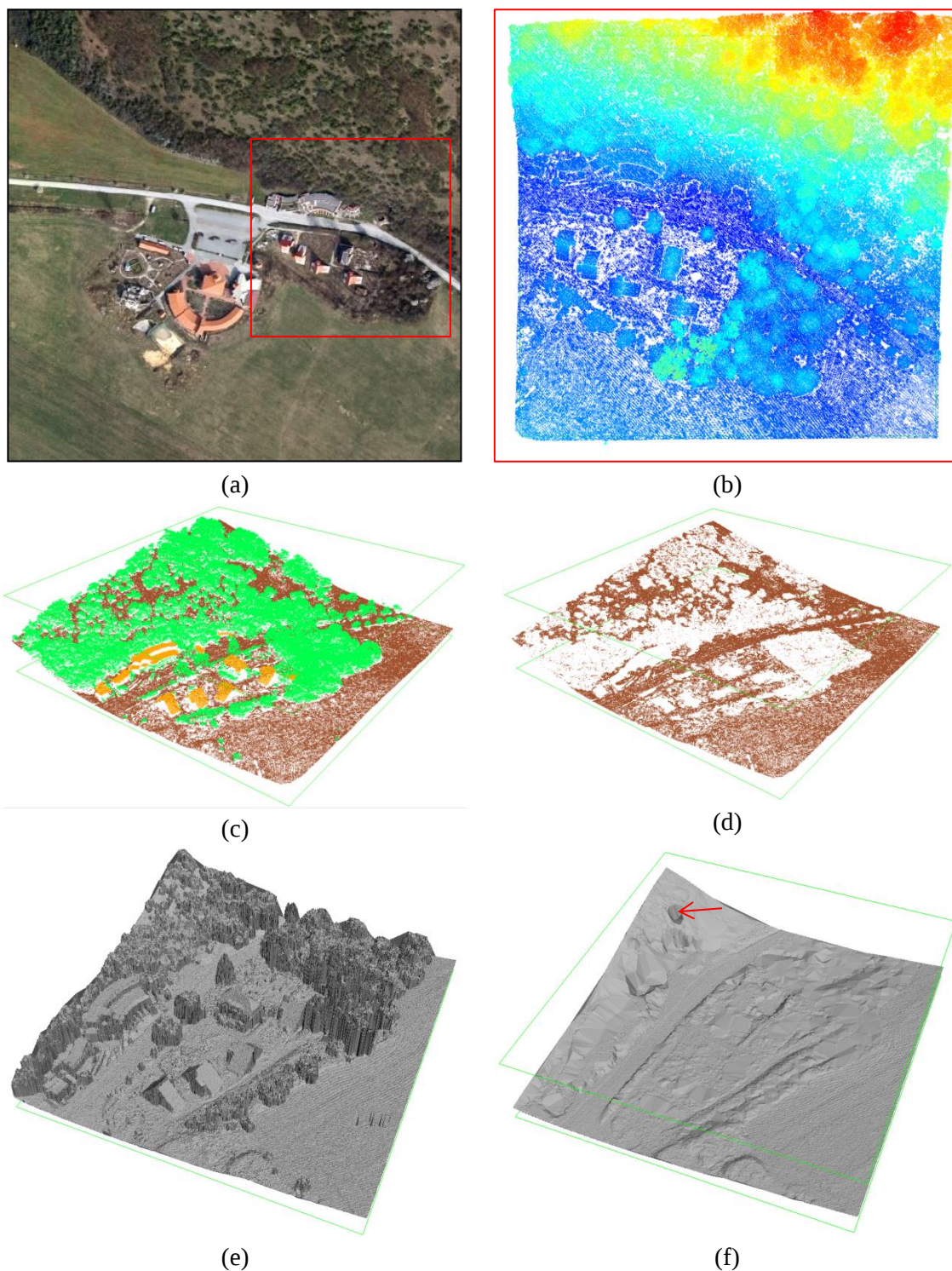
Pre už uvedené vlastnosti laserového žiarenia má táto metóda podstatnú výhodu oproti fotogrametrii a pasívnemu multispektrálnemu skenovaniu v tom, že umožňuje prienik vegetačným krytom a zachytenie odrazu od viacerých úrovní (Obr. 2.18). Preto sa lidar uplatňuje najmä v mapovaní geometrie vegetačného krytu a povrchu pod ním (Smreček a Michňová, 2014). Jeden pulz energie sa môže odraziť napr. od vrcholkov stromov, konárov stromov, krovín a terénu. Klasifikáciou a filtrovaním mračna bodov sa dajú separovať merania výšky budov, vrchnej časti vegetácie, ktoré sa použijú pre odvodenie digitálneho modelu povrchu krajinného krytu (DSM). Z bodových meraní nadmorskej výšky terénu sa odvodí digitálny model reliéfu (DTM). Obr. 2.19 je ukážkou úrovne detailu, ktorú možno zachytiť mapovaním pomocou leteckého lidar. Vo všeobecnosti leteckou fotogrametriou a leteckým laserovým skenovaním možno dosiahnuť porovnateľnú presnosť merania nadmorských výšok na úrovni decimetrov až centimetrov (Baltsavias 1999).



Obr. 2.18: Princíp leteckého laserového skenovania pomocou lidarů.

Avšak prednosťou laserového skenovania je získanie veľkého mračna bodov veľmi presne a detailne zachytávajúceho 3D geometriu krajiny, ako to vidieť na príklade foriem reliéfu pod lesnou pokrývkou na Obr. 2.19f. Ide o prepadlisko do jaskyne Stará Domica, ukryté v kroví. Na fotogrametrickej snímke totiž možno v súvislom lesnom poraste výšku terénu iba odhadovať, nakoľko jeho obraz zakrývajú koruny stromov. Laserové skenovanie, na rozdiel od fotogrametrie, neumožňuje vytváranie spojitého obrazu vo viacerých spektrálnych pásmach, ktorý by napomáhal vizualizácii krajiny formou ortofotomapy a tým i lepšej interpretácii mračna bodov. Z toho dôvodu sa simultánne so skenovaním často realizuje aj fotogrametrický zber dát.

Letecké laserové skenovanie je veľmi progresívnou metódou, ktorá sa rapídne rozvíja v poslednom desaťročí. Hlavné aplikácie súvisia s potrebou presného a detailného modelovania terénu alebo tvorby 3D modelov budov pre rozsiahlejšie oblasti ako je možné zamerať tachymetricky či prostredníctvom GNSS. Príkladom je modelovanie potenciálnych povodní, hodnotenie rizika zaplavenia, identifikácia geomorfologických foriem reliéfu (zosuvy, výmole, závrty), tvorba 3D modelov urbanizovanej krajiny, 3D katastra, lesnícke mapovanie a iné. Časové rady lidarových dát dovoľujú vyhodnocovať dynamiku geomorfologických procesov (Mitasova et al. 2009). Národné kartografické úrady väčšiny krajín Európskej únie či Spojených štátov pristúpili k nasadeniu leteckého lidarů pre mapovanie povrchu svojho územia a aktualizáciu výškopisu topografických máp a geodatabáz. Pre územie Slovenska zatiaľ súvislé pokrytie lidarovými dátami neexistuje. Ide skôr o individuálne realizovaný zber pre komerčné alebo vedecko-výskumné účely (Gallay et al. 2013b). Naproti tomu Česko alebo Poľsko už realizujú opätovnú aktualizáciu lidarových dát s celonárodným pokrytím. Vyššie uvedený text implicitne hovorí najmä o leteckom laserovom skenovaní (angl. airborne laser scanning). Analógiou leteckého laserového skenovania je pozemné laserové skenovanie (angl. terrestrial laser scanning), pre ktoré platia obdobné princípy. Pozemné skenery skenujú objekty v priestore okolo seba v horizontálnom (360°) a aj vo vertikálnom smere ($60-150^\circ$). Letecké skenery sú zvyčajne umiestnené na leteckom nosiči a smerujú nadol, preto skenujú len v horizontálnom smere a sú na nosiči pevne zafixované (Obr. 2.20). Ukážky pozemných skenerov vidieť na Obr. 2.21.



Obr. 2.19: Ukážka detailnosti mapovania zemskeho povrchu leteckým laserovým skenovaním pre vstupný areál jaskyne Domica s rozmermi 250 x 250 m vymedzeným červeným štvorcem na leteckej ortofotosnímke s rozlíšením 20 cm (a). (b) Pohľad zhora na mračno bodov získané leteckým laserovým skenovaním, ktoré je zafarbené podľa nadmorskej výšky. Obsahuje 1,25 milióna bodov s hustotou 20 bodov/m². Každý bod vyjadruje súradnice (x, y, z). Pohľad z bočnej perspektívy na filtrované a klasifikované mračno bodov (c), pričom hnedé sú body na teréne, oranžové sú body na budovách a zelené body reprezentujú vegetáciu. Mračno bodov na teréne (d). (e) Digitálny model povrchu krajinného krytu (DSM). (f) Digitálny model reliéfu (DMR). Červenou šipkou je označené prepahlisko do Starej Domice. Spracovanie dát prebehlo v LAStools. Zdroj dát: Ústav geografie PF UPJŠ v Košiciach.

Dosah pozemného lidararu je od 0,5m až po niekoľko kilometrov podľa výkonu. Vzhľadom na menšie vzdialenosti objektov od skenera ako pri leteckom skenovaní je dosahovaná presnosť a hustota merania pozemného laserového skenovania vyššia. Bežne možno dosiahnuť presnosť pod 1 cm a hustota bodov sa pohybuje na úrovni jedného bodu na niekoľkých milimetroch až centimetroch štvorcových (Vosselman a Mass 2010, Gallay et al. 2013a, Gallay, 2013). Časté je použitie aj s fotoaparátom umiestneným na skeneri alebo integrovaným vnútri skenera, čo umožňuje vytvoriť fotorealistický 3D model skenovaných objektov. Typické aplikácie zahŕňajú tvorbu 3D modelov budov, tunelov, ťažobných lokalít, stromovej a krovinovej vegetácie (Obr. 2.22), alebo jaskynných priestorov (Obr. 2.23). Menšie skenery sa používajú aj v interiéri budov. Pozemné skenovanie sa uplatňuje aj v kriminalistike pre presné zachytenie miesta zločinu alebo nehody.



Obr. 8.20: Bezpilotná helikoptéra Scout B1-100 s integrovaným laserovým skenerom VUX-1 od firmy Riegl. Zdroj: Aeroscout GmbH



(a)



(b)

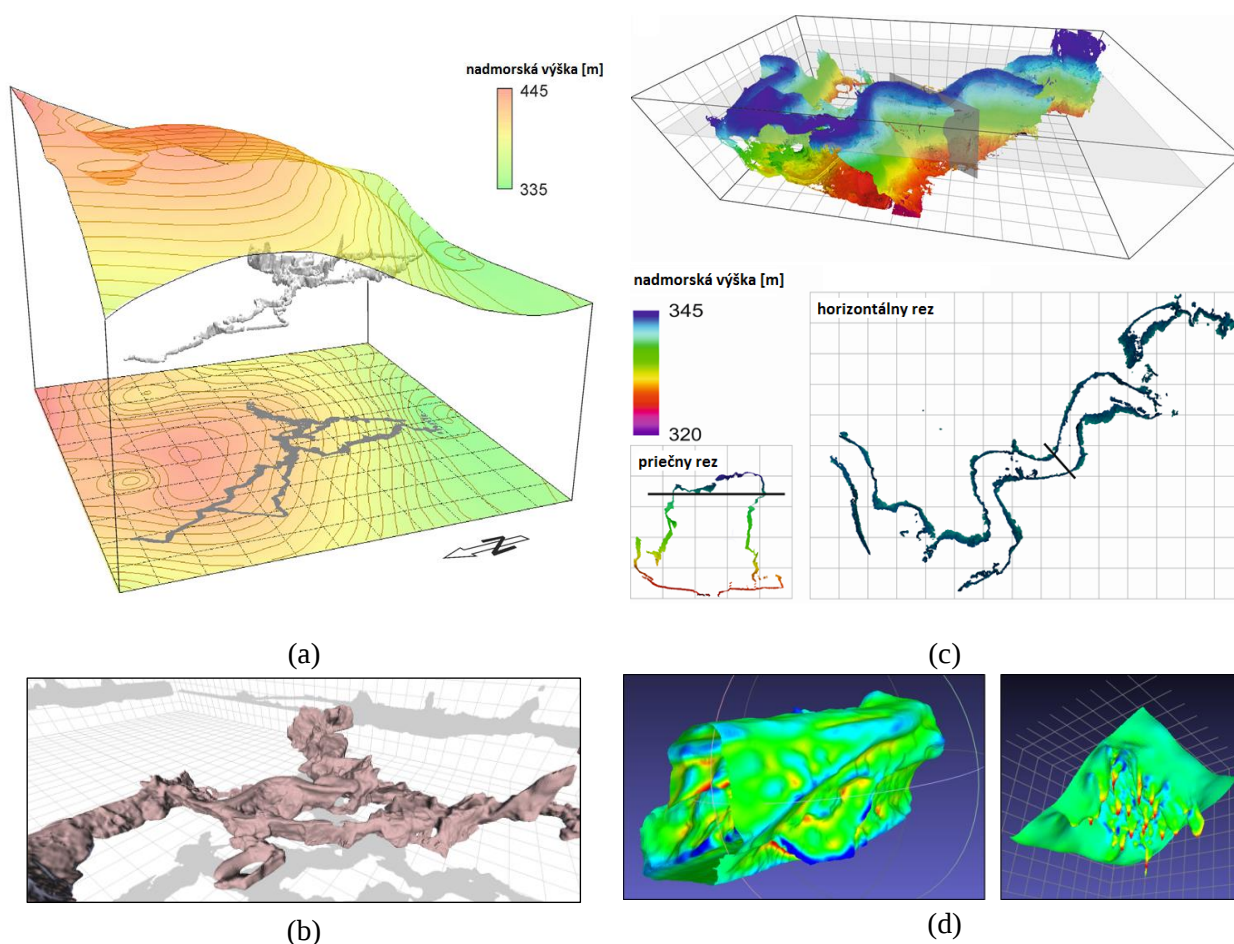


(c)

Obr. 2.21: Pozemný laserový skener Riegl VZ-1000 (a), Leica HDS 3000 (b), FARO Focus 3D (c).



Obr. 2.22: Mračno bodov získané pozemným laserovým skenovaním v Botanickej záhrade v Belfaste obsahujúce okolo 2 miliónov bodov zafarbených na základe farebnej fotografie. Zdroj: Ústav geografie PF UPJŠ v Košiciach, spracoval: Andrew Bell.



Obr. 2.23: Rôzne spôsoby vizualizácie jaskyne Domica na základe dát získaných leteckým a pozemným laserovým skenovaním. (a) Digitálny 3D model povrchu jaskyne s digitálnym modelom reliéfu nad jaskyňou integrované v prostredí GIS, (b) detailný pohľad na 3D model jaskynného povrchu s jeho pôdorysom a bokorysom, (c) mračno bodov reprezentujúce Majkov dom zafarbené podľa nadmorskej výšky s rovinami priečneho a horizontálneho rezu, (d) priemerná krivosť 3D povrchu pre výsek chodby pomáha určiť špecifické formy ako tektonické dutiny a stalaktity. Zdroj dát: Ústav geografie PF UPJŠ v Košiciach.

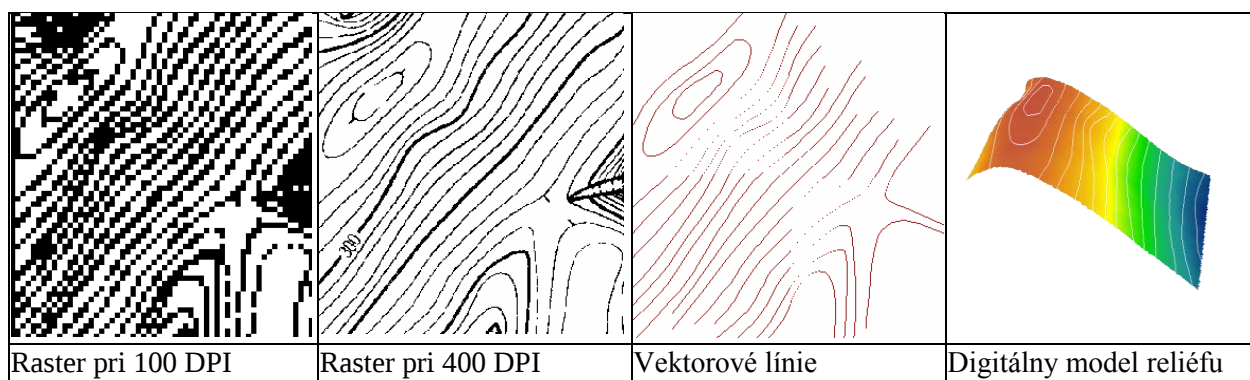
2.8 Digitalizácia mapových podkladov

Topografické mapy kvantitatívne popisujúce reliéf vrstevnicami a kótami sú tradičným zdrojom údajov pre tvorbu DMR. Keďže ide o analógové údaje, je potrebné ich najprv previesť do digitálnej podoby. Mapy sú sekundárnym zdrojom dát, pretože boli odvodené z primárnych zdrojov, a to najmä pozemným meraním a fotogrametriou. To isté platí pre analógové letecké snímky a iných tlačené alebo fotografické materiály. Existujú dva spôsoby prevodu analógových zdrojov priestorových údajov na digitálne údaje. Rastrové dáta sa získavajú pomocou *skenovania*, vektorové dáta sa získavajú *vektorizáciou*. Spracovaním leteckých meračských snímok tiež vznikajú vektorové údaje, avšak nebudeme sa im v tejto kapitole venovať.

Skenovanie

Skener je počítačové periférne zariadenie, ktoré konvertuje tlačené, analógové médium na digitálny obraz postupným snímaním pásov zložených z obrazových elementov (pixelov) cez celý dokument alebo mapu technikou zaznamenávania množstva svetla odrazeného od snímaného materiálu. Rozdiely v svetle sú zaznamenávané buď čiernobielo (1 bit na pixel), alebo v stupňoch šedej (8, 16, ... bitov).

Farebné skenery zaznamenávajú 3 farebné pásma (zložky) – červené, zelené a modré, každé napr. v 8 bitovom rozsahu, čomu zodpovedá 256 farebných odtieňov. Priestorové rozlíšenie skenovania sa určuje v jednotkách DPI (angl. Dots Per Inch, počet bodov na palec; 1 palec = 2,54 cm) je veľmi rozdielne – od 100 dpi (4 body na 1 mm) až po 1800 dpi (72 bodov na 1 mm), alebo aj viac. Väčšina GIS dát býva skenovaná v rozsahu 400-1000 dpi. Skenovanie tlačených dokumentov má rôzne dôvody. Pomerne často sa skenované materiály ďalej spracúvajú, napr. sa vektorizujú, alebo tvoria rastrový podklad, na ktorý sa nakladajú ďalšie GIS dáta, najmä vektorové. Môžu tvoriť aj fotodokumentáciu k iným dátam (napr. fotografie objektov, projektová dokumentácia, alebo iné písomné dokumenty). Pri skenovaní máp je vhodné použiť skenovanie v stupňoch šedej (8 bit) na úrovni rozlíšenia 400 dpi. Pre farebné letecké snímky je vhodné rozlíšenie až 1000 dpi (Longley et al., 2011). Obr. 2.24 uvádza príklad nevhodnej a vhodnej voľby DPI pri skenovaní výškopisu topografickej mapy.



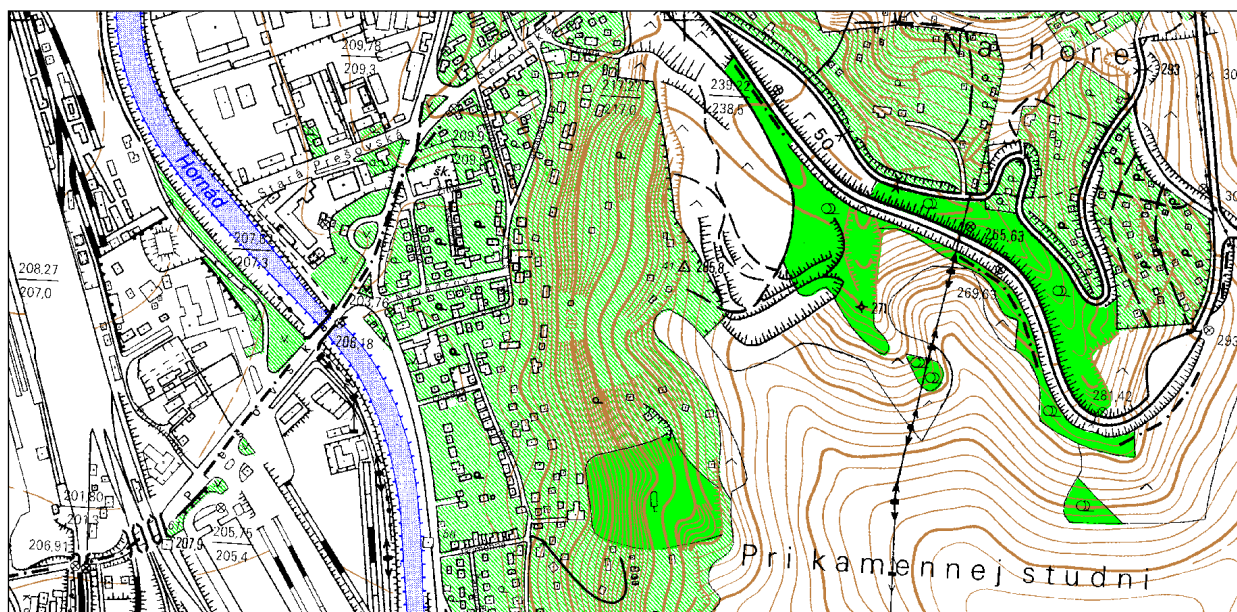
Obr. 2.24: Vrstevnicová mapa digitalizovaná skenovaním do rastrového dátového formátu a následne vektorizovaná v podobe línií s atribútmi o nadmorskej výške, z ktorých bol odvodený digitálny model reliéfu.

Vektorizácia

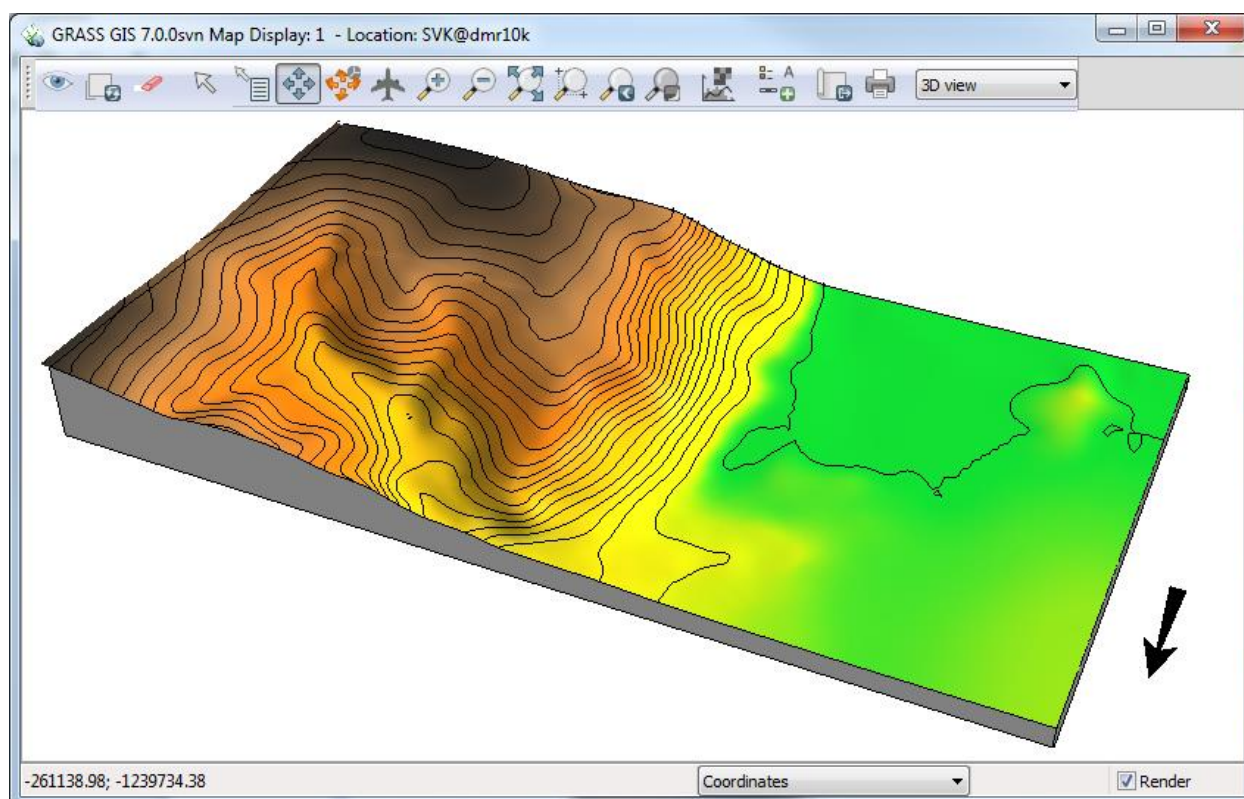
Skenovaním získané rastrové produkty zvyčajne slúžia ako podklad pre získanie vektorových dát, ktorým možno jednoduchšie priradovať atribúty a vykonávať presné geometrické výpočty či geoprocenálne analýzy. Existujú dva typy vektorizácie: manuálna (ručná) a poloautomatická. *Manuálna vektorizácia* je stále veľmi používaná. Jedným z jej spôsobov je vektorizácia obsahu tlačených máp pomocou digitalizačného zariadenia, ktorého súčasťou je digitalizačný stôl alebo tablet, ukazovátka a počítač. Pohodlnejšia, jednoduchšia a presnejšia je vektorizácia na obrazovke počítača nad zoskenovaným rastrovým podkladom pomocou myši. Existujú softvéry, ktoré umožňujú tzv. *poloautomatickú vektorizáciu*. Tieto programy napr. automaticky vytvoria vektorové línie cez súvislé bunky rastra,

Presnosť manuálnej vektorizácie je veľmi závislá od zručnosti a skúsenosti vykonávajúcej osoby. Ide o zdĺhavú a náročnú prácu, ktorá si vyžaduje sústredenie, inak sa do vytváraných dát ľahko vnesú polohové i výškové chyby. Pre vektorizáciu vrstevníc, Carrara et al. (1997) alebo Hengl (2006) odporúčajú nastaviť rozlíšenie pri skenovaní mapy tak, aby veľkosť pixla bola menšia alebo nanajvýš rovnaká ako najmenšia vzdialenosť medzi susednými vrstevnicami. Na strmých svahoch sú totiž vrstevnice kreslené husto vedľa seba a pri nedostatočnom rozlíšení skenovania by na jeden pixel mohlo pripadnúť viacero vrstevníc. El-Sheimy et al. (2005) odporúčajú, aby vrstevnicu pokrývali na šírku jej čiary 2-4 pixely. Obr. 2.24a-b ukazuje efekt správneho a nesprávneho nastavenia DPI. Presnosť reprezentácie reliéfu na základe vektorizovaného výškopisu z máp však nezávisí len od kvality skenovania a vektorizácie, ale aj od metódy určovania nadmorskej výšky, ktorú vrstevnice znázorňujú (Li et al. 2005). Na topografických mapách pre SR boli vrstevnice odvodené fotogrametricky, teda výška reliéfu pod lesnou pokrývkou je odhadovaná.

Zdroje topografických máp pre územie SR podrobnejšie opisuje Hofierka et al. (2014). Veľká časť klasických, analógových mapových diel je v súčasnosti k dispozícii aj v digitálnej rastrovej (Obr. 2.25), v menšej miere aj vo vektorovej forme. Staršie mapové diela vytvorené analógovými technológiami boli postupne od polovice 90. rokov skenované a archivované v digitálnej podobe. Nové mapové diela sú už vytvárané v digitálnej podobe a takto boli aj archivované.



56



Obr. 2.26: Digitálny model reliéfu DMR-3 pre územie na Obr.2.25 zobrazený v 3D perspektíve s odvodenými vrstevnicami (interval 5 m) v GRASS GIS.

Na báze Základnej mapy v mierke 1:50 000 vznikla spojená vektorová mapa SR ako digitálne mapové dielo SVM 50. Obsah základných máp bol naskenovaný, georeferencovaný a zvektorizovaný. Tematický obsah mapy bol rozdelený do jednotlivých dátových vrstiev pre GIS. SVM 50 je vo svojej internetovej verzii k dispozícii aj na geoportáli Slovenskej agentúry pre životné prostredie (SAŽP). Generalizáciou SVM 50 vznikol odvodený digitálny produkt - Spojitá digitálna vektorová mapa SVM 500. Výškopis SVM 50 a SVM 500 možno použiť pre tvorbu DMR územia SR.

V súčasnosti najdetailnejší DMR s celoštátnym pokrytím je *Digitálny model reliéfu úrovne 3* (Obr. 2.26). Základným zdrojom informácií pre jeho tvorbu boli vojenské topografické mapy v mierke 1:10 000 a 1:25 000. Bol poskytnutý aj pre civilné využitie cestou ÚGKK SR. V civilnom sektore ÚGKK SR bola vytvorená základná báza dát pre geografický informačný systém (ZBGIS), ktorá predstavuje priestorovo a objektovo orientovanú databázu s úrovňou obsahovej podrobnosti zodpovedajúcej základnej mape 1:10 000, s polohovou presnosťou do 0,5 m. Referenčnými geodetickými systémami sú ETRS89 a EVRS2000. Zber dát má prebiehať najmä na základe fotogrametrického zberu dát stereoskopickým spracovaním leteckých meračských snímok (LMS) metódami digitálnej fotogrametrie, čo zaručuje vysokú kvalitu databázy s možnosťou vytvorenia troch komponentov: digitálny model reliéfu, 3D digitálny vektorový polohopis, digitálna spojená ortofotomapa. Celý projekt má zabezpečiť kompatibilitu s Európskou úniou a poskytovanie informácií prostredníctvom internetu.

2.9 Porovnanie metód

Vhodnosť použitia jednotlivých metód určovania nadmorskej výšky súvisí s viacerými faktormi, ktoré podmieňujú efektivitu a kvalitu získaných údajov. Z tohto hľadiska rozlišujeme vnútorné a vonkajšie faktory.

Vnútorné faktory vhodnosti použitia metód pre mapovanie geometrie zemského povrchu zahŕňajú limity dané technológiou merania a súvisia s vlastnosťami použitého elektromagnetického žiarenia ako vlnové

dĺžka, fáza a intenzita signálu, ako aj pomer medzi signálom a okolitým šumom. Presnosť určenia polohy meraného bodu klesá so vzrastajúcou vzdialenosťou medzi meracím senzorom a týmto bodom (letová výška, vzdialenosť od totálnej stanice, vzdialenosť medzi bázou a roverom pri GNSS meraní). Napojenie meraní na geodetický súradnicový systém je taktiež dôležitým faktorom topografického mapovania. Merania tradičnou pozemnou tachymetriou možno vcelku jednoducho a presne napojiť na blízke body štátnej referenčnej siete alebo ich možno súradnicovo priradiť pomocou diferenciálneho GNSS merania. Náročnejšie je presne lokalizovať meracie zariadenie na leteckých alebo satelitných nosičoch. Presnosť určenia ich polohy je daná presnosťou IMS a GNSS jednotiek alebo presnosťou určenia pozemných kontrolných (vlicovacích) bodov. Hoci dosiahnuteľné rozlíšenie merania senzormi DPZ je na úrovni milimetrov až centimetrov presnosť polohovej lokalizácie výsledných dát je nanajvýš rovnaká ako presnosť IMS/GNSS jednotky (Lillesand et al., 2004, Shan a Toth, 2008). Celkovú geometrickú presnosť získavania výškových údajov porovnáva Tab. 2.4.

Vonkajšie faktory nasadenia jednotlivých metód mapovania pre tvorbu DMR zahŕňajú vlastnosti okolitého prostredia, ktorým preniká elektromagnetické žiarenie ako: vlastnosti atmosféry, striedanie dňa a noci, prekážky, efekty viaccestného šírenia signálu, odrazivosť a textúra povrchu.

Vlastnosti atmosféry ovplyvňujú všetky opisované metódy zberu údajov o nadmorskej výške. Ich efekt sa prenáša aj do sekundárnych dát (papierové mapy) cez dáta získané primárnym zberom (letecké snímky). Schopnosť žiarenia prenikať atmosférou je daná vlnovou dĺžkou žiarenia a najmä obsahom vody a prachových častí vo vzduchu. Najviac je vlastnosťami atmosféry ovplyvnený pasívny DPZ v oblasti viditeľnej časti elektromagnetického spektra, teda fotogrametria a multispektrálne skenovanie. Podobne je obmedzené aj pozemné tachymetrické mapovanie. Dôvodom je, že tieto metódy využívajú odrazené slnečné žiarenie, ktoré prirodzene v noci nie je k dispozícii. Navyše letecká fotogrametria a satelitné multispektrálne skenovanie vyžadujú jasnú, bezoblačnú oblohu resp. veľmi nízku mieru oblačnosti. Letecká fotogrametrická misia sa plánuje s ohľadom na minimalizáciu efektu zatienenia územia, čo je okolo poludnia (Lillesand et al. 2004).

Tab. 2.4: Všeobecná presnosť získavania údajov podľa metód a typu nosiča.

pozemné metódy	geometrická presnosť	efektívny dosah merania
tachymetria	$10^{-4} - 10^{-3}$ m	$10^2 - 10^3$ m
diferenciálne GNSS	$10^{-3} - 10^0$ m	$10^3 - 10^4$ m
absolútne GNSS meranie	$10^0 - 10^1$ m	-
laserové skenovanie	$10^{-3} - 10^{-2}$ m	$10^1 - 10^2$ m
letecké metódy	geometrická presnosť	výška letu nad terénom
laserové skenovanie	$10^{-2} - 10^0$ m	80 - 3000 m
fotogrametria	$10^{-1} - 10^1$ m	300 - 3000 m
SAR interferometria	$10^0 - 10^1$ m	6000 - 9000 m
vesmírne metódy	geometrická presnosť	výška letu nad terénom
laserové skenovanie	$10^{-3} - 10^{-2}$ m	600 - 900 km
fotogrametria	$10^{-1} - 10^2$ m	
SAR interferometria	$10^1 - 10^2$ m	
SAR radargrametria	$10^1 - 10^2$ m	

Údaje v tabuľke pochádzajú z nasledovných zdrojov: Lillesand et al. (2004), Jensen (2007), Shan a Toth (2008), Mercer (2001), Tennant a Coyne (1999), a tiež zo špecifikácií pre systémy Star3i, UltraCamD Vexcel, Global Laser Altimetry Satellite (GLAS), Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), LANDSAT, Ikonos, GeoEye, QuickBird, Leica HDS3000, Leica GPS 1200+, TPS 1200, Optech ALTM.

Aktívne metódy DPZ ako SAR alebo LiDAR v menšej miere závisia *od charakteru počasia a časti dňa* ako pasívne metódy DPZ, keďže využívajú vlastný zdroj energie elektromagnetického žiarenia. Na druhej strane však je potrebný silnejší zdroj energie alebo častejšie dobíjanie batérii. Najmä v prípade SAR-u je tiež výhodou využívanie oveľa dlhších vlnových dĺžok ako má viditeľné svetlo, čo umožňuje prienik oblačnosťou a menší vplyv prašnosti ovzdušia. Pri laserovom skenovaní je dokonca výhodou nízka intenzita slnečného žiarenia alebo až nočné snímanie. SAR je vhodnou alternatívou najmä v oblastiach, kde je použitie fotogrametrie alebo LiDAR-u limitované z dôvodov častej oblačnosti a prašnosti ako napríklad rovníkové oblasti, púšte, či krajiny s trvalou snehovou pokrývkou.

Schopnosť mapovať povrch reliéfu (terénu) je daná tiež *fyzickými prekážkami a krajinnou pokrývkou*. Pri všetkých metódach je problémom efekt zatienenia, ktorý možno eliminovať snímaním z rôznych smerov alebo uhlov pohľadu. Povrch terénu nemožno mapovať pokiaľ ho zakrývajú iné objekty ako vysoká a hustá vegetácia alebo umelé objekty (napr. budovy). Aktívne metódy DPZ čiastočne eliminujú tento problém najmä pre reliéf zakrytý vegetáciou. Pri fotogrametrii sa výška povrchu pod vegetáciou odhaduje. Umelé objekty sú zväčša sofistikovanými algoritmami filtrovateľné.

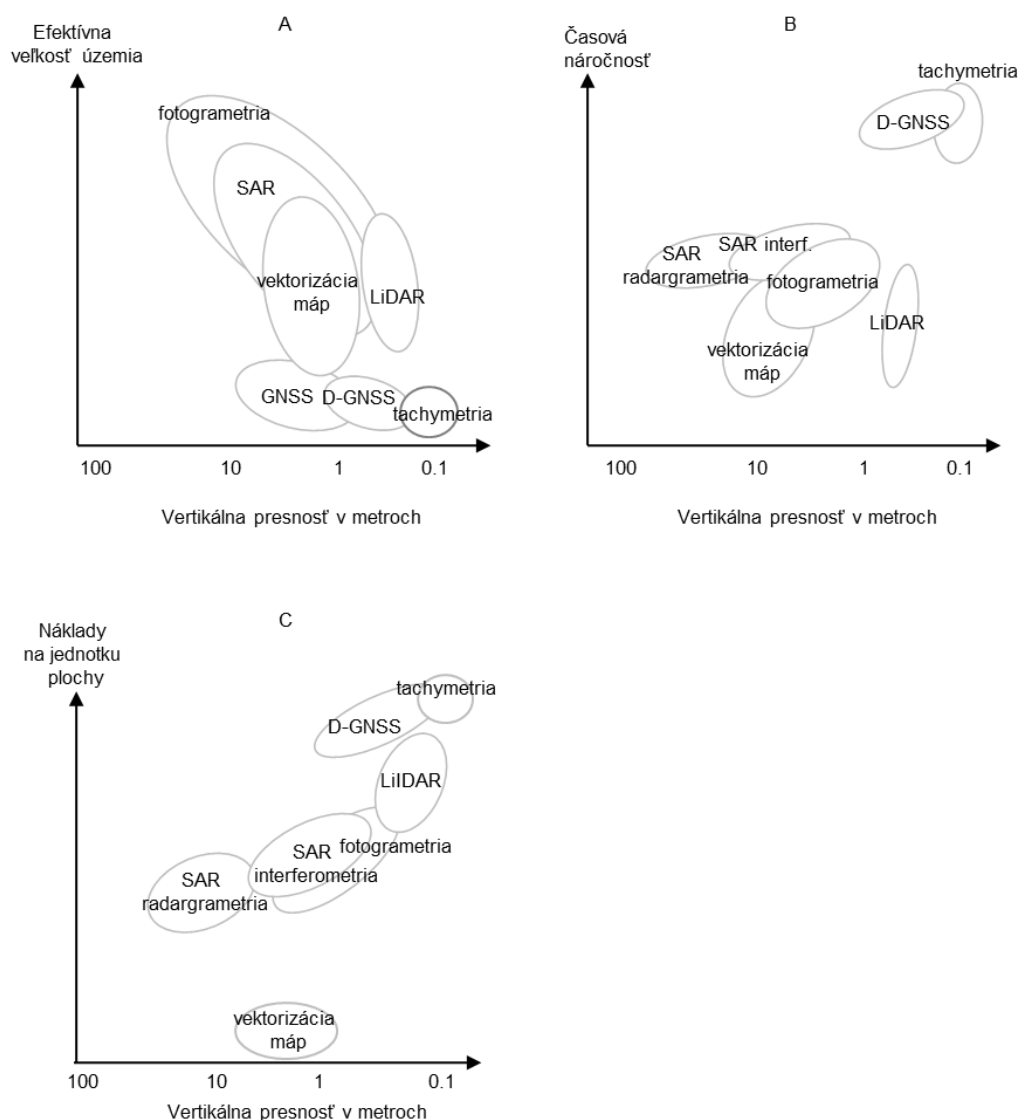
Odrazivosť povrchu je významným faktorom najmä pri aktívnych metódach DPZ. Fyzikálno-chemické vlastnosti materiálu, sklon a orientácia povrchu vzhľadom na zdroj žiarenia podmieňujú intenzitu odrazeného žiarenia.

Problémom je tiež *viaccestné šírenie signálu* (angl. multi-path reflection), ktoré pri GNSS meraní ako aj SAR-e spôsobuje nepresnosť určenia polohy objektu. LiDAR a fotogrametria sú v tejto súvislosti menej ovplyvňované, pretože pracujú s kratšími vlnovými dĺžkami. *Textúra obrazu* je dôležitým faktorom pri fotogrametrii a SAR radargrametrii založených na vyhľadávaní zhodných zhlukov pixlov v streosnímkach. Použitie fotogrametrie pre určovanie výšok je obmedzené v oblastiach, ktorých obrazový záznam je málo kontrastný, ako napríklad zasnežené alebo zaľadnené územia, povrch hladiny oceánu, pieskové púšte. Tab. 2.4 sumarizuje a porovnáva vplyv vonkajších faktorov na presnosť a použitie viacerých metód mapovanie. Digitalizácia sa javí od vonkajších faktorov nezávislá, avšak ich vplyv sa do máp prenáša cez údaje získané primárnym zberom.

Tab. 2.4: Vplyv vonkajších faktorov na zber výškových údajov.

faktor	tachymetria	GNSS	fotogrametria	SAR interferometria	SAR radargrametria	LiDAR	Sekundárny zber vektorizáciou máp
oblačnosť, prašnosť zrážky	nízky	nízky	vysoký	nízky to stredný	nízky to stredný	stredný	nevzťahuje sa
odrazivosť povrchu	stredný	nevzťahuje sa	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	nevzťahuje sa
textúra obrazu	nevzťahuje sa	nevzťahuje sa	vysoký	nevzťahuje sa	vysoký	nevzťahuje sa	nevzťahuje sa
určenie polohy senzora	nízky	nízky	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	nevzťahuje sa
objekty na teréne	nízky	nízky	vysoký	stredný	stredný	stredný	nízky
viaccestné šírenie žiarenia	nízky	nízky	nízky	stredný	stredný	stredný	nevzťahuje sa

Popri vonkajších a vnútorných faktoroch je efektivita získavania výškových údajov podmienená aj *nákladmi, dostupným množstvom času a rozsahom mapovaného územia*. Uvedené faktory závisia *od účelu projektu*. Obr. 2.27 schematicky znázorňuje súvis medzi vertikálnou presnosťou a uvedenými tromi faktormi účelu mapovania zostavený na základe citovanej literatúry. Elipsy vyjadrujú približný rozsah domény, v ktorej je metóda všeobecne aplikovateľná a zmysluplne porovnateľná s inými. V prípade metód DPZ je uvažované mapovanie pomocou leteckých nosičov. Obr. 2.27a poukazuje na veľkosť územia, pre ktorú je efektívne využiť jednotlivé metódy zberu. Priamy zber je vhodný pre relatívne menšie oblasti, avšak poskytuje najväčšiu presnosť merania. S rastúcou plochou mapovaného územia výrazne rastú požiadavky na personál a čas. Tachymetria a pozemné laserové skenovanie sú obmedzené dosahom medzi meracím prístrojom a mapovaným miestom. GNSS meranie je z tohto pohľadu omnoho menej závislé, keďže signál z družíc je šírený rovnomerne. Uplatnenie metód leteckého DPZ je efektívne pre väčšie oblasti od rádovo niekoľko kilometrov štvorcových, pričom benefitom je veľké množstvo dát získané za kratší čas. Dosahovaná presnosť je oproti pozemným metódam mapovania nižšia a je závislá najmä od výšky letu. Pri nižších letových výškach na úrovni niekoľkých stoviek metrov možno dosiahnuť centimetrovú presnosť. Vertikálna presnosť je najvyššia v prípade nasadenia LiDAR-u. LiDAR a SAR majú vysoké nároky na zdroj energie, avšak LiDAR sa používa pri nižších letových výškach ako SAR, preto ním možno pokryť menšie územie v porovnaní so SAR-om (Mercer, 2001).



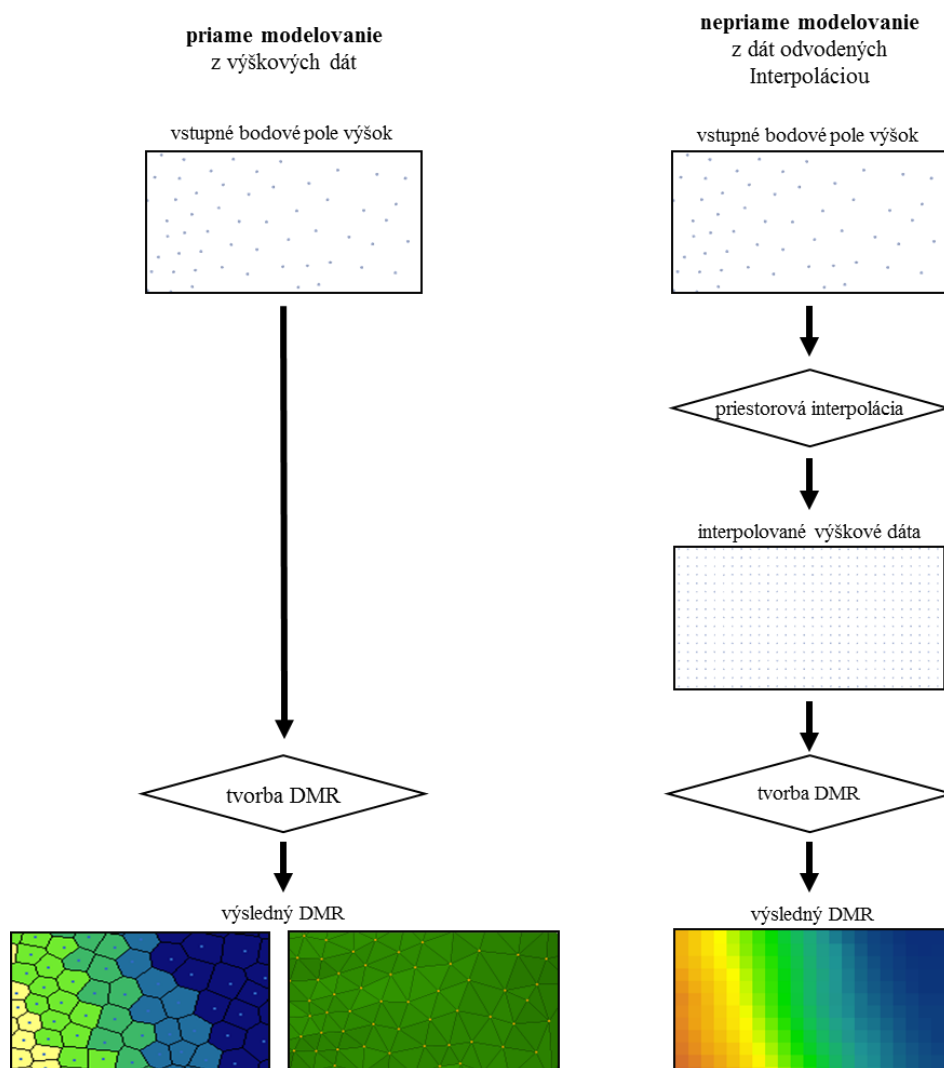
Obr. 2.27: Relatívny vzťah medzi vertikálnou presnosťou a (a) efektívnou veľkosťou územia, (b) časovou náročnosťou zber pri zachovaní rovnakej plochy územia a (c) nákladmi na jednotkovú plochu (upravené podľa Mercer, 2001). Spomedzi metód DPZ je uvažované iba snímanie z leteckých nosičov.

Mapovanie fotogrametriou je menej náročné na zdroj energie, z čoho vyplýva možnosť pokryť väčšie územie. Náklon elipsy na obrázku vyjadruje fakt, že pre zväčšenie rozsahu mapovaného územia, pričom časové nároky nezvyšujeme, je potrebné zvýšiť letovú výšku, čo znižuje presnosť údajov. Vektorizácia máp je použiteľná aj pre veľké územia, avšak je potrebné najat' viac personálu a kompenzovať požiadavku mierky a presnosti. Obr. 2.27b porovnáva požadované množstvo času a presnosť mapovania za predpokladu, že veľkosť územia je konštantná. Plochu územia v tomto prípade treba vnímať ako rozumne zvolenú, pretože v prípade niekoľkých hektárov je časovo oveľa menej náročné nasadiť pozemnú tachymetriu ako zorganizovať lidarovú misiu, vzlietnuť a zbierať údaje, pristáť a spracovať ich. Z hľadiska kompromisu medzi časom a množstvom údajov je laserové skenovanie najefektívnejšou metódou, pretože ním priamo počas zberu získavame relatívne veľmi presné vektorové údaje s vysokou hustotou zberu a tieto údaje si v porovnaní s inými leteckými metódami nevyžadujú veľa času na spracovanie. Pozemné metódy zberu ako diferenciálne GNSS (D-GNSS) či tachymetria sú síce presnejšie, avšak pre rovnaké územie vyžadujú oveľa viac mapovacieho času. Pri SAR-e je radargrametria menej presná ako interferometria, hoci zber dát a ich spracovanie trvá približne rovnako dlho. Digitalizácia máp je relatívne rýchla metóda pre zber dát na veľkých územiach avšak hustota dát a presnosť súvisia s kvalitou obsahu mapy. Obr. 2.27c znázorňuje vzťah medzi relatívnymi nákladmi na jednotku plochy a vertikálnou presnosťou mapovania. Ide o syntézu predošlých dvoch faktorov efektivity mapovania. Náklady sú relatívne pre každú metódu a predstavujú priemerné náklady na produkciu dát získaných jednotlivými metódami zberu. Sekundárne údaje možno považovať za najlacnejší zdroj dát. Aj z toho dôvodu z nich boli vytvárané digitálne modely reliéfu na celoštátnej úrovni vo väčšine krajín, pre ktoré bolo v minulosti realizované kvalitné a systematické mapovanie územia. Ďalej možno pri ostatných metódach poukázať na rastúce náklady s požiadavkou na vysokú presnosť. V praxi je kľúčové zachovať pomer nákladov ku prínosom (zisk, výhody). Z tohto hľadiska je preto v súčasnosti prirodzeným trendom využívať letecké skenovanie pre tvorbu národných geodatabáz za účelom modelovania reliéfu územia krajiny.

3 Proces tvorby digitálnych výškových modelov

Tvorba digitálnych modelov reliéfu je druhým krokom po zbere údajov o nadmorských výškach (Obr. 1.1). V tejto kapitole je vysvetlený proces tvorby DVM zo zdrojových výškových údajov pričom výsledkom je reprezentácia zemského povrchu ako reliéfnej plochy (DMR) alebo ako plochy krajinného krytu (DSM), v závislosti od toho, ktorý povrch údaje reprezentujú. V ďalšom texte budeme používať termín DMR, hoci obsah sa bude týkať aj tvorby DSM, či digitálnych reprezentácií iných typov zemského povrchu. Vlastnosti a kvalita výsledného modelu úzko súvisí s rozhodovaním pri výbere postupu tvorby modelu, výbere foriem dátovej reprezentácie, výbere parametrov interpolačných funkcií a ďalších faktorov.

Z metodického hľadiska existujú dva základné koncepty tvorby DMR zo vstupného bodového poľa nadmorských výšok v (Obr. 3.1). Metodicky jednoduchší je *priamy postup*, kedy je model zhotovený bezprostredne zo vstupných dát. Tento postup sa uplatňuje pri tvorbe DMR na báze vektorového dátového modelu vo forme trojuholníkových sietí (TIN) alebo Voronoiových polygónov. Možný je aj priamy prevod bodov do rastrového dátového modelu, avšak za predpokladu, že vstupné body pokrývajú všetky bunky budúcej rastrovej mriežky. Inak by sa v mriežke objavili bunky bez dát (angl. void cells), čo spôsobuje problémy pri geomorfometrickej analýze. Priestorovo nehomogénne bodové polia sú oveľa bežnejším vstupom pre modelovanie reliéfu (GNSS merania, vektorizované vrstevnice, mračno bodov z laserového skenovania alebo fotogrametrie).



Obr. 3.1: Schematický postup priamej a nepriamej tvorby modelov reliéfu.

Pre tvorbu rastrových DMR je preto nutné zabezpečiť prevod takýchto dát do pravidelnej priestorovej mriežky. Je nutné použiť *nepriamy postup*, ktorý zahŕňa medzikrok priestorovej interpolácie hodnôt výšok do buniek rastra. Interpolácia je matematická metóda, pomocou ktorej sa vypočíta hodnota modelovaného javu v bode, ktorý leží v priestore medzi vstupnými, zadanými bodmi cez ktoré funkcia/plocha musí prechádzať. Interpoláciu si netreba mýliť s extrapoláciou, pomocou ktorej sa odhadujú hodnoty modelovaného javu mimo zadaných dát (napr. často sa jedná o extrapoláciu časového radu hodnôt do budúcnosti). Existuje nekonečné množstvo interpolačných funkcií, ktoré prechádzajú zadanými bodmi a preto sa definujú ďalšie podmienky, na základe ktorých vznikli rôzne interpolačné metódy. Takýmito podmienkami sú napríklad lokálnosť funkcie alebo jej hladkosť (Mitas a Mitasova, 1999). Priestorovej interpolácii pre tvorbu DMR sa venuje kapitola 3.2. Dátové modely pre vyjadrenie DMR sú vysvetlené v kapitole 3.1.

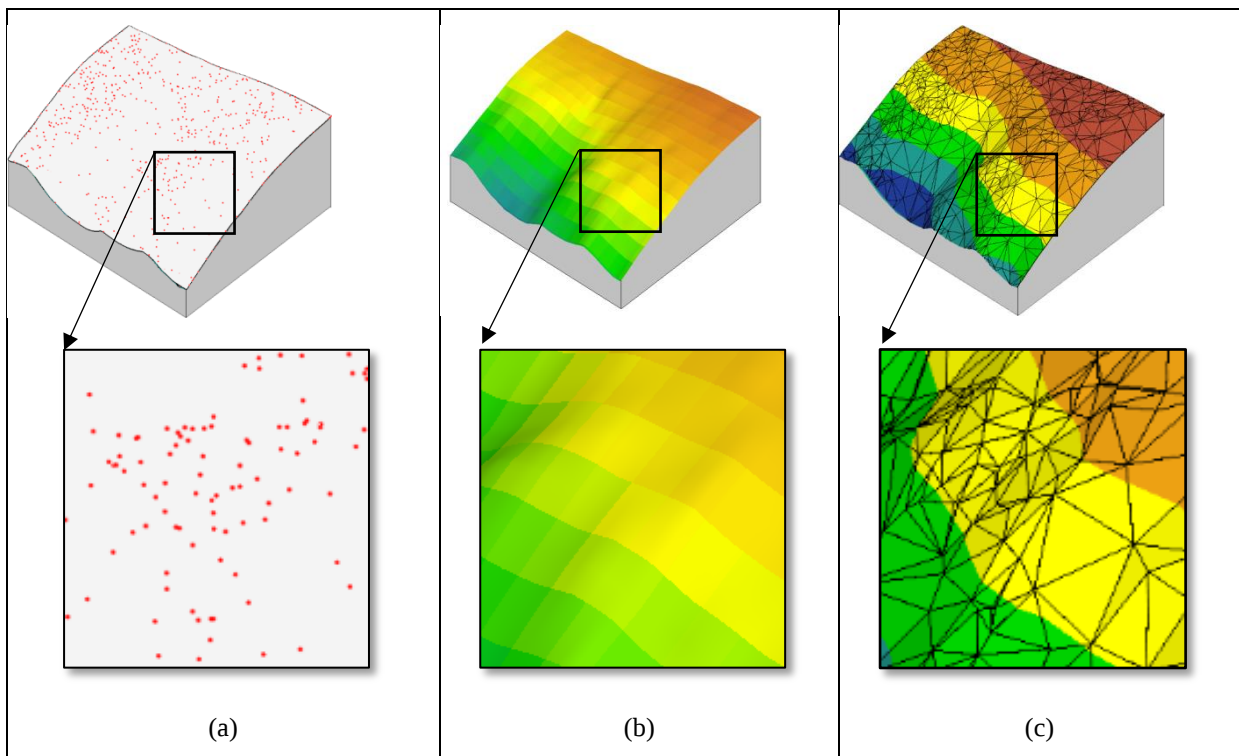
3.1 Výber dátového modelu pre reprezentáciu georeliéfu

V geoinformatike existujú dva základné spôsoby organizácie geopriestorových dát na pamäťovom médiu alebo pre zobrazovanie na monitore, ktoré sa zároveň vzťahujú aj na modely reliéfu. Ide o *vektorový* alebo *rastrový dátový model* (Wilson and Gallant, 2000, Li et al. 2005, Fisher and Tate, 2006, Hengl and Reuter, 2008). Z hľadiska priestorovej geometrie El-Sheimy et al. (2005) hovorí o troch formách digitálnej reprezentácie modelov reliéfu, ktorými sú vrstevnice, mriežky alebo trojuholníkové siete. Haklay (2004) demonštroval tzv. *funkcionálnu údajovú reprezentáciu* DVM pomocou matematických funkcií. Medzi jednotlivými dátovými modelmi je možná konverzia.

Rastrový dátový model

V tvorbe DVM je najbežnejšie používaná rastrová dátová reprezentácia. Jej najpodstatnejším znakom je geometrická pravidelnosť rozmiestnenia výškových údajov, ktoré sú zapísané formou dátovej matice. Spojitosť modelovanej plochy je zabezpečená definovaním veľkosti plochy, ku ktorej sa vzťahuje hodnota výšky. Túto plochu nazývame *bunka* (angl. cell), čo je analogické termínu pixel v prípade obrazového záznamu (Longley et al., 2011). Najčastejšie je využívaná štvorcová alebo odľžniková mriežka, pre ktorú je definovaná dĺžka strany bunky v smere osi x a y , ako aj jej poloha v súradnicovom systéme $(0, x, y)$. Tým je zabezpečené správne priestorové rozmiestnenie hodnôt obsiahnutých v dátovej matici a ich topologické vlastnosti. V tomto prípade možno hovoriť o implicitnom spôsobe určenia polohy, teda priamym definovaním súradníc pre každú hodnotu výšky. Rozmery bunky zároveň definujú priestorové rozlíšenie DVM.

Hlavnou výhodou rastrového dátového modelu pre prácu s DVM je jednoduchosť zápisu a efektívnosť spracovania, keďže nie je potrebné pri každej operácii s dátami narábať s tromi súradnicami, ale iba s hodnotami výšok. Nevýhodou je fixné priestorové rozlíšenie vopred dané veľkosťou bunky pre celý región, ktorý dáta reprezentujú (Obr. 3.1a, b). Dáta môžu totiž nadbytočne reprezentovať oblasti s nemeniacou sa nadmorskou výškou, napr. hladiny jazier, roviny a naopak nedostatočne reprezentovať oblasti s výraznou variabilitou výšok, napr. v pohoriach. Orientácia bunky je taktiež fixná, čo je neprírodné vzhľadom na skutočný charakter reliéfu. Nadôvažok zber dát je zväčša priestorovo nehomogénny s výnimkou SAR interferometrie, kedy sú hodnoty výšok priamo vypočítavané do rastrového formátu. Pre vytvorenie dátovej reprezentácie na báze pravidelnej mriežky je preto nevyhnuté hodnoty výšok pre stred bunky odhadnúť, na čo sa používajú metódy priestorovej interpolácie. Napriek spomenutým nedostatkom sú rastrové DMR práve pre jednoduchosť ich spracovania a návrh algoritmov najmä pre účely geomorfometrickej analýzy preferovaným dátovým modelom (Hofierka et al. 1998, Hengl and Reuter, 2008). Príklad zápisu DVM v rastrovom formáte ASCII je uvedený na Obr. 1.3g a jeho zobrazením sú Obr. 1.3f, h.



Obr. 3.2: Zobrazenie (a) bodového poľa meraní nadmorských výšok reliéfu a z neho odvodené DMR reprezentované formou (b) rastra a (c) nepravidelnej trojuholníkovej siete.

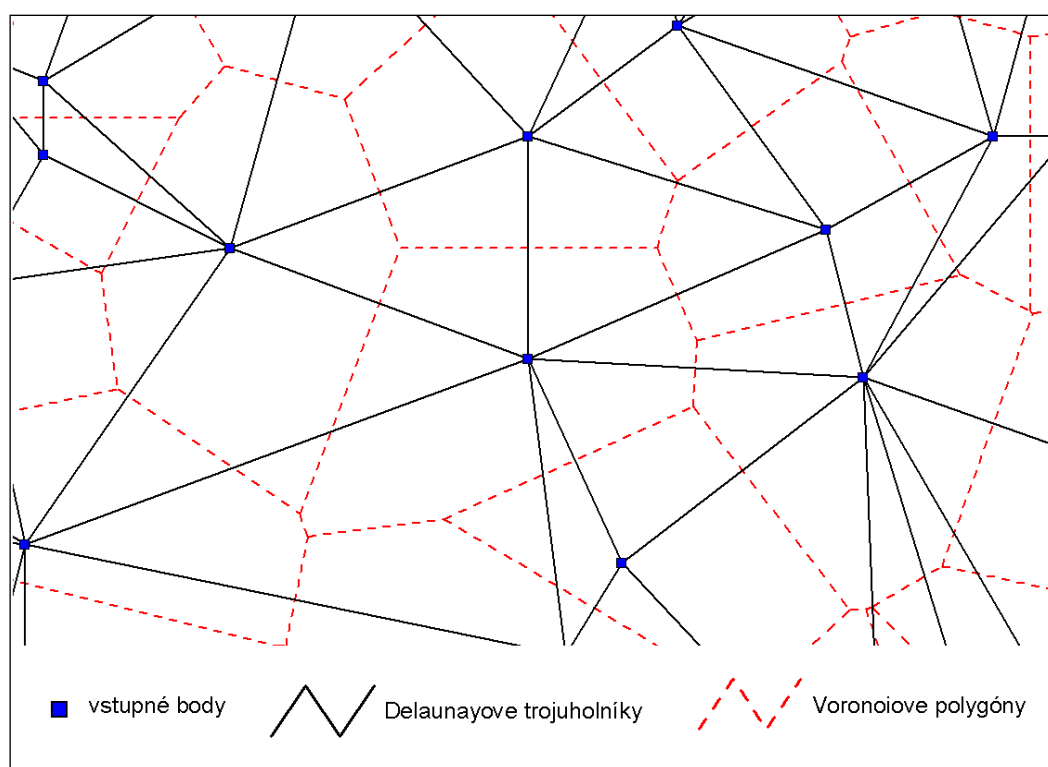
Vektorový dátový model

Vektory sú explicitnou formou dátovej reprezentácie výskytu výšok ako atribútov priestoru. Vektorovým dátovým modelom sú definované body priamo trojicou súradníc (x, y, z). Takýmto spôsobom možno vyjadriť ľubovoľnú priestorovú konfiguráciu hodnôt, na rozdiel od zápisu v rastrovom dátovom modeli. Z bodov možno určením ich konektivity (pospájaním) definovať čiary (línie). Línie s totožným začiatčným a koncovým bodom definujú areály (plochy, polygóny). Hoci body, čiary a plochy možno použiť pre zápis hodnôt nadmorských výšok, nemožno ich považovať za spojitú digitálne formy reprezentácie zemského povrchu. Vektorovou formou sú DVM vyjadrené v podobe *nepravidelných trojuholníkových sietí* (angl. triangulated irregular network, skr. TIN) alebo *Voronoiových polygónov*. Topologické vlastnosti sú definované pravidlami pospájania bodov do siete. Hrany siete a plochy uzatvorené trojuholníkmi a polygónmi zabezpečujú spojitosť plochy modelu (Obr. 3.2c, 3.3).

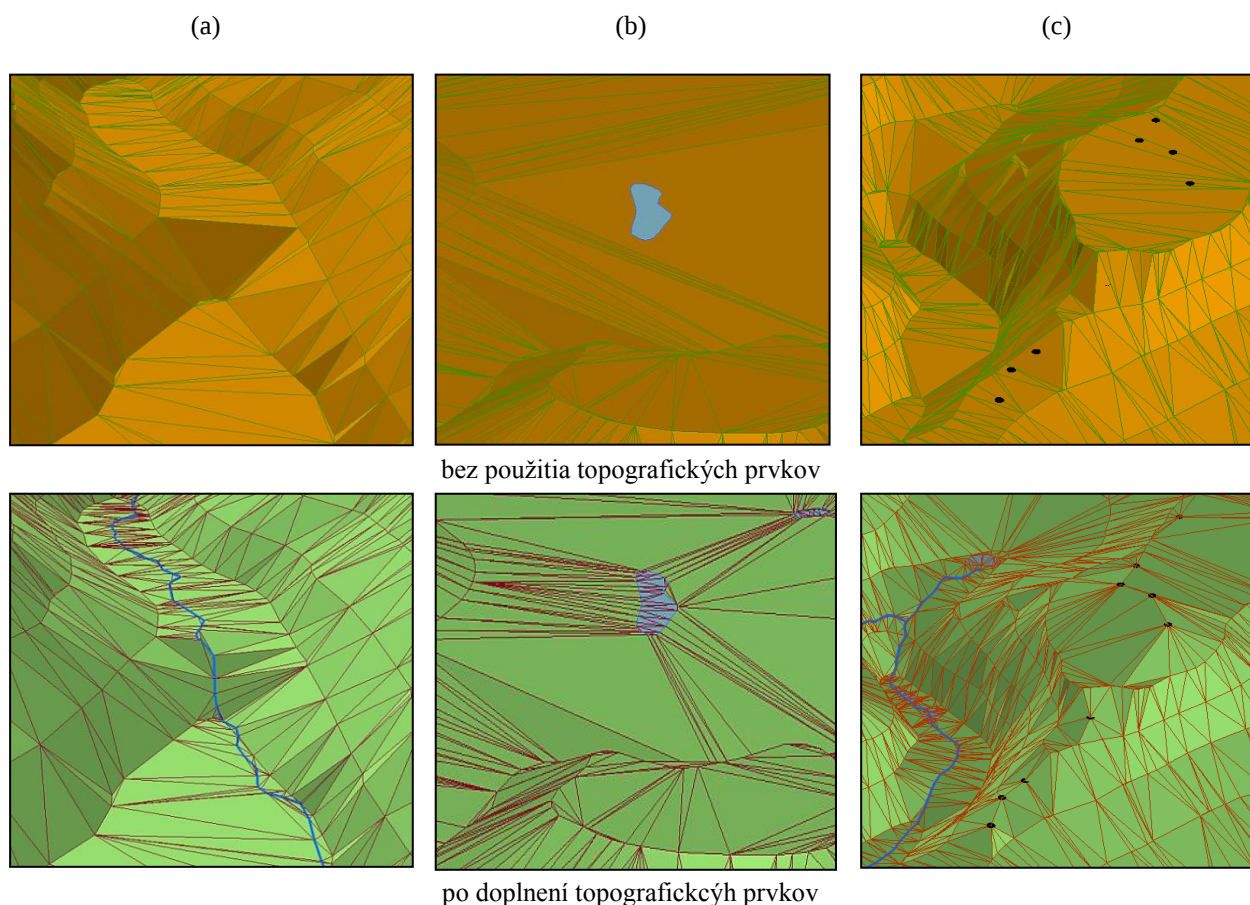
Trojuholníky sú považované za základné plošné geometrické jednotky, pretože z nich možno vyskladať komplexnejší priestorový útvar a zároveň ich možno jednoducho analyticky vyjadriť (Li et al. 2005). Trojuholníkové siete (TIN) sú najpoužívanejšou vektorovou formou DVM. Ich výhodou je jednoduchosť implementácie aj pre priestorovo nehomogénne bodové polia. Schopnosť reprezentovať nepravidelné bodové polia prináša ďalšiu výhodu TIN oproti rastrovému dátovému modelu, ktorou je adaptabilita priestorového rozlíšenia vzhľadom na hustotu bodového poľa. TIN vzniká trianguláciou, ktorá je založená na troch základných požiadavkách (Li et al., 2005):

1. Výsledná sieť trojuholníkov musí byť jedinečná a invariantná, ak sa za východzí bod zvolí hociktorý iný bod.
2. Uhly v trojuholníkoch musia byť čo najbližšie k 60° (Lawsonovo pravidlo), teda trojuholníky majú čo najviac aproximovať rovnostranné trojuholníky, ak nie je daná iná podmienka.
3. Každý trojuholník vzniká pospájaním najbližších bodov a to tak, aby súčet dĺžok v trojuholníku bol najnižší možný.

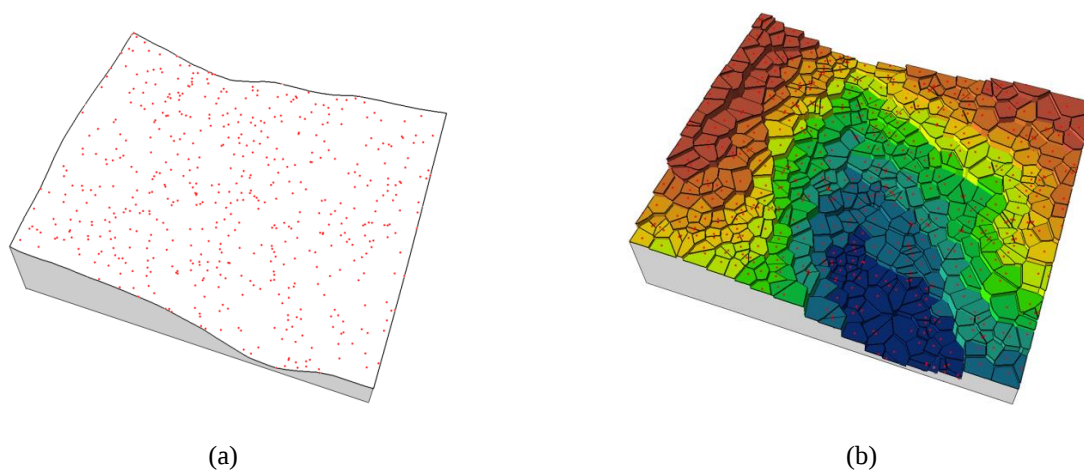
Týmto podmienkam zodpovedá *Delaunayova triangulácia*, ktorá je pri tvorbe DVM bežne používaná (Krcho 1990, Kumler 1994, El-Sheimy et al. 2005, Li et al. 2005), avšak existujú aj iné postupy. Feciskanin (2011) porovnáva viaceré spôsoby optimalizácie TIN vytvoreného na základe Delaunayovej triangulácie. Pri Delaunayovej triangulácii sa trojuholníky definujú tak, že sa hľadá kombinácia trojíc bodov, pre ktoré kružnica opísaná trojuholníku z nich zostaveného neobsahuje žiadny bod z iného trojuholníka. Trojuholníky môžu nadobúdať rôzne rozmery, čo zabezpečuje flexibilitu TIN. Možno doň kedykoľvek doplniť iné prvky reliéfu ako lomové čiary (cesty, rieky, stavby), nové body (vrcholy, sedlá), plochy (jazerá) (Obr.3.4). V prípade rastrových DVM pre rovnakú úlohu potrebné vytvoriť nový model. Preto je TIN častejšie preferovanou dátovou reprezentáciou DVM v technickej praxi (Hofierka et al. 1998). Delaunayova triangulácia je v dualitnom režime s Voronoiovými polygónmi, ako to ukazuje Obr. 3.5. Hrany polygónov vznikajú pospájaním úsečiek vedených kolmo na hrany trojuholníkov cez stred hrany trojuholníka. Jeden polygón zahŕňa plochu, v ktorej je každý bod vzdialený najviac toľko, čo k inému bodu mimo tohto polygónu. Hrany polygónov sú teda ekvidistanty ku dvom najbližším bodom. Voronoiove polygóny sa tiež nazývajú aj Thiessenove alebo Dirichletove polygóny (Neteler and Mitášová, 2004, El-Sheimy, 2005). Hoci ide o plochy, Li et al. (2005) ich chápe ako bodové reprezentácie reliéfu. Základným princípom, je vymedzenie oblasti okolo bodu, v ktorej platí hodnota výšky v tomto bode. Vzniká tak horizontálna plôška s ohraničením daným vplyvom okolitých bodov. Súbor takto definovaných plôšok vzniká spojitý povrch DVM (Obr. 3.3, 3.5). Výhodou Voronoiových polygónov je jednoduchosť a jednoznačnosť princípu ich tvorby, avšak na takto reprezentovanej ploche nemožno určiť derivácie. Preto je využiteľnosť takýchto DVM obmedzená. Uplatnenie nachádzajú najmä v aplikáciách súvisiacich s výpočtom objemov.



Obr. 3.3: Delaunayova triangulácia a Voronoiove polygóny.



Obr. 3.4: Zlepšenie kvality modelovania reliéfu z vektorizovaných vrstevníc v podobe TIN doplnením o líniu údolnice (a), plochu jazier (b) a body s nadmorskými výškami (c).

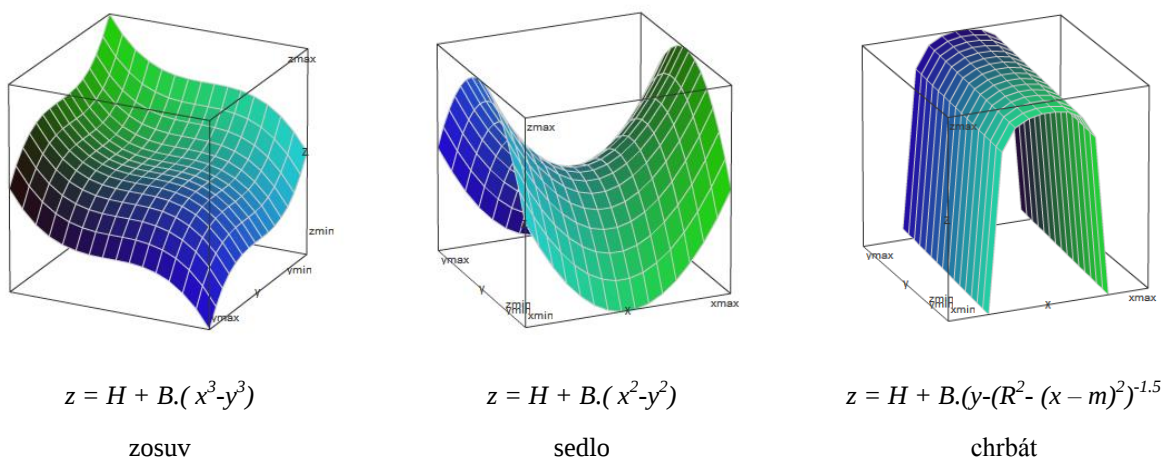


Obr 3.5: Digitálny model reliéfu odvodený z bodového poľa nadmorských výšok (a) v podobe Voronoiových polygónov (b) zobrazený v 3D perspektíve.

Funkcionálny dátový model

Inovatívnu formu dátového zápisu DVM je reprezentácia prostredníctvom súboru analytických funkcií, ktorá vychádza z myšlienky, že reliéf možno segmentovať na menšie a jednoduchšie plochy, ktoré možno vyjadriť analyticky. Teóriu k tejto myšlienke už dávnejšie rozvinuli napríklad Minár (1992), Wood (1996), Minár a Evans (2008). Povrch je v tomto dátovom modeli definovaný množinou matematických funkcií, ktorých analytický tvar je navrhnutý tak, aby čo najlepšie vystihoval povrch preložený bodmi

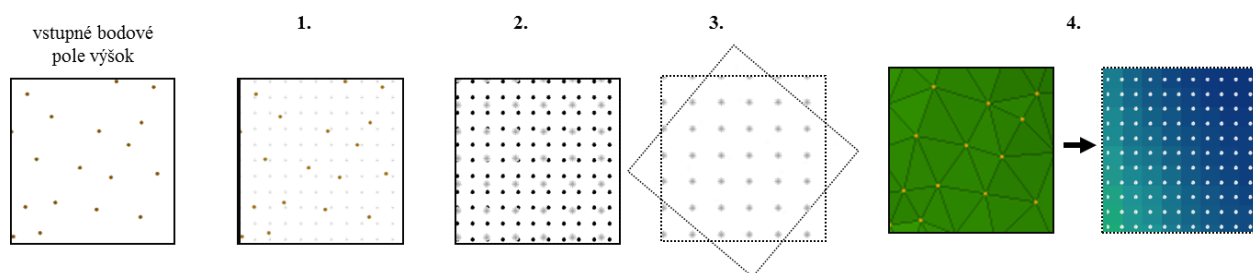
s údajmi o nadmorskej výške (Obr. 3.6). Namiesto zápisu samotných hodnôt, ako v prípade rastrového alebo vektorového modelu, DVM vo funkcionálnom dátovom modeli obsahuje parametre analytických funkcií. Výhodou takéhoto zápisu je mierková nezávislosť zobrazovania dát a presné výpočty morfometrických parametrov, avšak so zvýšenými nárokmi na výpočtový výkon. Haklay (2004) preukázal implementáciu funkcionálneho dátového modelu DVM pre praktické úlohy a porovnal jej výhody a nevýhody s ostatnými spôsobmi vyjadrenia DVM.



Obr. 3.6: Příklad vyjadrenia niektorých foriem reliéfu ako častí skalárneho poľa nadmorských výšok (z) pomocou analytických funkcií uvedených v Minár a Evans (2008). H , B , R sú konštanty, x a y sú súradnice polohy v dvojrozmernom karteziánskom súradnicovom systéme. Funkcie sú vizualizované nástrojom Barbary Kaskosz dostupnom na <http://www.math.uri.edu/~bkaskosz/flashmo/graph3d/>.

3.2 Metódy priestorovej interpolácie

Interpolácia je nevyhnutným krokom v prípade štyroch úloh v digitálnom modelovaní reliéfu súvisiacich najmä s rastrovým dátovým modelom (Obr. 3.7). Prvou úlohou, pri ktorej je nevyhnutné použiť interpoláciu je *zmena orientácie dát* rastrového modelu vzhľadom na súradnicový systém v súvislosti s prevodmi dát medzi rôznymi kartografickými systémami. Taktiež zahŕňa *zmenu priestorového rozlíšenia*, iným slovom *prevzorkovanie* (angl. resampling, convolution) z vyššieho priestorového rozlíšenia (menšia bunka rastra) do nižšieho (väčšia bunka rastra) alebo naopak. Použitie interpolácie si vyžadujú taktiež *konverzie (prevody) medzi údajovými modelmi DMR* ako napríklad konverzia TIN na rastrový DMR. Interpolácia je ďalej nevyhnutná pre *zabezpečenie úplného pokrytia územia hodnotami javu*. Táto úloha súvisí s výpočtom hodnôt výšok do rastrovej mriežky z nepravidelného vstupného bodového poľa výšok alebo v prípade výskytu buniek bez dát už v existujúcom rastrovom DMR (výplň dátových dier). Pri interpolácii zo vstupného bodového poľa do rastrovej mriežky je zásadnou otázkou voľba rozmeru bunky výsledného rastrového DMR. Veľmi dobrou príručkou je práca Hengl (2006), v ktorej autor definuje viacero metód voľby optimálnej veľkosti bunky.



Obr. 3.7: Využitie interpolácie v štyroch typoch úloh: 1 - zabezpečenie úplného pokrytia územia hodnotami javu, 2 - zmenu priestorového rozlíšenia, 3. - zmena orientácie dát, 4. - konverzie (prevody) medzi údajovými modelmi.

Podstatné je vziať do úvahy účel DMR a hustotu meraní vstupného výškového bodového poľa. V prípade vrstevníc to môže byť najmenšia vzdialenosť medzi vrstevnicami v záujmovom území, ktorá sa dá určiť z mapy alebo pomer medzi plochou územia a celkovou dĺžkou vrstevníc. Pri bodových dátach s relatívne pravidelným vzorom ako napríklad z laserového skenovania alebo fotogrametrie, možno za vhodnú veľkosť bunky DMR považovať polovicu priemernej vzdialenosti medzi bodmi.

Interpolácia hodnôt v miestach, v ktorých nebolo uskutočnené meranie, nevyhnutne vytvára istú dávku neurčitosti resp. odchýlky od hodnoty, ktorú by sme získali skutočným meraním. Prirodzeným cieľom všetkých vyvinutých metód interpolácie je snaha minimalizovať tieto odchýlky (mieru neurčitosti) a čo najlepšie sa priblížiť charakteru skutočného reliéfu (aproximovať reliéf). Spoločným znakom interpolačných metód je predpoklad spojitosti povrchu a pozitívnej priestorovej autokorelácie (Li et al. 2005), čo bolo vysvetlené v kapitole 1.8. V prípade modelovania reliéfu interpolačné funkcie uvažujú nadmorskú výšku z ako funkciu polohy $f(x,y)$ v dvojdimenzionálnom súradnicovom systéme danú súradnicami x a y .

Všeobecne možno hodnotu výšky z_0 , ktorá je výsledkom interpolácie, vyjadriť ako vážený priemer meraní zistených výšok na lokalitách s_i (vektorový zápis polohy x_i, y_i), pričom i vyjadruje počet hodnôt a w_i je vyjadrením váhy pre hodnoty výšok. Potom platí:

$$z_0 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot z(s_i)$$

Výpočet hodnoty výšky na zvolenej lokalite (v bode) sa pre jednotlivé typy interpolácie líši v spôsobe určenia váh pre merané hodnoty vstupujúce do interpolácie a ďalej v počte vstupných hodnôt. Váha vstupných bodov je funkciou ich vzdialenosti ku bodu, v ktorom výšku interpolujeme. Prehľad rôznych interpolačných metód možno nájsť v Tab. 3.1 a podrobnosti v množstve publikovaných prác, z ktorých vyberáme Lam (1983), Burrough and McDonnell (1998), Mitáš and Mitášová (1999), alebo Lloyd (2007). Li et al. (2005) a El-Sheimy (2005) sa zameriavajú na interpolačné metódy používané priamo pre tvorbu DMR. Dôležité je upozorniť, že neexistuje univerzálna interpolačná metóda, ktorú by bolo možno aplikovať bez ohľadu na priestorovú hustotu vstupných dát, presnosť merania, mieru podrobnosti vyjadrenia reliéfu a jeho skutočný geometrický charakter. Toto tvrdenie platí aj pre interpoláciu iných javov a procesov v krajine. Dôležité je však poznať základné východiská, na ktorých sú metódy založené a pri tvorbe DMR testovať viaceré metódy. V ďalšom texte je vysvetlené základné delenie interpolačných metód.

Deterministické a stochastické metódy

Z filozofického hľadiska možno reliéf vnímať ako fyzikálne podmienenú (determinovanú) plochu alebo ako súbor hodnôt výšok vyskytujúcich sa v priestore s určitou pravdepodobnosťou. Prvý spomenutý princíp je

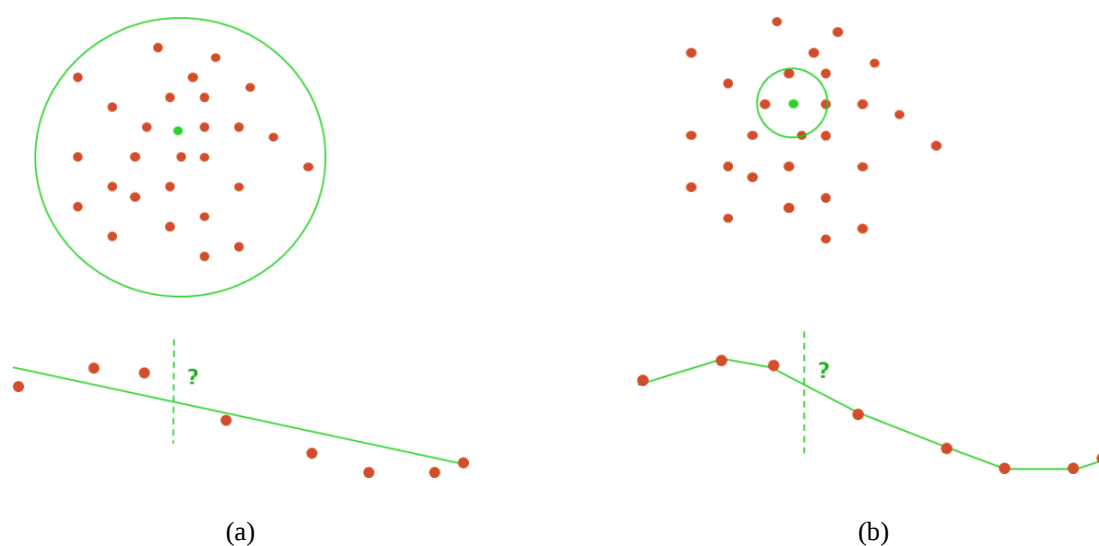
Tab. 3.1 prehľad kritérií a klasifikácie interpolačných metód podľa Li et al. (2005)

Kritérium	Klasifikácia
filozofický prístup	deterministické, stochastické
veľkosť zahrnutého územia	globálne, lokálne
zhodnosť vstupu a výstupu	exaktné, najlepšie pasujúce
hladkosť povrchu	lineárne, nelineárne
spojitosť povrchu	spojité, nespojité
precíznosť funkcie	precízne, aproximačné
geometrická jednotka	bodové, plošné, objemové
doména záujmu	priestorové, spektrálne

nosný pre *deterministické metódy*, Ich hlavným predpokladom je existencia pozitívnej priestorovej autokorelácie interpolovaného javu, ktorá podmieňuje hodnoty javu. Avšak pre účely interpolácie deterministické metódy nijako nepopisujú mieru priestorovej autokorelácie. Na druhej strane, existujú stochastické (pravdepodobnostné) metódy, ktoré pre výpočet hodnoty na zvolenom bode priamo používajú štatistické ukazovatele (modely) miery priestorovej autokorelácie, ktorú určujú na základe meraní získaných vstupných hodnôt výšok. Stochastickými metódami možno určiť aj mieru spoľahlivosti určenia interpolovaných hodnôt. Deterministické metódy považujú náhodnú zložku reliéfu (Obr. 1.10) za súčasť interpolovaného povrchu a modelujú ju spoločne s deterministickou zložkou. Stochastické postupy náhodnú zložku javu uvažujú osobitne a modelujú ju pomocou modelov priestorovej autokorelácie (napr. modelom semivariogramu). Vychádzajú z teórie priestorových náhodných polí založenej na predpoklade, že hodnoty priestorového javu (napr. výšok) získané meraním a na základe nich interpolované hodnoty v iných miestach sú len jednou z mnohých vzoriek reality (jednou realizáciou) určených s istou mierou pravdepodobnosti. Dvomi hlavnými geoštatistickými metódami sú *kriging* a *simulácia*. V geovedách sa stochastické postupy nazývajú pojmom geoštatistika. Podrobnejšie sa jej venuje kapitola 3.4. Deterministickým metódam je venovaná kapitola 3.3.

Globálne a lokálne metódy

Globálnosť alebo lokálnosť interpolačných metód vychádza z hľadiska priestorovej stacionarity dát (viď kapitola 1.8). Globálne metódy predpokladajú nemeniace sa parametre priestorovej stacionarity v celom rozsahu záujmového územia. Globálna interpolácia používa všetky vstupné hodnoty výšok z s cieľom definovať funkciu, ktorá sa najviac približuje k týmto hodnotám (Obr. 3.8a). Na druhej strane lokálne metódy uvažujú o nestacionarite dát, resp. zohľadňujú nestacionaritu a definovanej funkcii dovoľujú lokálne meniť svoje parametre. Prakticky je to zabezpečené použitím len určitého počtu vstupných hodnôt výšok z okolia bodu, v ktorom výšku interpolujeme (Obr. 3.8b). Lloyd (2007) systematicky sumarizuje a opisuje najpoužívanejšie lokálne interpolačné metódy, ktoré nazýva lokálnymi modelmi priestorovej analýzy. Stacionaritu alebo nestacionaritu hodnôt javu nemožno zistiť, ale iba predpokladať. Pre modelovanie reliéfu je vhodné uvažovať o lokálnych metódach, nakoľko často tvar prirodzeného reliéfu možno rozložiť na trend náhodnú zložku a priestorovo autokorelovanú zložku (kapitola 1.8, Obr. 1.10).



Obr. 3.8: Princíp globálnych (a) a lokálnych (b) interpolačných metód. Pre výpočet hodnoty v zelenom bode označenom v priečnom reze otáznikom a prerušovanou vertikálnou čiarou sa použijú vstupné hodnoty z okolia bodu definovaného kruhovou oblasťou.

Reliéf možno interpolovať tak, že výsledná plocha prechádza vstupnými bodmi alebo sa k nim len približuje. V prvom prípade rozlišujeme exaktné interpolačné metódy. Vytvárajú povrch, ktorého hodnoty sú v miestach vstupných výškových hodnôt s nimi totožné (Burrough and McDonnell, 1998). Neexaktné metódy túto podmienku nespĺňajú, teda v miestach vstupných hodnôt sa vypočítané hodnoty od nich odchyľujú. Hoci ide o úmyselne vnesenú neurčitosť, neexaktný prístup má výhodu v tom, že redukuje výskyt umelých prvkov výsledného povrchu, keďže dáva použitej matematickej funkcii istú voľnosť. Nežiaduce, falošné artefakty interpolovaného povrchu vznikajú v oblastiach s vysokou variáciou hodnôt či už v dôsledku výskytu prirodzených foriem reliéfu (napr. prechod strmých svahov do roviny, zrážy), v dôsledku nepresnosti merania výšok alebo príliš hustého bodového poľa vzhľadom na zvolenú veľkosť bunky rastra. Prípad na Obr. 3.8a je zároveň príkladom neexaktného určenia výšok, zatiaľ čo Obr. 3.8b zobrazuje exaktný spôsob určenia. Pri viacerých typoch interpolačných metód sa voľnosť funkcie reguluje parametrom *zhladzovania* (angl. *smoothing*). Pokiaľ sa zhladzovanie nepoužije (hodnota parametra sa rovná nule) funkcia nadobúda charakter aproximačnej funkcie, teda správa sa ako exaktný interpolátor. Príkladom sú splajnové funkcie implementované napr. ako nástroj *v.surf.rst* v GRASS GIS (Neteler a Mitasova, 2004).

3.3 Deterministické interpolačné metódy

V tejto časti vysvetlíme princípy najbežnejšie používaných deterministických metód pre digitálne modelovanie reliéfu. Spoločným znakom týchto funkcií je aproximácia povrchu pomocou polynomických funkcií rôzneho stupňa. Všeobecne možno interpolačné metódy na báze polynómov zapísať v tvare:

$$z = f(x, y) = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n a_{i,j} \cdot x^i \cdot y^j ,$$

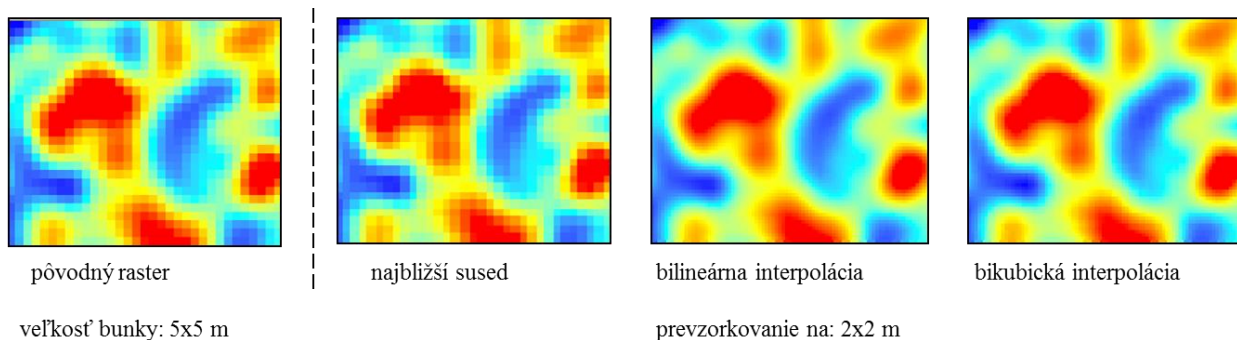
kde interpolovaná hodnota výšky z je funkciou súradníc x, y . Pre určenie hodnoty z interpoláciou je potrebné vypočítať koeficienty $a_{i,j}$. Jednotlivé metódy sa líšia práve spôsobom určovania $a_{i,j}$. Hodnota v interpolovanom bode je polynomickou funkciou okolitých bodov. Podľa stupňa polynómu daného v smere osi x parametrom m a v smere osi y parametrom n si výpočet vyžaduje riešenie sústavy rovníc s $(m+1) \cdot (n+1)$ neznámymi, ktorými sú koeficienty $a_{i,j}$. Do sústavy vstupujú výšky zistené meraním na bodoch (x, y) . Po určení koeficientov $a_{i,j}$, sa dosadia do rovnice x, y súradnice interpolovaného bodu a vypočíta sa tak hodnota z v tomto bode. Najbežnejším formami interpolácie na báze polynómov sú:

- *metóda najbližšieho suseda* (angl. *nearest neighbour*)
- *jednoduchá lineárna interpolácia* (angl. *simple linear interpolation*)
- *bilineárna interpolácia* (angl. *bilinear interpolation*)
- *bikubická interpolácia* (angl. *bicubic interpolation, cubic convolution*).

Metóda najbližšieho suseda je jednoduchou metódou, ktorá interpolovanému bodu priradí hodnotu z najbližšieho bodu so známou hodnotou. V polynomickom tvare má zápis:

$$z = a_{00} ,$$

pretože $m=0, n=0$. Prakticky sa môže realizovať použitím Voronoiových polygónov a zisťovaním polohy interpolovaného bodu vzhľadom na polygón. Interpolovanému bodu sa priradí hodnota výšky platná v celom polygóne. Metóda je vhodná pre diskrétnu sa meniace javy reprezentované dvojdimenzionálnymi maticami (rastrami) ako sú digitálne obrazové záznamy (letecké snímky), rasterizované mapy, rastrové údaje o krajinej pokrývke alebo výpočty objemov. Interpolácia metódou najbližšieho suseda sa používa najmä pri zmene rozlíšenia rastrových geodát a nie je vhodná pre prácu s reprezentáciami spojitých javov,



Obr. 3.9: Porovnanie výsledku interpolácie pri prevzorkovaní rastrového DMR tromi metódami do rastra s vyšším priestorovým rozlíšením.

akým je aj georeliéf (Obr. 3.9). Príkladom implementácie metódy najbližšieho suseda za účelom prevzorkovania rastrových dát v open-source GIS je modul *r.resamp.interp* implementovaný v GRASS GIS.

Jednoduchá lineárna interpolácia a *bilineárna interpolácia* využívajú pre výpočet hodnoty z polynomickej funkcie prvého rádu exaktne sa primkávajúce ku vstupným bodom interpolácie. Pri jednoduchšej lineárnej interpolácii $m=0$, $n=1$ a výpočet z je potom daný rovnicou:

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y.$$

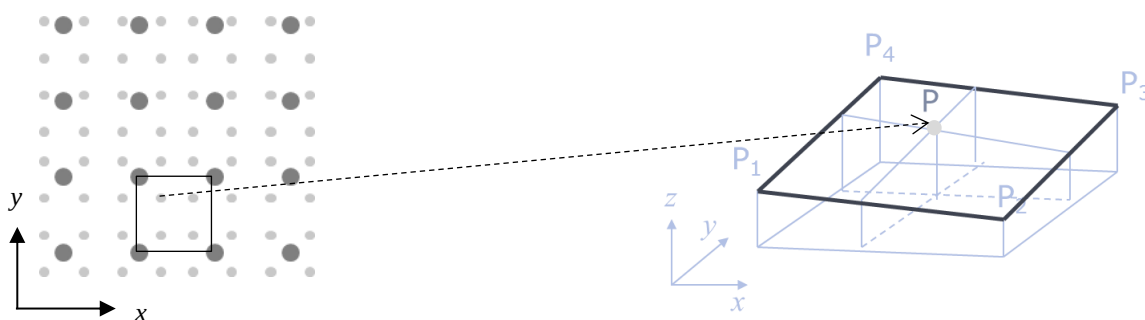
Pre výpočet neznámych koeficientov a_{00} , a_{10} , a_{01} je potrebné riešiť sústavu troch rovníc s tromi neznámymi. Pre riešenie sú potrebné hodnoty výšok $z_{1,2,3}$ a hodnoty súradníc miesta ich výskytu $x_{1,2,3}$, $y_{1,2,3}$ najbližších ku interpolovanému bodu. Týmto spôsobom sú vypočítavané hodnoty v rámci rovinatej plochy definovanej tromi bodmi v rámci nepravidelných trojuholníkových sietí (TIN) pre vymedzenie izohýps (vrstevníc) alebo pre interpoláciu do rastrovej mriežky z TIN.

Bilineárna interpolácia používa plne rozvinutú polynomickeú funkciu prvého stupňa v smere osi x a v smere osi y , pričom $m=1$, $n=1$, v tvare:

$$z_0 = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy.$$

Štyri neznáme koeficienty vyžadujú riešenie sústavy rovníc so štyrmi neznámymi, ktoré je možné po dosadení súradníc štyroch bodov ($x_{1,2,3,4}$, $y_{1,2,3,4}$, $z_{1,2,3,4}$) ako to zobrazuje Obr. 3.10. Sústavu možno v maticovom tvare vyjadriť ako:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4y_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix}.$$



Obr. 3.10: Bilineárna interpolácia hodnoty z v bode P použitím štyroch susedných bodov P_{1-4} .

Bikubická interpolácia má podobne ako bilineárna plne rozvinutý tvar polynómu v smere osi x a y , pričom $m=3$, $n=3$. Pre výpočet z potom platí:

$$\begin{aligned} z = & a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{20} x^2 + a_{30} x^3 + \\ & + a_{01} \cdot y + a_{11} xy + a_{21} x^2 y + a_{31} x^3 y + \\ & + a_{02} \cdot y^2 + a_{12} xy^2 + a_{22} x^2 y^2 + a_{32} x^3 y^2 + \\ & + a_{03} \cdot y^3 + a_{13} xy^3 + a_{23} x^2 y^3 + a_{33} x^3 y^3 \end{aligned}$$

čo si vyžaduje riešenie sústavy 16 rovníc so 16 neznámymi, k čomu je potrebných 16 bodov so známymi výškami z_{1-16} a súradnicami (x_{1-16}, y_{1-16}) .

Bilineárna a bikubická interpolácia sa najčastejšie využívajú na prevzorkovanie rastrových DMR alebo iných rastrových údajov reprezentujúcich spojité javy za účelom zmeny priestorového rozlíšenia rastra (Obr. 3.6). Taktiež sa používajú pre určenie hodnoty vo zvolených bodoch z rastrového podkladu. Bilineárna interpolácia poskytuje porovnateľné výsledky, čo sa týka vertikálnej presnosti, v porovnaní s bikubickou interpoláciou alebo krigingom (Rees, 2000). Jej výhodou je výpočtová nenáročnosť. V GRASS GIS je bilineárna a bikubická interpolácia implementovaná ako jedna z možností v module ako *r.resamp.interp*.

Metóda vážená inverznou vzdialenosťou

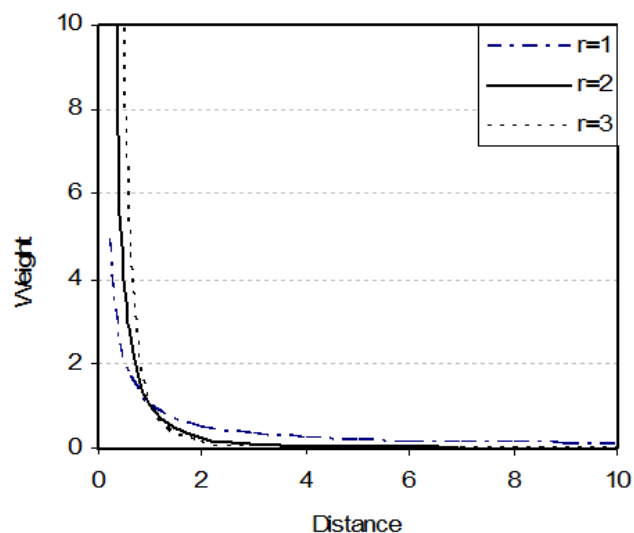
Táto metóda je v GIS softvéroch známa pod anglickým termínom *inverse distance weighting (IDW)* a priamo využíva predpoklad pozitívnej autokorelácie, ktorý znamená, že vplyv známych hodnôt na hodnotu v interpolovanom bode klesá s narastajúcou vzdialenosťou od neho (inverzne). Z toho vyplýva, že váhy známych hodnôt w_i vstupujúcich do interpolácie v rovnici uvedenej v úvode kapitoly 3.2 možno definovať nasledovne:

$$w_i = \frac{d_{i0}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-r}},$$

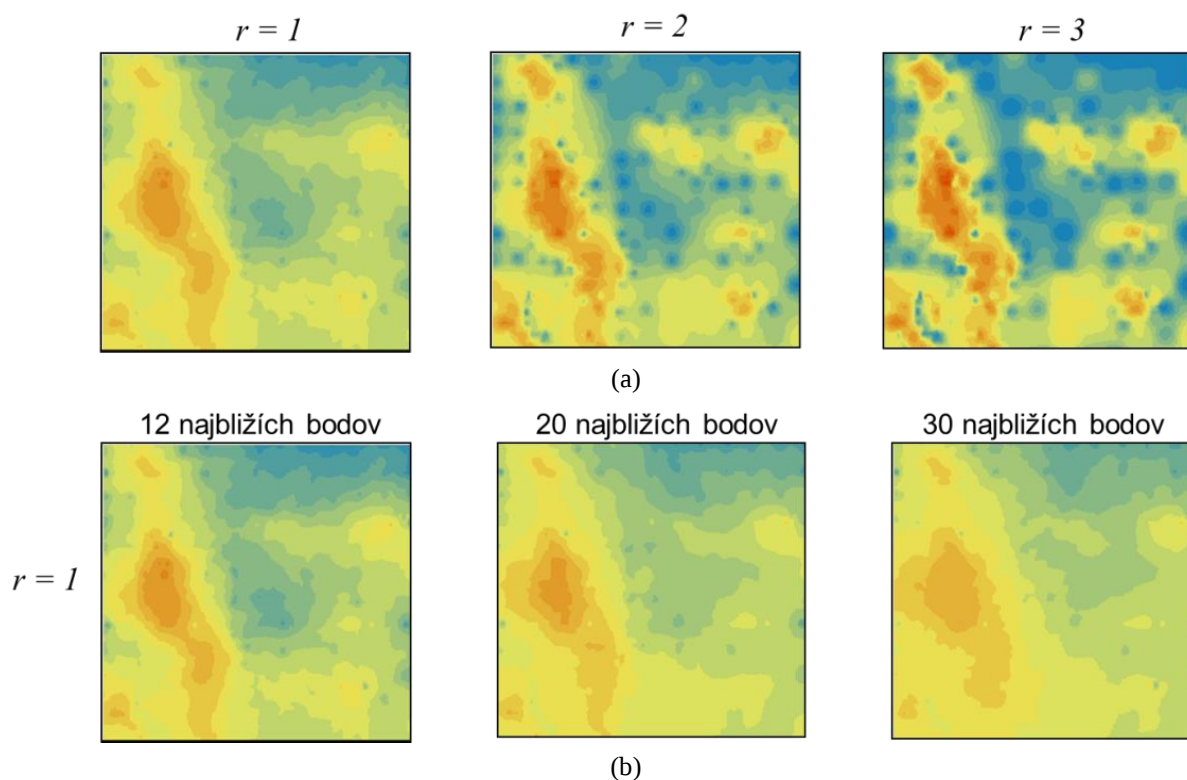
a pre hodnotu interpolovaného javu (napr. nadmorskej výšky) na bode s_0 platí:

$$z(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(s_i) \cdot d_{i0}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-r}},$$

kde d_{i0} vyjadruje vzdialenosť medzi vstupným bodom s_i a interpolovaným bodom s_0 , v ktorom hodnotu javu určujeme, r je mocninovým koeficientom, pre ktorý sa bežne volia hodnoty 1 alebo 2 (de Smith et al. 2009). Obr. 3.11 ukazuje vplyv hodnoty r na zmenu váhy vstupných bodov s narastajúcou vzdialenosťou d_{i0} od nich. Výstupy interpolácie DMR pre rôzne hodnoty r pri nezmenených nastaveniach ostatných parametrov zobrazuje Obr. 3.12a. Množstvo bodov vstupujúcich do interpolácie pre určitý bod sa dá obmedziť rozmerom oblasti okolo interpolovaného bodu alebo priamo zadáním maximálneho počtu vstupných bodov z okolia (Obr. 3.12b). IDW je štandardnou metódou, ktorou možno rýchlo interpolovať relatívne veľké množstvo bodov. Ide o jednoduchú metódu, ktorá je implementovaná vo väčšine GIS softvérov. V GRASS GIS je implementovaná ako modul *v.surf.idw*. Pri zadaní koeficientu $r=0$, majú všetky vstupné body rovnakú váhu a výsledkom je rasterizovaný povrch z metódy Voroniových polygónov. Hoci sa táto metóda pre svoju jednoduchosť bežne používa, nie je veľmi flexibilná a je nevhodná pre nehomogénne v priestore rozmiestnené vstupné bodové polia (Obr. 3.12a). V oblastiach s nízkou hustotou vstupných bodov v ich okolí môžu vznikať neprirodzené vrcholy alebo depresie, tzv. *efekt volského oka* (angl. „bull’s eye“). Použitie IDW je vhodné pre homogénne distribuované bodové polia a pre interpoláciu do rastra s väčšími rozmermi bunky ako je vzájomná vzdialenosť vstupných bodov. To je častým prípadom pri lidarových údajoch (Rees 2000, Anderson et al. 2005, Lloyd a Atkinson 2006, Gallay et al. 2012).



Obr. 3.11: Závislosť váhy vstupných bodov od ich vzdialenosti k interpolovanému bodu pri zmene koeficientu r pre metódu váženou inverznou vzdialenosťou (IDW).



Obr. 3.12: Interpolovaný rastrový DMR metódou váženej inverznej vzdialenosti (IDW) pre (a) rôzne nastavenia mocninového koeficientu r , pričom maximálny počet vstupných bodov je 12 a (b) pre $r=1$ a meniaci sa maximálny počet vstupných bodov.

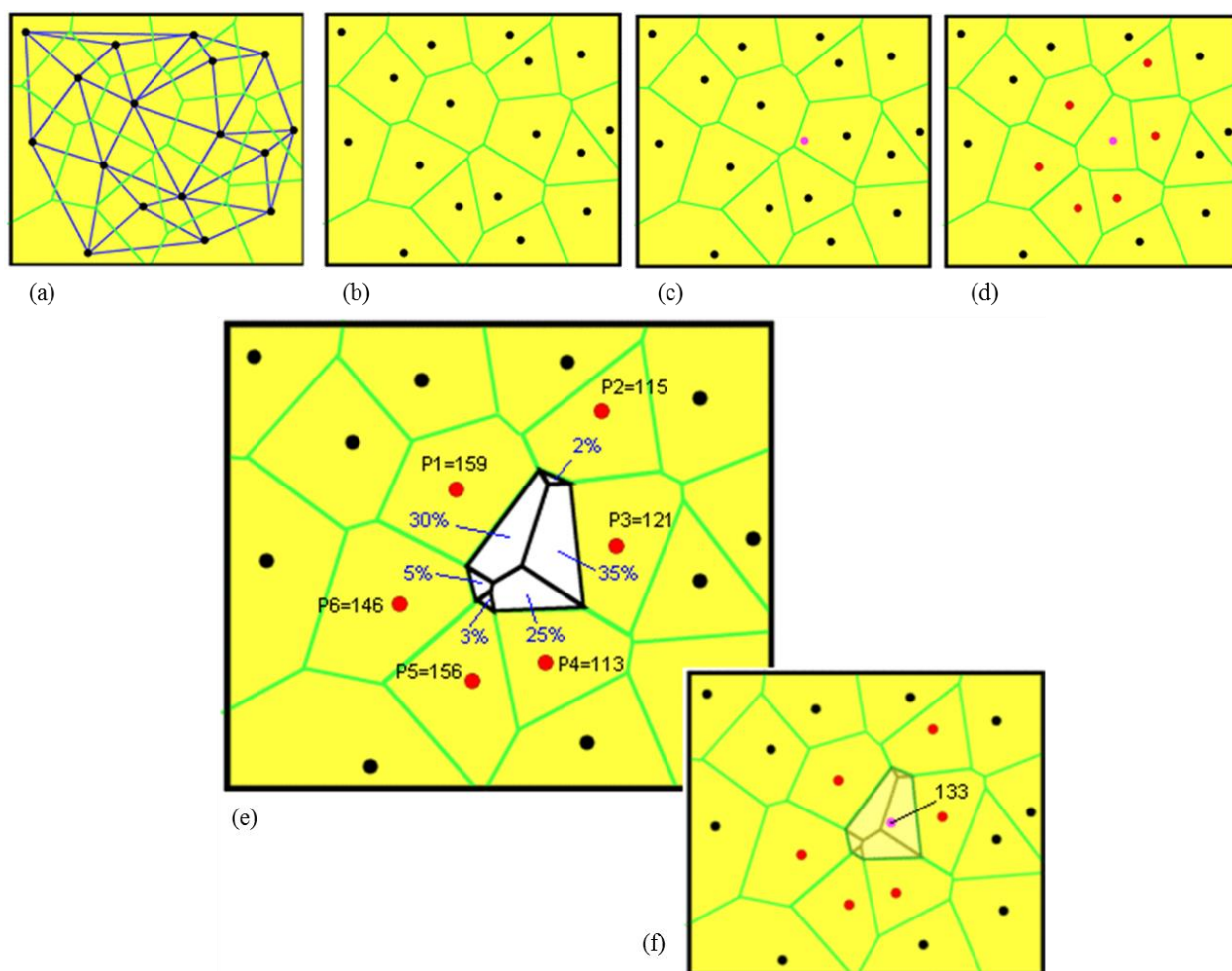
Metóda prirodzeného suseda

Zatiaľ čo pri predchádzajúcej metóde bol výpočet váhy založený na vzdialenosti interpolovaného bodu od meraných hodnôt, pri metóde prirodzeného suseda hodnota váhy súvisí s určením plošného vplyvu okolitých bodov. Pre interpolovaný bod sa zo vstupných bodov s_i so známou hodnotou výšky vytvorí

Delauneyho trianguláciou TIN (Obr. 3.13a) a z nej sieť Voronoiových polygónov (Obr. 3.13b). Polygóny predstavujú prirodzené a objektívne územie vplyvu meraných (známych) hodnôt. V ďalšom kroku sa po pridaní bodu, v ktorom má byť interpolovaná výška (fialový bod na Obr. 3.13c), prepočíta sieť Voronoiových polygónov (Obr. 3.10d). Dotkne sa to iba niektorých bodov v susedstve interpolovaného bodu (červené na Obr. 3.13d). Body, ktorých pôvodné polygóny sa prekrývajú s polygónom interpolovaného bodu (červené na Obr. 3.13e), sú teda prirodzení susedia a vstupujú do interpolácie. Do výpočtu váh w_i pre hodnoty prirodzených susedov:

$$w_i = \frac{p_i - p_{i0}}{p_0}$$

vstupuje plocha polygónu pre interpolovaný bod p_0 , plocha polygónu prirodzeného suseda p_i pred pridaním interpolovaného bodu a plocha po pridaní interpolovaného bodu do siete polygónov p_{i0} . Výsledné váhy a známe hodnoty prirodzených susedov (Obr. 3.13e) sa použijú pre interpoláciu hodnoty 133 (Obr. 3.13f) nasledovne: $(159*0,3) + (115*0,02) + (121*0,35) + (113*0,25) + (156*0,03) + (146*0,05) = 133$. V metóde prirodzeného suseda sa použijú iba body, ktoré majú „jednoznačný“ vplyv na hodnotu v interpolovanom bode. Výhodou je, že nie je nutné rozhodovať sa o počte vstupných bodov, čím je táto metóda objektívnejšia v porovnaní s metódou váženej vzdialenosti (IDW). V GRASS GIS je implementovaná ako modul *v.surf.nnbathy*, *r.surf.nnbathy*.



Obr. 3.10: Určenie interpolovanej hodnoty metódou prirodzeného suseda. Vysvetlenie v texte. Zdroj: Albrecht (2015)

Splajny (angl. splines) sú skupinou polynomických metód vyššieho rádu, ktoré vážia hodnoty v bodoch vstupujúcich do interpolácie tak, aby minimalizovali drsnosť povrchu preloženého týmito bodmi. Splajn je anglické vyjadrenie pre tenké platne materiálu používaného v dizajne lietadiel, automobilov, lodí. Taktiež je to názov pomôcky pre kreslenie kriviek. Pri splajnových metódach je kľúčovým princípom minimalizácia krivosti povrchu (energie povrchu) (Neteler a Mitášová, 2004). Predstaviť si to možno ako snahu o primknutie tenkej membrány na body s meranými nadmorskými výškami alebo hodnotami iného javu tak, aby bola plocha čo najhladšia (Mitášová a Mitáš, 1993). Správanie plochy membrány možno kontrolovať pomocou jej pnutia (tension). Ďalším parametrom je zhladzovanie (smoothing). Splajny patria medzi *radiálne bázové funkcie* (angl. radial basis functions, RBF) vzťahujúce sa na funkcie, ktorých hodnoty závisia od vzdialenosti, čo je podobné ako pri IDW, avšak popri vzdialenosti je ďalšou zložkou vážená podmienka minimálnej krivosti. Cieľom je minimalizovať odchýlky medzi vstupnými dátami z na miestach s_i a hladkou splajnovou funkciou $g(s_i)$ podľa vzťahu (Lloyd, 2007):

$$\sum_{i=1}^n (z(s_i) - g(s_i))^2 + \rho J_m(g) ,$$

kde $J_m(g)$ je ukazovateľ drsnosti (hladkosti) splajnovej funkcie g , definovaný ako m -tý stupeň derivácie funkcie g . Parameter ρ kontroluje hladkosť (resp. exaktnosť) funkcie. Ak $\rho = 0$, funkcia sa správa v zmysle exaktnej interpolácie a ak $\rho > 0$, interpolačná funkcia g môže nadhodnocovať alebo podhodnocovať vstupné hodnoty výšok merané na miestach s_i . Ak hodnota ρ sa približuje nekonečnu, funkcia g sa blíži k polynómu určeného metódou najmenších štvorcov (Lloyd, 2007). Funkcia $g(s)$ určujúca hodnoty javu na mieste s_0 je sumou dvoch komponentov a platí:

$$g(s_0) = \sum_{k=1}^K a_k \cdot f_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R(d_i) ,$$

kde prvý komponent je vyjadrením trendu vo vstupných dátach (trendová funkcia) (Mitášová a Mitáš, 1993), v ktorej $f_k(s)$ je množina K monomiálov nízkeho rádu a a_k sú koeficienty monomiálov. Druhý komponent zahŕňa radiálnu bázovú funkciu $R(d_i)$, ktorá je skalárnou funkciou vzdialenosti d_i medzi interpolovanými bodom (lokalitou) s a vstupným bodom s_i so známou hodnotou javu (napr. výšky). Počet vstupných bodov i je definovaný užívateľom pri nastavení interpolácie. Funkcia $R(d_i)$ môže nadobúdať rôzne tvary, v závislosti od čoho existuje viacero verzií interpolácie metódou splajnov tenkej platne. Viac podrobností o splajnových interpolačných metódach uvádzajú práce Hutchinson (1989), Mitášová a Mitáš (1993), alebo Lloyd (2006). Klasický zápis $R(d_i)$ uvedený v práci Lloyd (2006) pre splajny tenkej platne je:

$$R(d_i) = d_i^2 \cdot \log d_i ,$$

pričom $d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$. Úplne regularizovaný splajn s tenziou a zhladzovaním definovaný v práci Mitášová and Mitáš (1993) používa funkciu $R(d_i)$ v nasledovnom tvare:

$$R(d_i) = - \left\{ \ln \left[\left(\frac{\varphi \cdot d_i}{2} \right)^2 \right] + E_1 \left[\left(\frac{\varphi \cdot d_i}{2} \right)^2 \right] + C_E \right\} ,$$

kde φ je parameter tenzie a C_E je Eulerova konštanta, E_1 vyjadruje exponenciálnu integrálovú funkciu (Weisstein, 2009a).

Regularizovaný splajn s tenziou (RST) je príkladom metódy, ktorá patrí medzi tzv. globálne splajny. Hodnota v interpolovanom bode sa počíta na základe matematickej funkcie, ktorá simuluje správanie sa tenkej, elastickej platne, ktorá prechádza cez zadané body. Jej výhodou je, že umožňuje súčasný výpočet morfometrických parametrov na základe parciálnych derivácií interpolačnej funkcie. Parametre tenzie

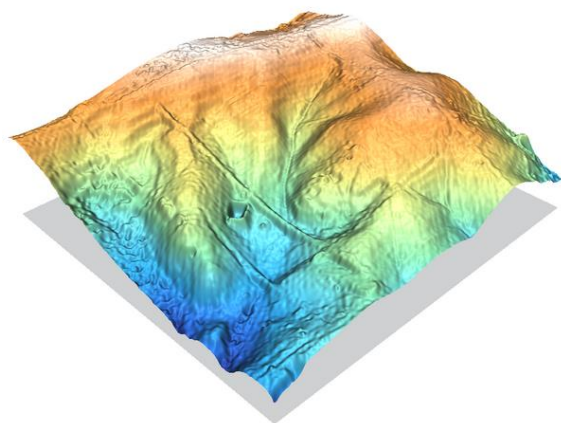
a zhladzovania umožňujú ovplyvňovať vlastnosti interpolačnej funkcie podľa charakteru modelovaného javu. Ide o veľmi presnú metódu, ktorá však vyžaduje hlbšie znalosti o vplyve jej parametrov na výsledok. Jej použitie je však jednoduchšie ako v prípade krigingových metód. Metóda existuje v 2D, 3D a 4D verzii, pričom vo vyšších dimenziách umožňuje podobne ako cokriging interpolovať jav aj s doplnkovou premennou (Hofierka, 1997). Pre tvorbu DMR je ako modul *v.surf.rst* implementovaná v GRASS GIS. Ide o veľmi silný a flexibilný nástroj pre modelovanie povrchov vrátane reliéfu vhodný pre spracovanie veľkých dátových súborov ako napríklad mračná bodov získaných leteckým laserovým skenovaním. Modul umožňuje veľmi jemné nastavenie splajnovej funkcie použitím parametrov tenzie a zhladzovania. Tenzia reguluje tvrdosť, resp. mäkkosť, plochy a zhladzovanie exaktnosť funkcie. Popri týchto dvoch hlavných parametroch možno nastaviť minimálny počet bodov vstupujúci do interpolácie v jednom bode (*npmin*), maximálny počet vstupných bodov v rámci jedného segmentu (*segmax*), minimálna vzdialenosť medzi vstupnými bodmi (*dmin*), atď. Obzvlášť hodnoty premenných *npmin* a *segmax* ovplyvňujú rýchlosť výpočtu. Optimalizácia parametra *dmin* bola použitá napríklad v práci Hofierka et al. (2013) pre interpoláciu lidarových dát. Vhodné hodnoty tenzie a zhladzovania, ako aj ďalších parametrov, možno nastaviť pomocou krížovej validácie, ktorú modul *v.surf.rst* tiež umožňuje. Pre prehĺbenie poznatkov o použití tohto modulu odporúčame práce Mitášová a Hofierka (1993), Mitášová et al. (2005), Neteler a Mitášová (2008), Hofierka et al. (2007). Porovnanie rastrových DMR odvodených viacerými interpolačnými metódami vrátane splajnov v GRASS GIS ukazuje Obr. 3.14.

3.4 Geoštatistické interpolačné metódy

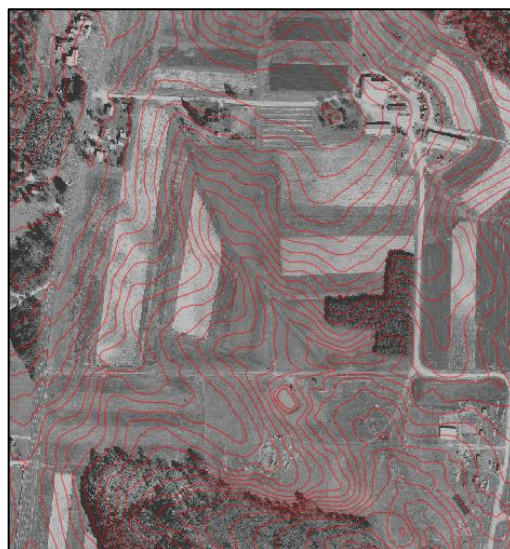
Geoštatistika pôvodne vznikla v 60. rokoch 20. storočia ako nástroj k určovaniu pravdepodobnosti výskytu rudných ložísk pre ťažobný priemysel. Vychádza z teórie priestorových náhodných polí pričom interpolácia hodnoty je založená na priamom stanovení priestorovej autokorelácie, teda priestorovej štruktúry javu. Priestorovú štruktúru javu štatisticky popisuje variogram, ktorý vyjadruje zmeny priestorovej premennej (napr. nadmorskej výšky). Zostavuje sa z meraných hodnôt, preto sa presnejšie nazýva aj ako *empirický variaogram* alebo presnejšie *empirický semivariogram*. Semivariogram je zostavený z polovičných rozdielov *meraných hodnôt* distribuovaných v priestore (semivariancia) (Obr. 3.15a) a vzájomných vzdialeností miest ich výskytu. Vzájomná vzdialenosť sa uvažuje v istom intervale *h* (angl. lag distance), v ktorom sa z určených rozdielov $\gamma(h)$ (Obr.3.15b) vypočíta priemerná semivariancia $\hat{\gamma}(h)$ (Obr. 3.15c). Klasický zápis výpočtu priemernej semivariancie podľa Matheron (1963) pre konštrukciu semivariogramu je:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2p(h)} \sum_{i=1}^{p(h)} \{z(s_i) - z(s_i + h)\}^2, \quad ,$$

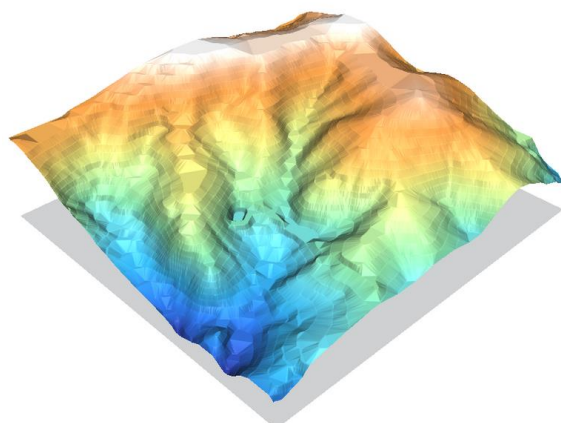
kde $p(h)$ je počet párov hodnôt vzájomne vzdialených o dĺžku *h*, $z(s_i)$ a $z(s_i + h)$ sú merané hodnoty v mieste s_i a s_i+h . K rozvoju geoštatistiky výraznou mierou prispel práve Georges Matheron (1965). Z jeho výskumu vychádzali ďalší autori, ktorý rozvinuli a opísali teóriu náhodných polí a geoštatistiky. Spomedzi mnohých vyberáme Journel (1989), Isaaks a Srivastava (1989), Cressie (1993), Deutsch and Journel (1998), Goovaerts (2000), a Schabenberger a Gotway (2005). V analýze geomorfologických foriem reliéfu geoštatistické postupy použili Mulla (1988), či Wood (1996). Rôzne varianty krigingu pre tvorbu rastrových DMR z lidarových dát testoval Lloyd a Atkinson (2002, 2006).



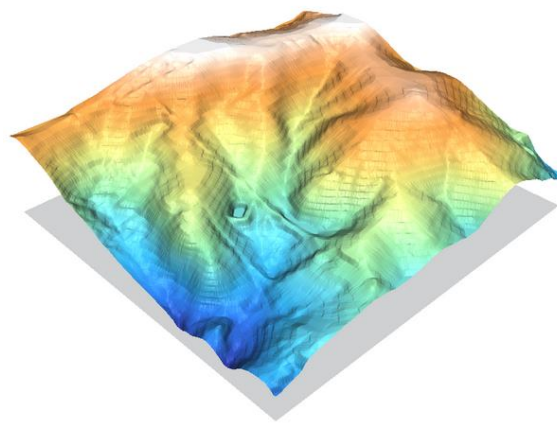
(a) zdrojový DMR z lidarových dát použitý pre odvodenie vrstevníc zobrazených na (b)



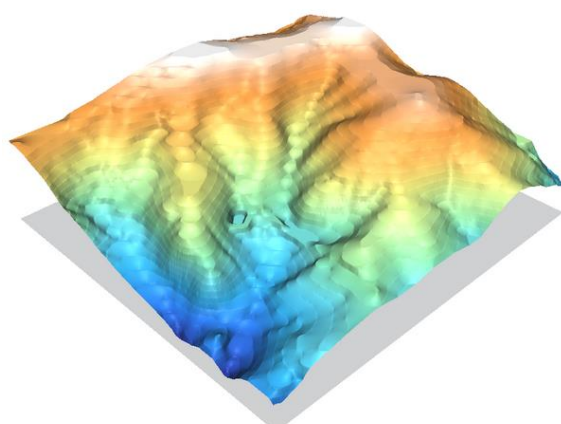
(b) ortofotomapa s vrstevnicami (interval 1 m) použitými pre odvodenie ďalších DMR (c-f)



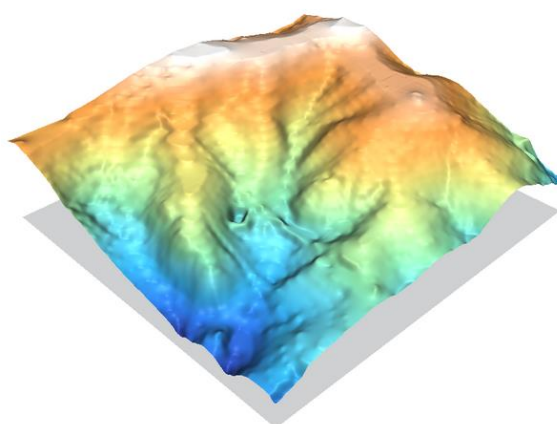
(c) lineárna interpolácia konverziou TIN na rastrový DMR *r.surf.nnbathy*



(d) lineárna interpolácia nástrojom *r.surf.contour*

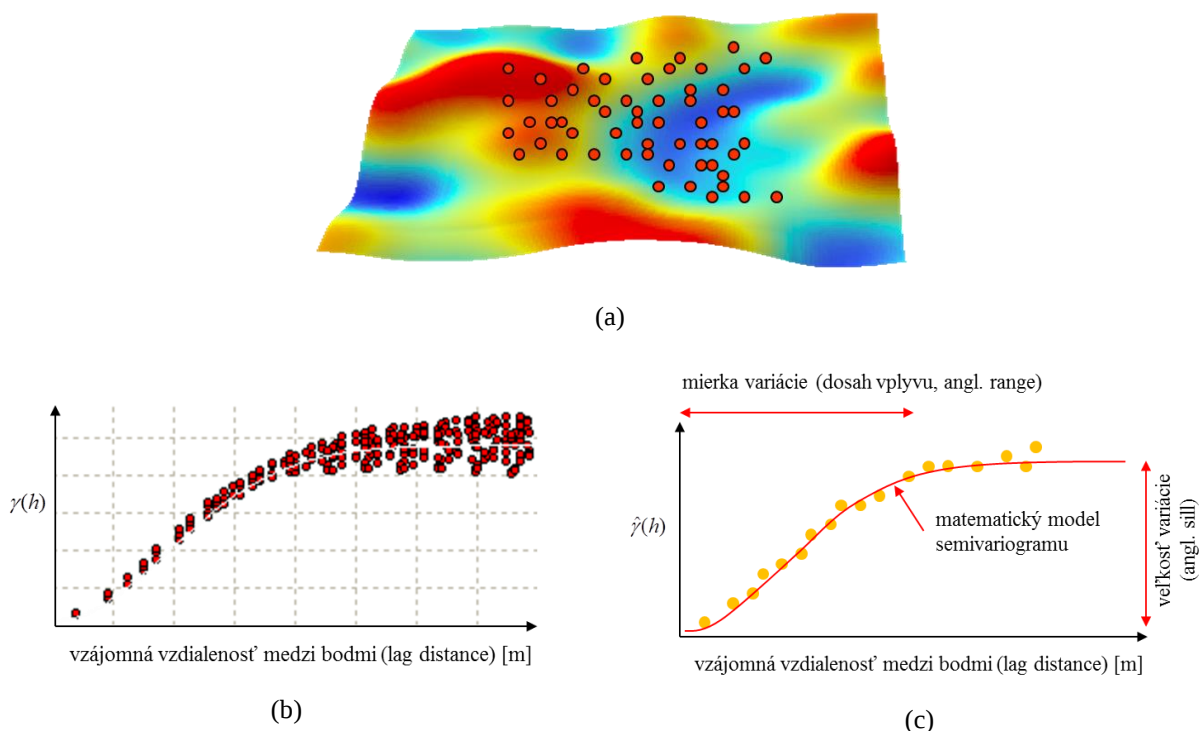


(e) interpolácia metódou prirodzených susedov nástrojom *r.surf.nnbathy*



(f) splajnová interpolácia nástrojom *v.surf.rst*

Obr. 3.14: Porovnanie rastrových DMR odvodených rôznymi interpolačnými metódami v GRASS GIS z vrstevníc. Použité dáta sú dostupné v rámci testovacieho súboru geodát „North Carolina Sample Dataset“ pre GRASS GIS v rámci GNU Free Documentation License 1.2. Obr. (a),(c)-(f) prevzaté z http://grasswiki.osgeo.org/wiki/Contour_lines_to_DEM podľa Hamisha Bowmana.



Obr. 3.15: Geoštatistické vyjadrenie variácie hodnôt reliéfu mapovaného v bodoch označených červenou farbou (a) pomocou semivariogramu (b) a empirického semivariogramu s definovaným matematickým modelom (c). (b) zobrazuje semivarianciu všetkých možných párov z (a).

Empirický semivariogram možno použiť pre tvorbu rastrových DMR pomocou geoštatistickej metódy *kriging*. Jej názov je odvodený od juhoafrického ložiskového geológa Danieho G. Krigeho, ktorý ju v 60. rokoch minulého storočia aplikoval pri hľadaní ložísk nerastných surovín. Kriging pre tvorbu DMR vyžaduje zostavenie empirického semivariogramu z nepravidelne distribuovaného bodového poľa nadmorských výšok. Tomuto semivariogramu je potrebné definovať analytický model, ktorý ho výstižne popisuje a umožňuje vypočítať hodnoty výšky pre ľubovoľné miesto záujmového územia prostredníctvom určenia semivariancie v bode záujmu. *Analytický semivariogram* je teda modelom empirického semivariogramu. Ide o štruktúrnú funkciu, ktorá popisuje očakávaný rozdiel v hodnotách medzi párami hodnôt vzdialených od seba o vzdialenosť h a s určitou vzájomnou orientáciou (anizotropne) alebo bez ohľadu na orientáciu (izotropne). V prípade rastrových DMR sa hodnoty výšky interpolujú do stredu každej bunky rastrovej mriežky. Výber vhodného teoretického modelu semivariogramu je kľúčovým krokom pri použití krigingu a vyžaduje si istú skúsenosť alebo testovanie (Svobodová a Tuček, 2009). Okrem výpočtu hodnoty javu možno na základe analytického semivariogramu vypočítať pravdepodobnosť, s akou táto hodnota platí vzhľadom na použitý model semivariogramu. Deterministické metódy priamo určenie takejto pravdepodobnosti neumožňujú. Z toho dôvodu sa o interpolácii na základe variogramu hovorí ako o najlepšom lineárnom neskrasnom odhade (angl. Best Linear Unbiased Estimation, BLUE). V GRASS GIS použitie krigingu pre tvorbu DMR ponúka nástroj *v.krige*. Efektívnejšie je však prepojenie práce GRASS GIS s balíkom *gstat* a *spgrass6* v rámci softvéru R (viď napr. Grohmann 2004, Neteler a Mitasova, 2008).

3.5 Optimalizácia interpolácie

Výsledkom aplikácie konkrétnej interpolačnej metódy je interpolovaný povrch (model), ktorého presnosť je potrebné štatisticky vyhodnotiť. Presnosť interpolácie môžeme hodnotiť priamo vo vstupných bodoch s meranou hodnotou výšky, avšak táto analýza nič nepovie o kvalite interpolácie mimo vstupných bodov.

Na hodnotenie kvality interpolácie mimo vstupných bodov zvyčajne používame dve metódy. Pokiaľ máme dostatočne husté bodové pole (t.j. dostatok bodov), môžeme náhodným výberom vybrať evalvačnú množinu vstupných bodov, ktorú nepoužijeme v interpolácii, ale bude slúžiť na štatistické hodnotenie presnosti interpolácie práve v týchto bodoch. Inou možnosťou je použitie metódy krížového hodnotenia (cross-validation, jack-knife), keď v procese interpolácie vypustíme zo vstupného súboru vždy len jeden (i -ty) bod $\mathbf{s}_i$ a pre jeho pozíciu vypočítame interpolovanú hodnotu $z_{INT}(\mathbf{s}_i)$ a zistíme jej odchýlku od hodnoty odmeranej v tomto bode $z_{REF}(\mathbf{s}_i)$, ktorá slúži ako referenčná hodnota. Rozdiel $\Delta z_{CV}(\mathbf{s}_i)$ sa nazýva odchýlka alebo aj chyba interpolácie a vypočíta sa ako:

$$\Delta z_{CV}(\mathbf{s}_i) = z_{INT}(\mathbf{s}_i) - z_{REF}(\mathbf{s}_i)$$

Ak pokračujeme iteračným spôsobom, pre každý bod v súbore získame štatistický súbor odchýlok pre všetky vstupné body, ktorých počet je n . Vypočítané odchýlky možno štatisticky vyhodnotiť. Medzi najbežnejšie štatistické ukazovatele hodnotenia kvality interpolácie patria priemerné odchýlky (ME_{CV}), absolútne odchýlky (MAE_{CV}), štandardná odchýlka odchýlok (SDE_{CV}), či ukazovateľ strednej štvorcovej chyby (angl. root-mean-square error, $RMSE_{CV}$). RMSE je najbežnejším štatistickým ukazovateľom chyby pre celý súbor odchýlok. Uvedené ukazovatele určíme podľa vzťahu:

$$ME_{CV} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta z_{CV}(\mathbf{s}_i)$$

$$MAE_{CV} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\Delta z_{CV}(\mathbf{s}_i)|$$

$$SDE_{CV} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n [z_{INT}(\mathbf{s}_i) - ME_{CV}]^2}$$

$$RMSE_{CV} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n [\Delta z_{CV}(\mathbf{s}_i)]^2}$$

Minimalizáciou týchto chýb môžeme nájsť takú parametrizáciu danej interpolačnej funkcie, ktorá dosahuje najnižšiu chybu (Hofierka et al., 2007, Gallay et al. 2012). Existujú aj ďalšie metódy hodnotenia presnosti DMR, napr. podľa zdroja vstupných dát (napr. Vojtek et al. 2013, Höfle a Potůčková 2011).

Georeliéf významne ovplyvňuje mnohé procesy v krajine. Napríklad strmé svahy často podliehajú eróznym a zosuvným procesom, orientácia voči svetovým stranám ovplyvňuje príjem slnečnej energie a tým aj energetickú bilanciu, hydrologický režim pôd a druhové zloženie vegetácie. Kvantifikácia vplyvu georeliéfu prebieha na základe poznania geometrických vlastností georeliéfu, čím sa zaoberá geomorfometria. *Geomorfometria* je vednou disciplínou, ktorej objektom je zemský povrch a predmetom je kvantitatívna analýza jeho plochy za účelom výpočtu morfometrických parametrov reliéfu a identifikácie foriem reliéfu (Pike et al., 2008). S nástupom digitálnej éry sa geomorfometria orientuje na analýzu digitálnych modelov reliéfu. V geomorfometrickej analýze má kľúčové postavenie koncepcia fyzikálneho poľa a diferenciálna geometria. Ak sa georeliéf chápe ako fyzikálne, skalárne pole nadmorských výšok, tak je možné ho popísať spojitou funkciou dvoch premenných v tvare $z = f(x, y)$, kde z je nadmorská výška a x, y sú nezávislé premenné definujúce horizontálnu polohu bodu na georeliéfe. Výsledkom morfometrickej (geometrickej) analýzy georeliéfu sú morfometrické parametre popisujúce geometrické vlastnosti georeliéfu. Medzi najčastejšie používané patria predovšetkým sklon, orientácia voči svetovým stranám a normálové krivosti. Teoretické aspekty geomorfometrickej analýzy, aplikácie a aj popis dostupného softvéru je možné nájsť v práci (Hengl a Reuter, 2008).

Aby sme mohli definovať základné morfometrické parametre používané v GIS-och, označme parciálne derivácie (interpolačnej) funkcie popisujúcej priebeh georeliéfu vo všeobecnom tvare $z = f(x, y)$ nasledovným spôsobom:

$$f_x = \frac{\partial f}{\partial x}, f_y = \frac{\partial f}{\partial y}, f_{xx} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, f_{xy} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, f_{yy} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

Pomocou parciálnych derivácií tejto funkcie potom môžeme vyjadriť nasledovné morfometrické parametre (Mitášová a Hofierka, 1993):

uhol sklonu georeliéfu v smere spádovej krivky

$$\gamma = \arctan\left(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}\right)$$

orientácia georeliéfu voči svetovým stranám

$$\alpha = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right)$$

normálová krivosť v smere spádovej krivky

$$\kappa_s = \frac{f_{xx} f_x^2 + 2 f_{xy} f_x f_y + f_{yy} f_y^2}{(f_x^2 + f_y^2) \sqrt{(f_x^2 + f_y^2 + 1)^3}}$$

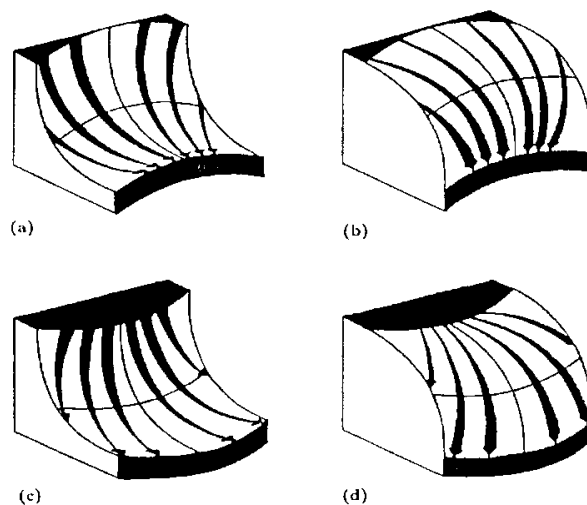
normálová krivosť v smere dotýčnice k vrstevnici

$$\kappa_t = \frac{f_{xx} f_y^2 - 2 f_{xy} f_x f_y + f_{yy} f_x^2}{(f_x^2 + f_y^2) \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + 1}}$$

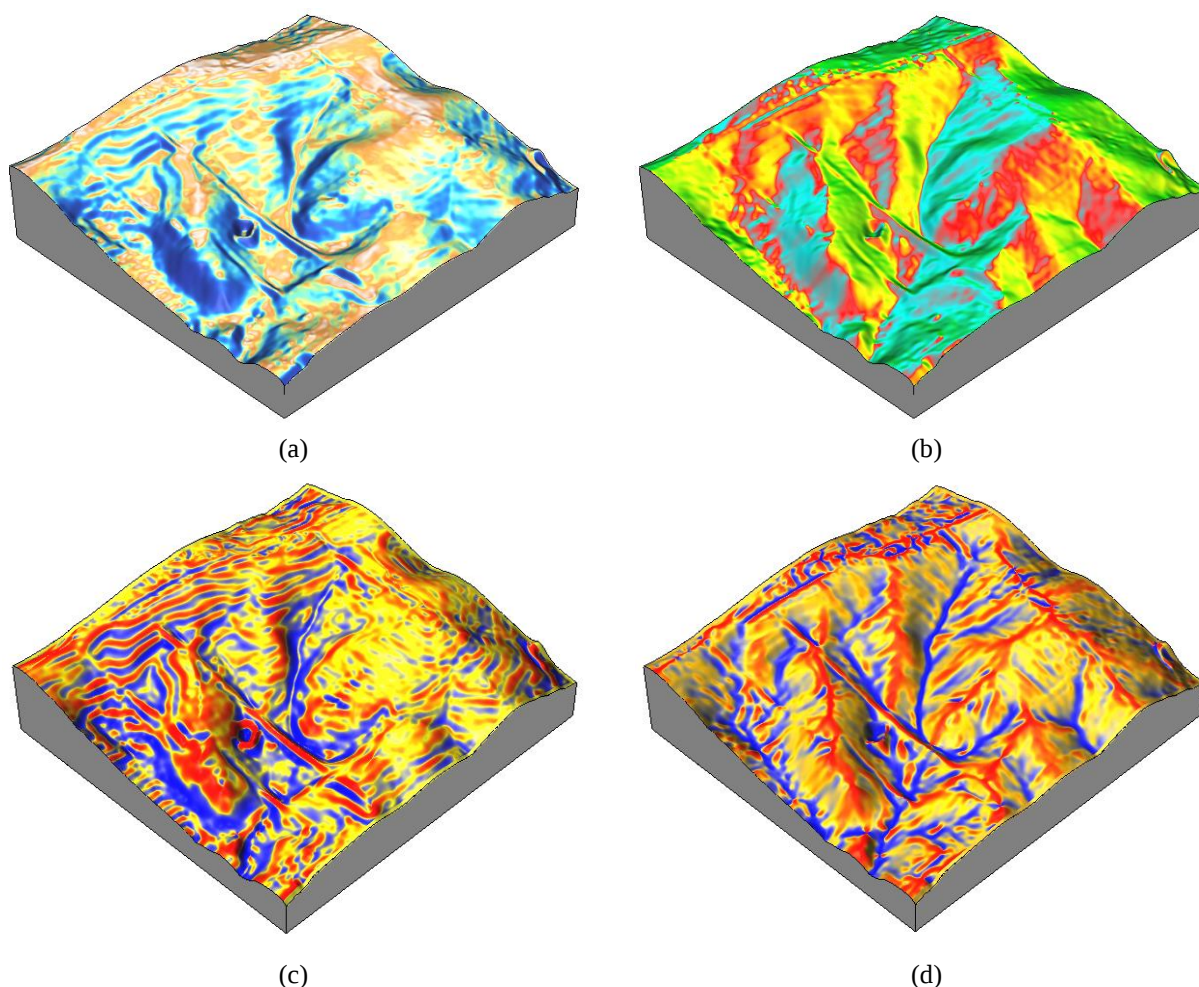
Nadmorskú výšku možno uvažovať ako morfometrický parameter nultého rádu. Sklon a orientácia georeliéfu je definovaná gradientom skalárneho poľa nadmorských výšok. Ide o parametre prvého rádu. Uhol sklonu georeliéfu sa vyjadruje v stupňoch v intervale $0^\circ - 90^\circ$. Orientácia voči svetovým stranám sa vyjadruje tiež v stupňoch, avšak v intervale $0^\circ - 360^\circ$, pričom je dôležité stanovenie základného, nultého smeru a orientácie súradnicovej sústavy (smer prírastku uhlu). Územie s nulovým sklonom nemá

definovanú orientáciu voči svetovým stranám. Krivosť reliéfu je možné vypočítať pomocou druhých derivácií skalárneho poľa výšok a je vyjadrením gradientu sklonu resp. orientácie. Ide teda o gradient gradientu nadmorských výšok v určitom smere. Normálové krivosti vyjadrujú tvar georeliéfu v reze, ktorý vzniká ako priesečník georeliéfu a normálovej (kolmej) roviny. V rôznych smeroch však georeliéf má rôznu krivosť. Z hľadiska fyzikálnych procesov, ktoré prebiehajú na georeliéfe sú dôležité 2 smery: smer spádovej krivky (gradientu) a smer dotýčnice k vrstevnici, čo je smer kolmý na smer spádovej krivky. Krivosti sa vyjadrujú v jednotkách $[m^{-1}]$ a znamenajú obrátená hodnotu polomeru kružnice zakrivenej rovnako ako vrstevnica či spádnica v bezprostrednom (diferenciálne malom) okolí bodu, v ktorom krivosť určujeme. Hodnoty krivosti môžu mať kladné a záporné hodnoty vyjadrujúce vypuklé (konvexné) a v duté (konkávne) tvary georeliéfu v definovaných smeroch. Minár et al. (2013) a Jenčo (1992b) definuje aj morfometrické parametre tretieho rádu, ktoré vyjadrujú gradient krivosti. Síce sa zložito interpretujú, ale majú využitie pre vymedzenie elementárnych foriem georeliéfu. Kombinácia tvarov georeliéfu v oboch smeroch vytvára geometrické formy georeliéfu (Krcho, 1990). Ohraničené sú nulovými izočiarami normálovej krivosti v smere spádovej krivky a normálovej krivosti v smere dotýčnice k vrstevnici (alebo horizontálnej krivosti). Pri uvažovaní lineárnych foriem je potrebné pracovať s intervalovými hodnotami pre konvexné, konkávne a lineárne formy. Na základe konštantných hodnôt jedného alebo viacerých geomorfometrických parametrov možno segmentovať georeliéf na elementárne formy. Tento koncept vychádza z existencie dynamickej rovnováhy georeliéfu a je opísaný v prácach Minár (1992) a Minár a Evans (2008).

Jednotlivé morfometrické parametre vplyvajú na geomorfologicko-hydrologické procesy. Sklon (veľkosť gradientu nadmorských výšok) určuje rýchlosť toku látok, orientácia voči svetovým stranám (smer gradientu) určuje smer pohybu látok, normálová krivosť v smere spádovej krivky určuje zrýchľovanie a spomaľovanie pohybu látok, normálová krivosť v smere dotýčnice k vrstevnici ovplyvňuje zbiehavosť a rozbiehavosť toku látok. Každá z geometrických foriem georeliéfu vyčlenená na základe krivostí (rovnice 4-5) špecificky ovplyvňuje toky látok na georeliéfe (Krcho, 1990). Konkávna forma v smere spádovej krivky a zároveň konkávna v smere dotýčnice k vrstevnici (konkáv-konkávna forma) spomaľuje a zbieha tok látok, konvex-konkávna forma zrýchľuje a zbieha tok látok, konkáv-konvexná forma spomaľuje a rozbieha tok látok a konvex-konvexná forma zrýchľuje a rozbieha tok látok. Schematicky je vplyv jednotlivých foriem georeliéfu znázornený na Obr. 4.1. Kombinácia (vzájomný pomer) oboch normálových krivostí určuje, či v danom bode na georeliéfe sú topografické predpoklady pre čistý odnos alebo akumuláciu materiálu (Mitas a Mitasova, 1998). Trojrozmerná vizualizácia vyššie uvedených morfometrických parametrov formou farebného povrchu georeliéfu je na Obr. 4.2.



Obr. 4.1: Vplyv geometrických foriem georeliéfu na tok látok: (a) konkáv-konkávna forma, (b) konvex-konkávna forma, (c) konkáv-konvexná forma, (d) konvex-konvexná forma. (Prevzaté z práce Mitášová a Hofierka, 1993).



Obr. 4.2: Morfometrické parametre georeliéfu (a) sklon, (b) orientácia voči svetovým stranám, (c) normálová krivosť v smere spádovej krivky, (d) normálová krivosť v smere dotýčnice k vrstevnici. Parametre sú odvodené z lidarového DMR zo vzorových dát `nc_spm_08_grass7` v GRASS GIS nástrojmi `r.param.scale`.

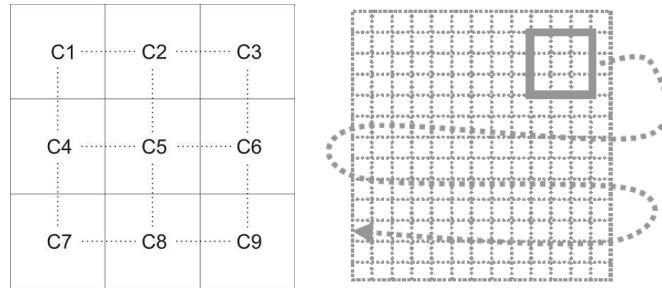
Výpočet parciálnych derivácií

Pri tvorbe DMR sa často používajú aj interpolačné funkcie, ktoré nie sú diferencovateľné. Výpočet morfometrických parametrov vyžaduje parciálne derivácie až druhého stupňa. Pokiaľ príslušná interpolačná funkcia neumožňuje priamy výpočet derivácií, ich výpočet sa rieši pomocou aproximačného výpočtu, do ktorého vstupujú hodnoty nadmorských výšok v bunkách rastra. Pre daný bod, ktorý je stredom bunky (bod C5), sa cez jeho okolie 3 x 3 buniek preloží polynóm druhého stupňa (Obr. 4.3), ktorý aproximuje skutočný priebeh povrchu (Neteler a Mitasova, 2008):

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

Pomocou metódy najmenších štvorcov môžeme odvodiť koeficienty polynómu a tiež parciálne derivácie:

$$f_x = a_1, f_y = a_2, f_{xx} = 2a_4, f_{yy} = 2a_5, f_{xy} = a_3$$



Obr. 4.3: Výpočet parciálnych derivácií na rastru pre bunku rastra C5 na základe hodnôt výšok v jej okolí definovanom oknom 3 bunky x 3 bunky (a). Výpočet sa uvedeným spôsobom aplikuje pre každú bunku v rastru posúvaním okna 3x3 (b).

Pre rastrové DMR môžeme z hodnôt nadmorskej výšky v okolí 3x3 (hodnoty C1 až C9) a z rozlíšenia rastra dx a dy priamo vypočítať derivácie nasledujúcim spôsobom:

$$f_x = [(C7 - C9) + (2C4 - 2C6) + (C1 - C3)] / 8dx$$

$$f_y = [(C7 - C1) + (2C8 - 2C2) + (C9 - C3)] / 8dy$$

$$f_{xx} = [(C3 + C1 - 2C2) + (4C4 + 2C6 - 8C5) + (C9 + C7 - 2C8)] / 6dx^2$$

$$f_{yy} = [(C1 + C7 - 2C4) + (4C2 + 2C8 - 8C5) + (C3 + C9 - 2C6)] / 6dy^2$$

$$f_{xy} = [(C7 - C9) - (C1 - C3)] / 4dxdy$$

Analogicky je možné odvodiť výpočet derivácií aj pre 3D raster. Princíp uvedeného výpočtu morfometrických parametrov využíva aj nástroj *r.slope.aspect* v GRASS GIS.

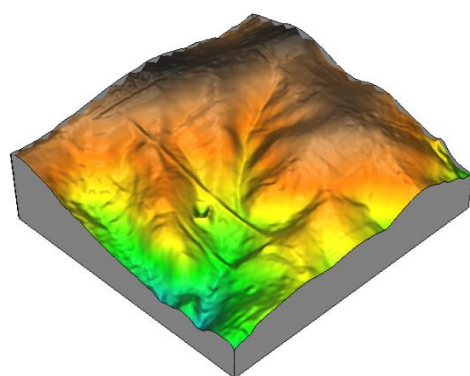
Chorické morfometrické parametre

Okrem topických morfometrických parametrov vyjadrujúcich vlastnosti georeliéfu v diferenciálne malom okolí daného bodu (rovnice 2-5) existujú aj parametre charakterizujúce širšie geometrické vlastnosti georeliéfu. Medzi takéto parametre patria napr. *vertikálna a horizontálna členitosť georeliéfu*, *dĺžky spádových kriviek*, *prispievajúca plocha*. *Prispievajúca plocha* vyjadruje plochu georeliéfu, z ktorého voda steká do daného bodu (Obr. 4.4). Tento parameter má veľké využitie pri modelovaní vodnej erózie alebo vlhkosti pôdy. Pri výpočte tohto parametra sa spočítava plocha jednotlivých buniek, ktoré sa nachádzajú nad danou bunkou, a to na základe smerovania vektora gradientu výškového poľa (Hofierka, 1997).

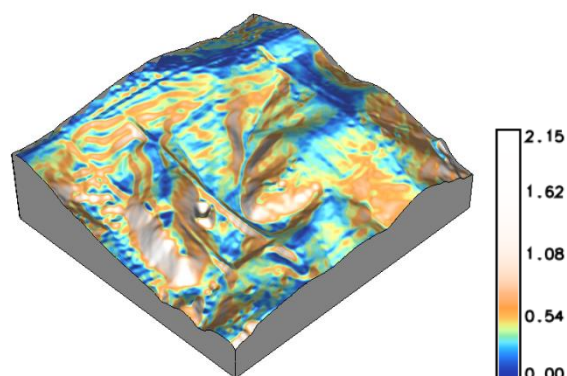
3D a 4D geomorfometria

Geomorfometrická analýza zemského povrchu zjednodušuje jeho chápanie na bivariačnú spojitú funkciu nadmorskej výšky $z=f(x,y)$ (Obr. 4.5a). Tento metodologický koncept je komplexne rozpracovaný v digitálnej geomorfometrii a je postavený najmä na analýze reliéfu reprezentovaného 2D rastrovými poľami, ako to sumarizuje Hengl a Reuter (2008). Táto paradigma sa však v posledných rokoch posúva od 2D geomorfometrickej analýzy k analýze 3D geomorfometrii a 4D geomorfometrii, ktorá zahŕňa aj časový aspekt. Ide o priame rozšírenie 2D geomorfometrie, resp. o špecifický prípad n -dimenzionálnej morfometrickej analýzy (Hofierka a Zlocha 1993, Hofierka 1993). Príkladom javu existujúceho ako atribút trojdimenzionálneho priestoru je teplota vzduchu, tlak vzduchu, koncentrácia ílu v pôde. Hodnoty w takéhoto javu možno vyjadriť ako trivariačnú funkciu, ktorej hodnoty závisia od polohy definovanej tromi karteziánskymi súradnicami (x, y, z) :

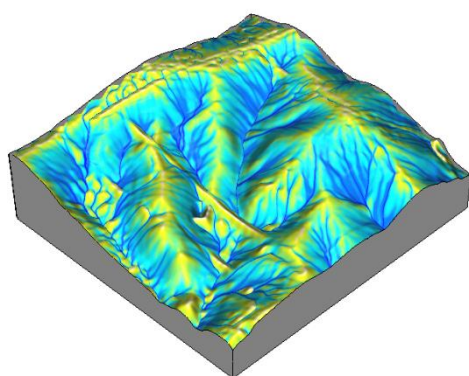
$$w = f(x, y, z).$$



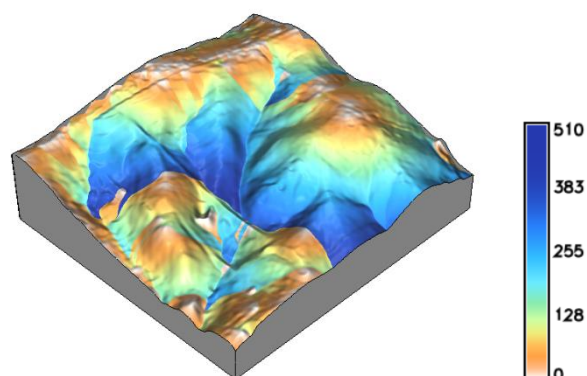
nadmorská výška v metroch



vertikálne prevýšenie v okne 7x7 v metroch



príspevková plocha ako počet buniek



dĺžka spádnic v metroch

Obr. 4.4: Ukážky chórických morfometrických parametrov reliéfu (b-d) odvodených z lidarového DMR zo vzorových dát *nc_spm_08_grass7* v GRASS GIS nástrojmi *r.neighbors* a *r.flow*.

Na základe takto vyjadreného 3D javu možno definovať hlavné geometrické parametre jeho priestorovej distribúcie nasledovne (Hofierka a Zlocha, 1993):

veľkosť gradientu

$$|\nabla f| = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$$

Smer vektora gradientu je definovaný dvoma uhlami:

horizontálnym uhlom A_n

$$A_n = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right)$$

a vertikálnym uhlom B_n

$$B_n = \arctan\left(\frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{f_z}\right).$$

Zmena veľkosti gradientu v smere jednotkového vektora n (v smere toku látky) má nasledovný tvar:

$$\frac{\partial |\nabla f|}{\partial n} = \frac{f_x^2 f_{xx} + 2 f_{xz} f_x f_z + 2 f_{xy} f_x f_y + 2 f_{yz} f_y f_z + f_y^2 f_{yy} + f_z^2 f_{zz}}{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}$$

Ak označíme hlavné krivosti v 3D kartézskom priestore ako k_1, k_2, k_3 tak *Gauss-Kroneckerovu krivosť* K môžeme vyjadriť ako ich súčin

$$K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

a *strednú krivosť* H ako ich aritmetický priemer

$$H = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3}$$

Explicitné vyjadrenie týchto krivostí pomocou parciálnych derivácií pre 3D prípad majú nasledovný tvar

$$K = \frac{f_{xz}^2 f_{yy} + f_{yz}^2 f_{xx} + f_{xy}^2 f_{zz} - f_{xx} f_{yy} f_{zz} - 2 f_{xy} f_{yz} f_{xz}}{\left(\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} \right)^5}$$

$$H = \frac{\begin{vmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{vmatrix}}{3(1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2)},$$

kde

$$h_{11} = \frac{-f_{xx}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}} + 2(1 + f_x^2)$$

$$h_{12} = h_{21} = \frac{-f_{xy}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}} + 2f_x f_y$$

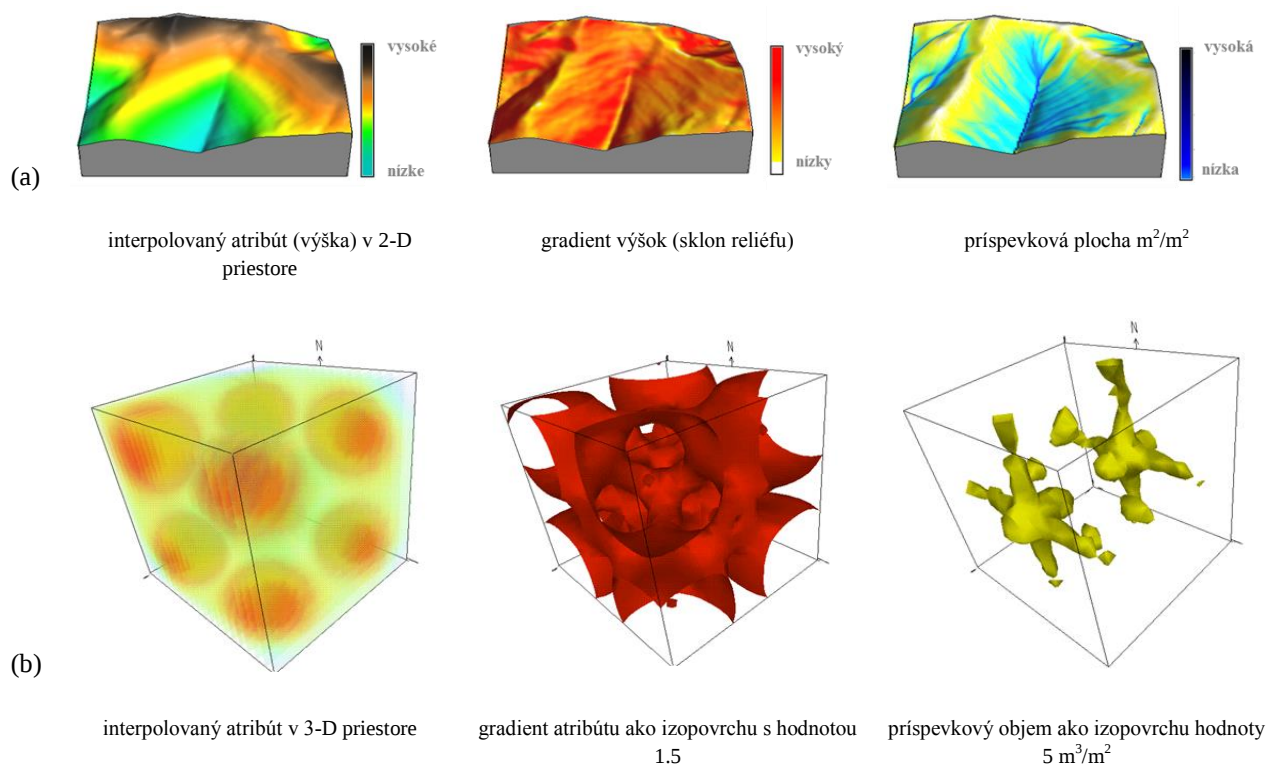
$$h_{22} = \frac{-f_{yy}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}} + 2(1 + f_y^2)$$

$$h_{13} = h_{31} = \frac{-f_{xz}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}} + 2f_x f_z$$

$$h_{23} = h_{32} = \frac{-f_{yz}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}} + 2f_y f_z$$

$$h_{33} = \frac{-f_{zz}}{\sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}} + 2(1 + f_z^2)$$

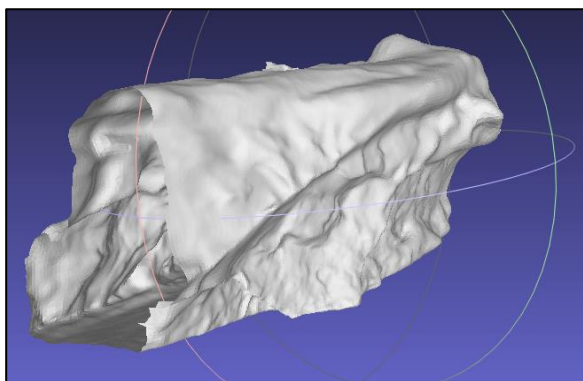
Obr. 4.5b zobrazuje priestorovú distribúciu hodnôt simulovaného javu ako 3D modelu a odvodené parametre, ktoré sú analogické 2D morfometrickým parametrom na Obr. 4.5a. Interpretácia 3D morfometrických parametrov je analogická 2D parametrom. *Smer a veľkosť gradientu* určuje smer a veľkosť zmeny skúmaného javu, prípadne potenciálny smer a rýchlosť prúdenia tečúcich látok v skúmanom priestore. Tieto parametre sa môžu využiť na výpočet a konštrukciu priestorových (3D) prúdnic. Na základe výpočtu potenciálnych prúdnic je možné vypočítať potenciálne dĺžky dráh častíc tekutín a kontaminantov, prispievajúcich a disperzných objemov (objem látky, ktorá priteká do daného objemu, resp. z daného objemu sa rozteká do vypočítaného objemu). *Zmena gradientu* definuje rýchlosť zmeny gradientu. Pri pohybe látky ovplyvňuje zrýchľovanie a spomaľovanie pohybu. *Gauss-Kroneckerova a stredná krivosť* sú vypočítané ako súčin a aritmetický priemer hlavných, t.j. extrémnych krivostí.



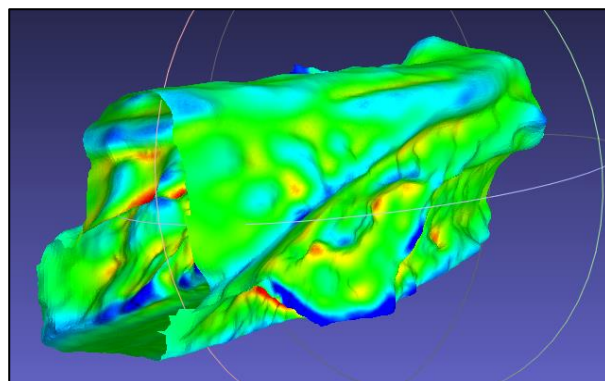
Obr. 4.5: Porovnanie morfometrických parametrov odvodených pre povrch hodnôt uvažovaných biviačnou funkciou $z=f(x,y)$ (a) a pre atribút w interpolovaný trivariačnou funkciou $w=f(x,y,z)$ (b) podľa Hofierka a Zlocha (1993).

Hlavné krivosti popisujú mieru zakrivenia skúmaného priestoru a teda aj potenciálne napätie. Je možné ich využiť na identifikáciu kritických miest priestoru (tvorba zlomov, deformácie horninového prostredia). Tvorbu modelov 3D javov ako trivariačnej funkcie $f(x, y, z)$ možno realizovať v GRASS GIS nástrojom *v.vol.rst*, modelovanie príspevkového objemu cez *r3.flow*. Namiesto 2D rastrového zápisu sa hodnoty zapisujú do 3D rastra, ktorého bunky sa nazývajú *voxely* (z angl. volume element). Nástrojom *nviz* sa dajú vizualizovať ako izoplochy alebo vo forme orientovaných pričných rezov.

Osobitným prípadom 3D geomorfometrie je modelovanie foriem reliéfu, pre ktoré nevyhovuje podmienka biviačnej funkcie $z=f(x, y)$, pretože v jednom bode so súradnicami (x,y) nadobúda reliéf viac ako jednu hodnotu nadmorskej výšky. Príkladom takýchto foriem sú jaskyne, banské chodby, tunely. Aplikácia tradičnej 2D geomorfometrie je v takomto prípade komplikovaná. Formu je potrebné rozdeliť na dve časti, ktoré sú modelované osobitne. Iným riešením je orientovať merania povrchu v súradnicovom systéme, tak aby spĺňali podmienku jednoznačnosti funkcie $z=f(x, y)$. Takýmto spôsobom modelovali posun brehu rieky v dôsledku laterálnej erózie Starek et al. (2013). Taktiež koncept trivariačnej funkcie $w=f(x, y, z)$ pre 3D formy reliéfu nie je použiteľný, pretože reliéf je plochou a nemá charakter javu distribuovaného v 3D priestore. Jednou z možností ako modelovať 3D reliéf je použiť polyhedrické siete (angl. polyhedral mesh), ktoré vzniknú pospájaním vstupných 3D bodov do mnohostennej siete. Najbežnejším tvarom plôšky mnohostenu je trojuholník podobne ako v prípade TIN. Polyhedrické siete sú vektorovou dátovou reprezentáciou 3D plôch a tento koncept je rozvinutý v počítačovej grafike. Spomedzi open-source balíkov odporúčame Blender, Meshlab, VMTK, avšak existuje ich oveľa viac. Pri modelovaní povrchu z bodového poľa reprezentujúceho povrch 3D objektu je kľúčové definovať normály k tomuto povrchu vzhľadom na okolie modelovaného povrchu. Inak povedané, je potrebné jednoznačne určiť, kde je smer von a dnu. Potom sa vytvorí plocha 3D objektu, pričom je možné využiť viacero metód, spomedzi ktorých ako príklad uvádzame dve z programu Meshlab (Cignoni a Ranzuglia, 2014) ball-pivoting, Poisson surface reconstruction. Gallay et al. (2015a) uvádzajú postup tvorby 3D modelu časti jaskyne Domica a analýzu krivosti povrchu v prostredí Meshlab (Obr. 2.23b, d, 4.6).



3-D model povrchu časti jaskynnej chodby



priemerná krivosť povrchu chodby

Obr. 4.6: Digitálny 3D model reliéfu povrchu jaskyne Domica a jeho priemerná krivosť (Gallay et al. 2015a) vypočítaná podľa metódy Guennebaud et al. (2008) v open-source softvéri Meshlab (Cignoni a Ranzuglia, 2014)

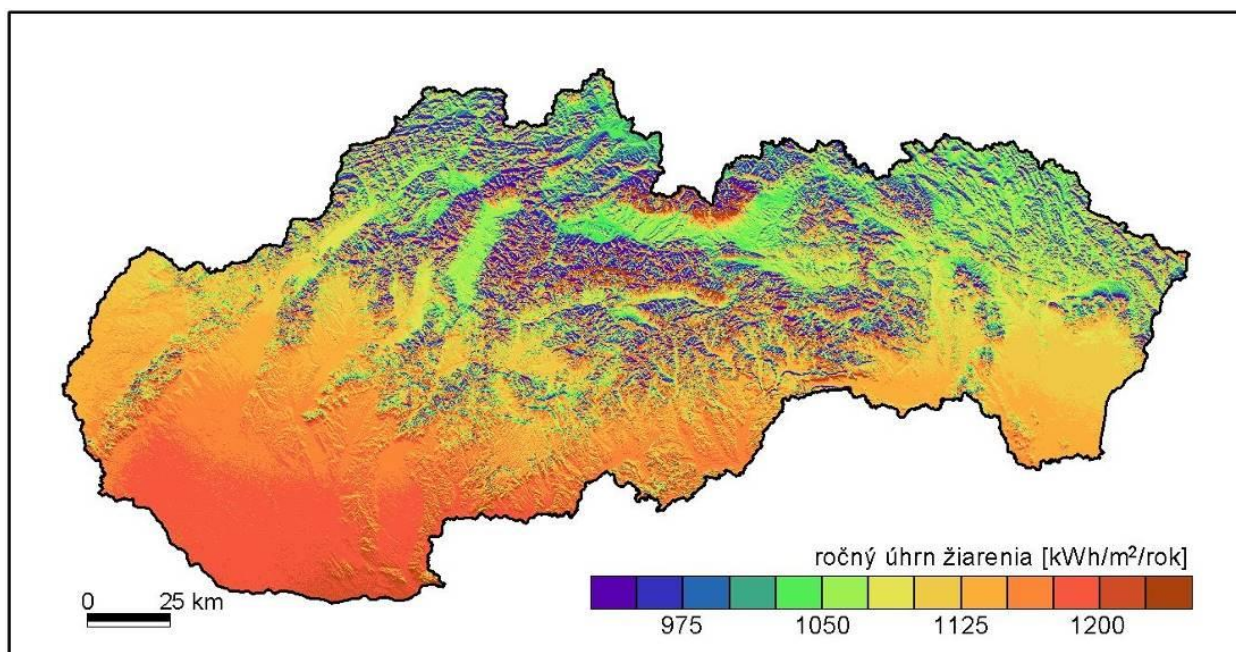
V GIS prostrediach je práca s 3D objektmi obmedzená, ale možná. GRASS GIS umožňuje importovať 3D plochy ako objekty, napr. vo formáte DXF, VRML a vizualizovať ich v 3D pomocou nástroja *nviz*. Na báze open-source platformy GRASS GIS bol vyvinutý aj modul *v.sun* použiteľný pre modelovanie príkonu slnečnej energie na 3D plochy ako napr. budovy (Hofierka a Zlocha 2012, Kaňuk et al. 2015). Tvorba 3D modelov reliéfu nadobúda čoraz väčší význam najmä v súvislosti s rozmáhajúcim sa používaním pozemného laserového skenovania a fotogrametrie. Tieto metódy produkujú obrovské dátové súbory ako sú napr. mračná bodov. Problematiku 3D modelovania jaskyne Domica z údajov získaných pozemným laserovým skenovaním prezentujú napr. Gallay et al. (2015b).

4.2 Aplikované geomorfometrické analýzy

Na dokumentovanie aplikácie geomorfometrickej analýzy s využitím DMR v GRASS GIS sú v nasledujúcej časti uvedené tri príklady. Modelovanie slnečného žiarenia, modelovanie vodnej erózie pôdy pomocou modelu USLE a SIMWE a modelovanie viditeľnosti územia.

Slnečné žiarenie je jedným z najdôležitejších prírodných javov. Je zdrojom energie, ovplyvňuje obrovské množstvo iných procesov na Zemi. Preto je potrebné poznať priestorovú a časovú variabilitu dynamiky slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch. Ovpľvňuje ju mnoho faktorov. Astronomické faktory a geografická šírka, ktorá určuje základnú priestorovú a časovú distribúciu. Na lokálnej úrovni je toto rozdelenie ďalej modifikované stavom atmosféry, georeliéfom a vlastnosťami zemského povrchu (Jenčo, 1992a). Model *r.sun* bol v základnej verzii vyvinutý v roku 1997 pre slobodný softvér GRASS GIS a neskôr modifikovaný Šúrim a Hofierkom (2004). Je to model plne integrovaný do prostredia GIS-u. Umožňuje modelovať priestorovú a časovú distribúciu slnečného žiarenia v troch jeho zložkách (priame, difúzne a odrazené žiarenie) na vybranom území reprezentovanom v rastrovom dátovom modeli (Obr. 4.7). Okrem výpočtu žiarenia pre tzv. čistú oblohu (*clear-sky*) umožňuje na základe meraní odhadnúť aj hodnoty skutočného slnečného žiarenia (*real-sky*). Vplyv zatienenia okolitými tvarmi georeliéfu môže mať významný vplyv na množstvo dopadajúceho priameho slnečného žiarenia a preto jedným z rozhodujúcich vstupných parametrov je digitálny model reliéfu. Podrobný popis modelu je uvedený v práci (Šúri a Hofierka, 2004) a (Neteler a Mitasova, 2004). Syntax príkazu, vysvetlenie parametrov a nastavenie modelu je uvedené v manuáli k príkazu *r.sun* a je dostupný aj online na webovej stránke softvéru (grass.osgeo.org).

Vodná erózia pôdy patrí medzi typické javy modelované v prostredí GIS-u. Vyplýva to z množstva faktorov, resp. dátových vrstiev, ktoré vstupujú do modelovania, medzi nimi aj georeliéf, ktorý je reprezentovaný digitálnym modelom reliéfu.



Obr. 4.7: Množstvo globálneho slnečného žiarenia dopadajúceho na georeliéf Slovenska modelované pomocou modelu *r.sun* podľa práce Hofierka (2012).

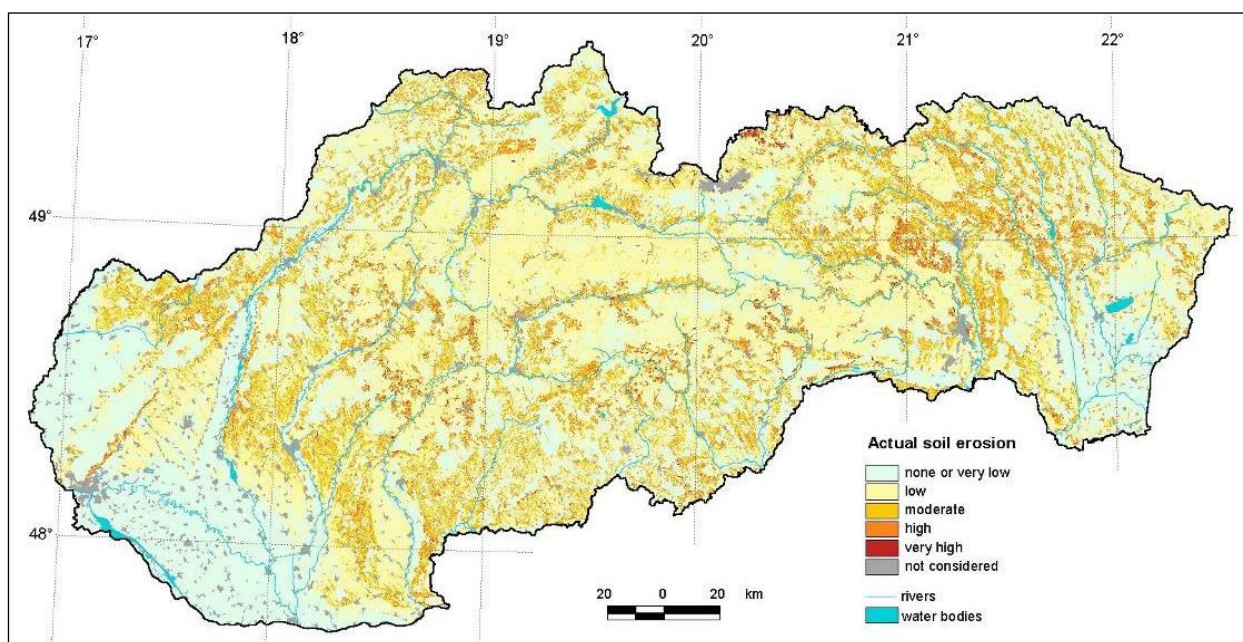
Pomerne často sa v praxi využíva empirický model USLE (Universal Soil Loss Equation), ktorý má nasledujúci tvar (Šúri et al., 2002):

$$E = R.K.L.S.C.P,$$

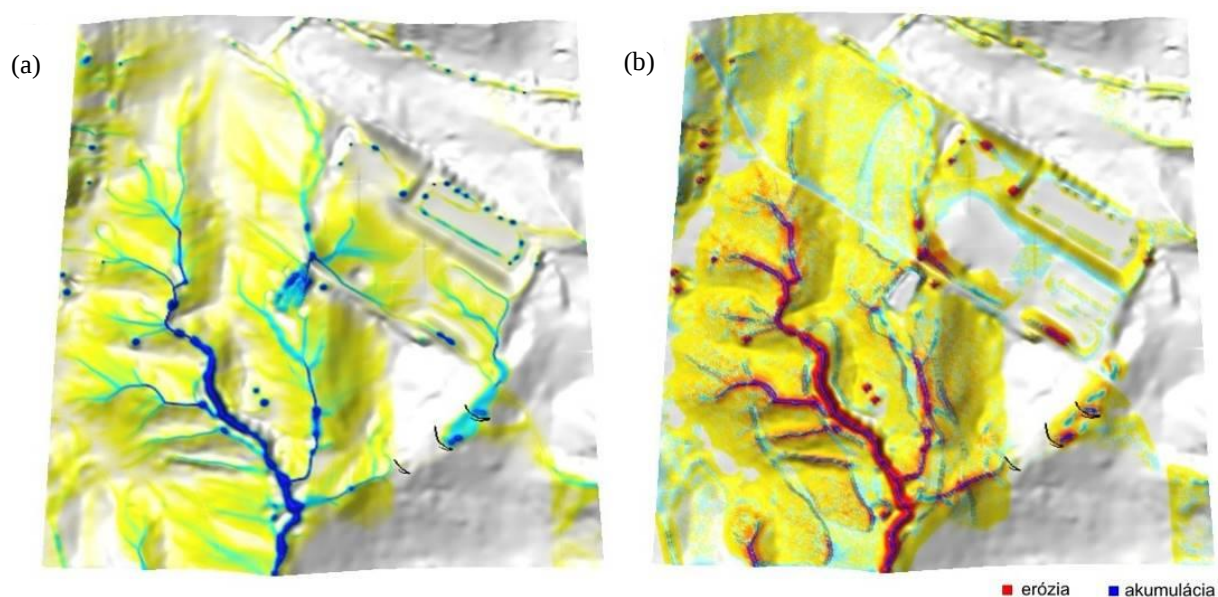
kde E je erózia [t/ha/rok], R - faktor eróznej účinnosti zrážok, K - faktor erodovateľnosti pôdy, L - faktor dĺžky svahu, S - faktor sklonu svahu, C - faktor ochranného vplyvu vegetačného krytu a P - faktor protieróznych opatrení. Model sa používa najmä v lokálnej mierke, keďže vyžaduje podrobné dáta o vlastnostiach georeliéfu zvyčajne odvodené z digitálneho modelu reliéfu. Model bol odvodený pre podmienky poľnohospodárskych pôd v USA, ale bol v neskoršom období adaptovaný aj na podmienky bývalého Československa (Pasák et al., 1983).

Model je pomerne jednoduchý, je to vlastne len súčin faktorov reprezentovaných parametrickými dátovými vrstvami a teda v GIS prostredí ide o jednoduchú operáciu pomocou mapovej algebry. Využíva sa najmä rastrový dátový model s vhodným rozlíšením, pre lokálnu mierku je to zvyčajne v rozmedzí 1-20 metrov. Kľúčová je príprava parametrických dátových vrstiev reprezentujúcich jednotlivé faktory, ktoré je potrebné odvodiť z existujúcich primárnych dát, ako sú dáta o zrážkach, pôdach a krajinnej pokrývke, prípadne podrobnejších dátach o pestovaných poľnohospodárskych plodinách. Digitálny model reliéfu slúži na odvodenie faktorov L a S. Napríklad faktor L je možné odvodiť pomocou príkazu flow length (ArcGIS) alebo *r.flow* (GRASS GIS). Faktor S sa odvodzuje z mapy sklonov. Presné matematické vyjadrenie jednotlivých faktorov je uvedené napríklad v práci (Pasák et al., 1983), prípadne existujú tabuľky, ktoré dávajú do súvislosti všeobecné vlastnosti pôdy a vegetačného krytu s konkrétnymi hodnotami faktorov (viď napr. Šúri et al., 2002). Výpočet vyžaduje operácie reklasifikácie a mapovej algebry. Model USLE má aj svoje obmedzenia, ktoré vyplývajú z jeho empirickej podstaty a spôsobu odvodenia. Model neuvažuje o akumulácii erodovaného materiálu a preto v lokálnej mierke môže predpovedať eróziu na plochách, kde sa materiál zvyčajne ukladá (napr. v spodnej časti svahov). Preto jeho použitie v GIS-e by nemalo byť mechanické, ale v súlade s pôvodnou metodikou a vhodnou interpretáciou dosiahnutých výsledkov (Obr. 4.8).

Alternatívnym riešením modelovania vodnej erózie pôdy môže byť použitie fyzikálne (procesne) orientovaných modelov. V GIS-e GRASS existuje implementácia modelu SIMWE (Mitas a Mitasova, 1998), ktorá sa skladá z dvoch modulov. Modul *r.sim.water* slúži na simuláciu tečenia vody po povrchu georeliéfu (overland flow). Obsahuje aproximačné riešenie Saint-Venantových diferenciálnych rovníc na báze metódy Monte Carlo a s konceptom duality medzi reprezentáciou spojitým poľom a simulovaných pohybom častíc vody. Výsledky tohto modulu potom vstupujú do eróznej časti reprezentovanej modulom *r.sim.sediment*, ktorá modeluje eróziu a ukladanie materiálu (Obr. 4.9). Model je priestorovo distribuovaný a dynamický.

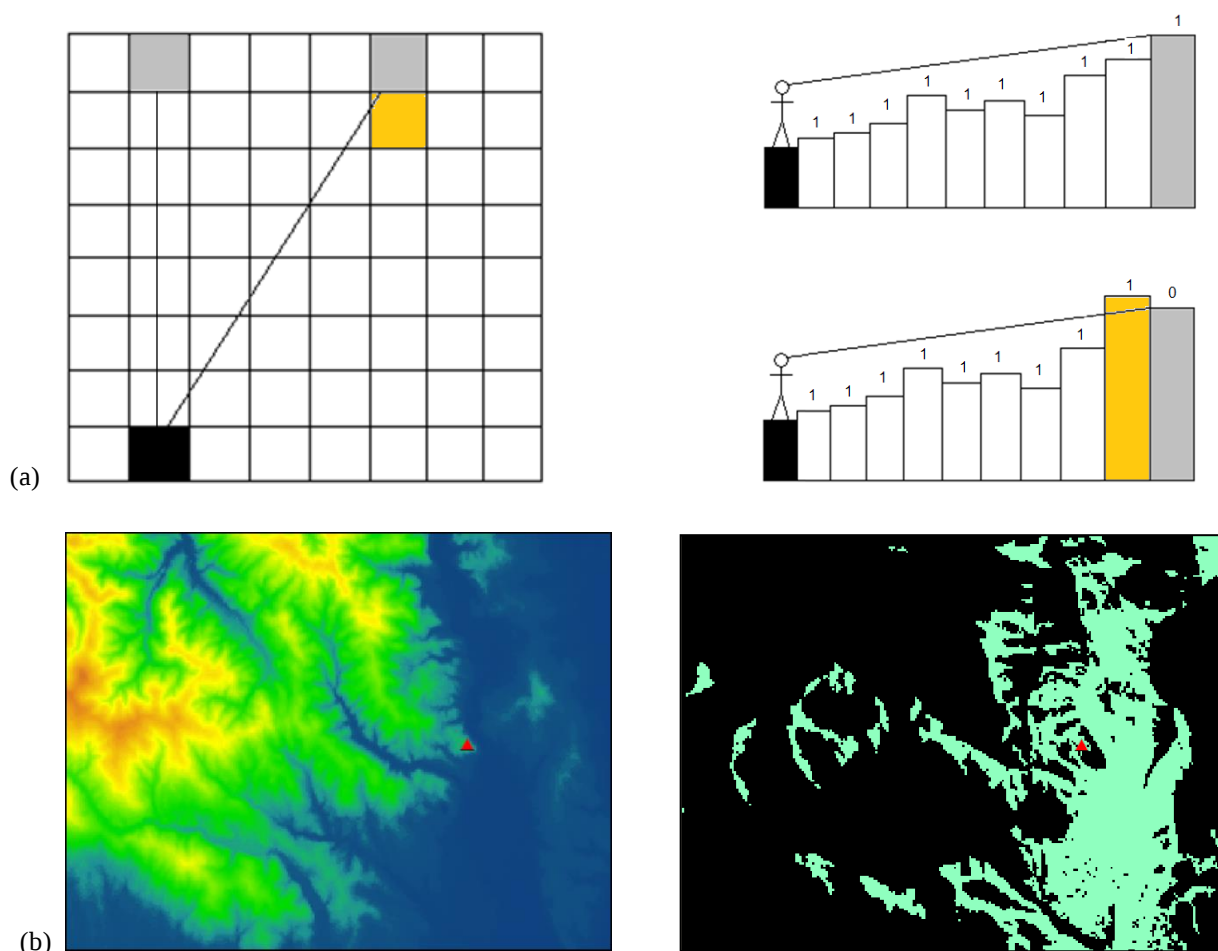


Obr. 4.8: Odhad skutočnej vodnej erózie pôdy na základe modelu USLE (Šúri et al., 2002).



Obr. 4.9: Simulácia vodnej erózie pôdy pomocou modelu *r.sim.sediment* v GRASS GIS. (a) povrchový tok vody, (b) intenzita eróznno-akumulačných procesov podľa Hofierka et al. (2014).

Ďalším príkladom praktickej aplikácie geomorfometrie je analýza viditeľnosti územia z daného bodu pomocou modulu *r.viewshed*. Myšlienkový koncept zisťovania viditeľnosti je jednoduchý ako to ukazuje Obr. 4.10a pre rastrový DMR. V líniiach s určitým krokom zmeny azimutu sa postupne od miesta pozorovateľa zisťuje, či je výška zadaného bodu a výška v okolitých bunkách pozdĺž línie vyššia alebo nižšia. Pokým je výška buniek v smere línie nižšia, do buniek v novom rastri sa zapíše hodnota 1. Ak sa nájde bunka s vyššou nadmorskou výškou, nie je možné vidieť priestor za ňou a tieto bunky sa označia hodnotou 0. Výsledkom je binárny raster s viditeľnými a neviditeľnými plochami zo zadaného miesta. Príkladom výstupu analýzy viditeľnosti je Obr. 4.10b.



Obr. 4.10: Princíp analýzy viditeľnosti na rastrovom DMR a jej aplikácia na DMR (SRTM v3) okolia Košíc (b) so zadaným bodom na vyhliadkovej veži na kopci Hradová.

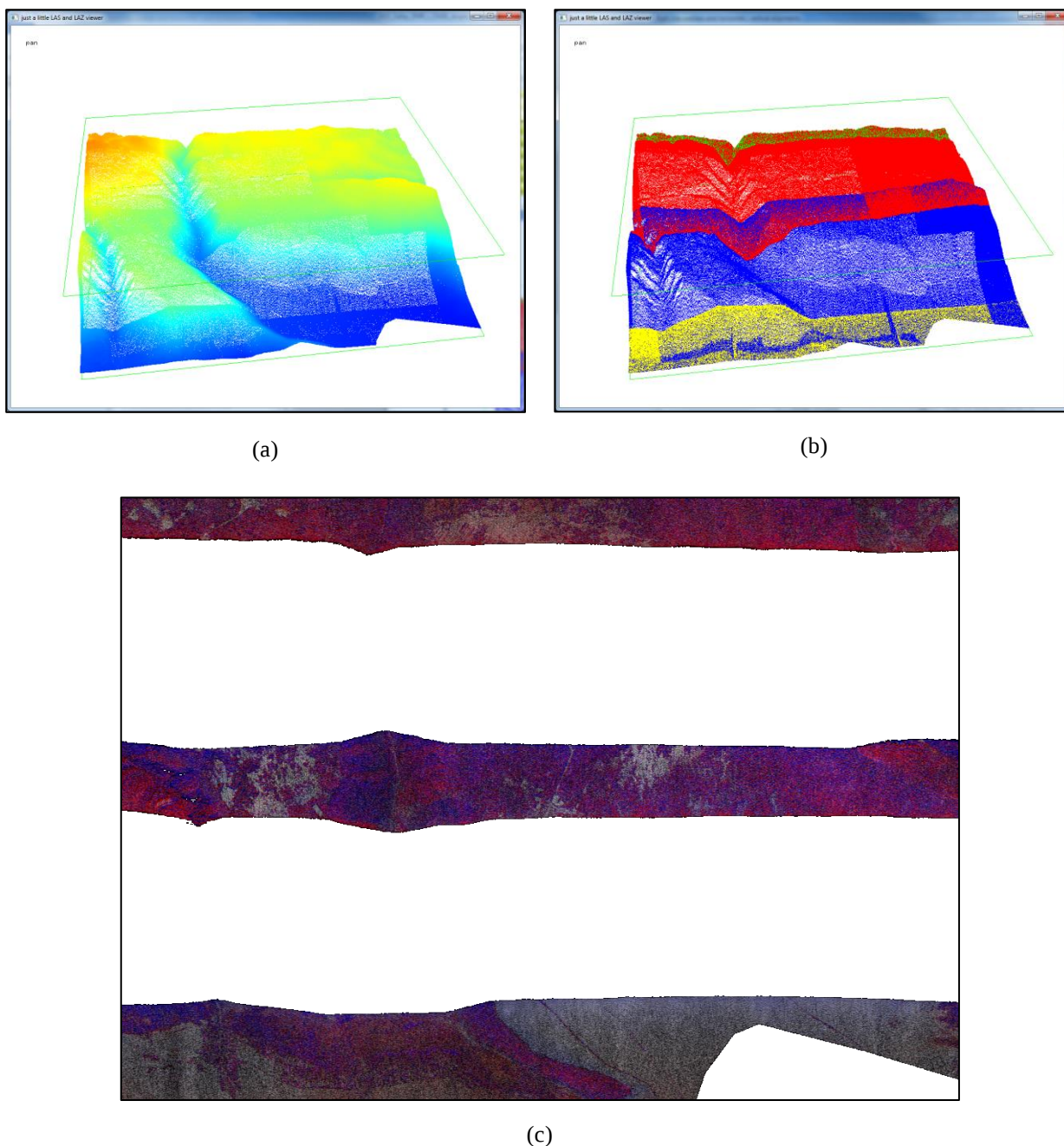
Medzi kľúčové aspekty použitia digitálnych modelov reliéfu v praxi patrí porovnanie so skutočnosťou, do akej miery model reprezentuje skutočný reliéf, aká je jeho kvalita. Existuje mnoho metodík a hraničných limitov, ktorými sa dá stanoviť kvalita DMR. Môže ísť o interné predpisy konkrétnej inštitúcie (napr. armáda), štátu alebo medzinárodné normy. Mičietová a Iring (2011), Chudý et al. (2013) vysvetľujú hodnotenie presnosti DMR podľa noriem ISO v rámci špecifikácií INSPIRE. Höfle a Potůčková (2011) sumarizujú metodiky používané v niektorých štátoch Európskej únie, USA a na medzinárodnej úrovni. V prípade DMR určených pre použitie ďalšími užívateľmi sa informácie o výsledkoch hodnotenia kvality ukladajú ako metadáta s DMR. Pokiaľ k danému DMR produktu neexistujú, užívateľ by sa ich mal od poskytovateľa vyžiadať, pretože inak nedokáže spoľahlivo stanoviť kvalitu svojho produktu odvodeného na báze použitého DMR. Kvalitu DMR možno hodnotiť *priamo* vzhľadom na referenčné dáta alebo *nepriamo* použitím doplnkových informácií, napr. o vzniku DMR (Mičietová a Iring, 2011).

Spoločným menovateľom väčšiny metodík hodnotenia kvality DMR sú tri aspekty kvality: *presnosť*, *podrobnosť*, a *úplnosť pokrytia územia*. Presnosť DMR vyjadruje mieru zhody hodnôt DMR so skutočnými hodnotami nadmorskej výšky alebo iného morfometrického parametra v danom bode. Podrobnosť dát súvisí s priestorovou hustotou dát a je vyjadrením detailu resp. miery podrobnosti, ktorou DMR reprezentuje skutočný povrch. Napríklad DMR s veľkosťou bunky 5 x 5 m odvodený z hustých lidarových dát je podrobnejší ako DMR s veľkosťou bunky 90 x 90 m odvodený z vrstevníc vektorizovaných z mapy mierky 1:100 000. Úplnosťou DMR sa myslí pokrytie záujmového územia DMR dátami. Pokiaľ v dátach existujú oblasti bez hodnôt výšky, DMR je priestorovo nekompletný a takéto miesta je potrebné detekovať a prípadne pre ne interpolovať hodnoty alebo pre ďalšie použitie zamaskovať. Interpolácia je aplikovateľná, pokiaľ ide o plochy menšieho rozsahu vzhľadom na hustotu vstupných dát (napr. trojnásobný rozmer bunky rastrového DMR). Pre väčšie plochy bez dát je potrebné pre ne získať nové údaje doplnkovým mapovaním napr. pozemným meraním alebo fotogrametricky.

5.1 Hodnotenie presnosti DMR

Kľúčové je hodnotenie presnosti DMR vzhľadom na referenčné dáta. Tieto môžu byť interného alebo externého charakteru. *Interné referenčné dáta* pochádzajú z hodnotenej množiny dát a v prípade DMR ide napríklad o metódu krížovej validácie (kapitola 3.5), ktorou sa získavajú a hodnotia odchýlky interpolovanej plochy DMR vzhľadom na vstupné body. Iným príkladom je porovnanie výšok bodov v oblasti prekryvu susediacich pásov mračna bodov z leteckého laserového skenovania (Obr. 5.1). Presnosť DMR určená na základe interných referenčných dát sa nazýva *relatívna presnosť*. *Externé referenčné dáta* sú nezávislé na množine hodnotených dát a sú získané presnejším meraním ako hodnoty výšok DMR. Presnosť DMR určená na základe externých referenčných dát sa nazýva *absolútna presnosť*. Zber externých referenčných dát je spravidla otázkou kompromisu medzi požadovanou presnosťou merania a požiadavkou na množstvo referenčných bodov. Napríklad pozemným meraním diferenciálnym GNSS alebo tachymetricky možno získať veľmi presné referenčné bodové pole avšak pre menšie územie alebo menší počet bodov na väčšom území. Naopak fotogrametricky možno pokryť územia veľkým množstvom bodov ale menej presne.

Georeliéf, ktorý je vyjadrený prostredníctvom DMR, má rôznorodý charakter a môže byť zakrytý rôznymi typmi krajiny pokrývky. Táto rôznorodosť sa prejavuje aj v presnosti reprezentácie skutočného reliéfu jeho modelom. Napríklad pri laserovom skenovaní sú bodové polia redšie a presnosť merania je zhoršená na reliéfe pod lesnou pokrývkou alebo hustými krovinami. Šírenie, a tak aj príjem GNSS signálu prijímačom sú zhoršené v lese a hlbokých údoliach.



Obr. 5.1: Určenie odchýlok nadmorskej výšky v rámci prekrývajúcich sa pásov bodov z leteckého laserového skenovania ako príklad relatívnej presnosti DMR pre oblasť Zádielskej tiesňavy a Hájskej doliny v Slovenskom krase. Mračno bodov zafarbené podľa nadmorskej výšky (a) a podľa príslušnosti k letovým pásom (b) v 3D perspektívnom zobrazení pri pohľade z juhu. Chyby v rozsahu -1 m (modré) až +1 m (červené) v oblasti prekryvu letových pásov (c) v ortogonálnom zobrazení. Zdroj dát: Ústav geografie PF UPJŠ.

Fotogrametricky nemožno spoľahlivo určiť výšku terénu pod lesom. Naopak pre otvorené (rovinaté) plochy bez vegetácie alebo len s trávnatým porastom sú chyby merania nadmorskej výšky najmenšie. Z tohto dôvodu je vhodné presnosť DMR hodnotiť vzhľadom na určité typy krajinej pokrývky a charakteru reliéfu osobitne. Podľa amerických štandardov FEMA (angl. Federal Environmental Management Agency) sú odporúčané nasledovné kategórie krajinej pokrývky pre hodnotenie presnosti DMR: *otvorený povrch bez vegetácie, poľnohospodárske plodiny, kroviny, zalesnené plochy, plochy v mestskej zástavbe*. Odporúčania Americkej spoločnosti pre fotogrametriu a diaľkový prieskum

(ASPRS, 2014) rozlišujú dve hlavné kategórie, a to plochy bez vegetácie a s vegetáciou, avšak odporúčajú vyhodnocovať presnosť aj pre iné typy krajiny podľa požiadaviek používateľa. Pre väčšinu DMR produktov sa minimálne udáva ich presnosť pre otvorené rovinaté plochy bez vegetácie. Pre štatisticky spoľahlivé vyhodnotenie vertikálnej presnosti je dôležité zabezpečiť dostatočný počet referenčných bodov. FEMA a ASPRS (2014) odporúčajú aspoň 100 bodov resp. minimálne 20 bodov pre každý z piatich uvedených typov krajiny pokrývky. Z praktického hľadiska je najnižší limit spolu aspoň 60 bodov. Referenčné body by mali byť rozmiestnené v rámci jednotlivých typov plôch rovnomerne a pokiaľ možno mali by byť identifikovateľné na ortofotosnímke. V prípade lidarového záznamu by mali byť identifikovateľné pri zobrazení intenzity odrazeného laserového žiarenia. Táto podmienka je nutná pre hodnotenie horizontálnej presnosti DMR. V tomto prípade sa používajú maľované (signalizované) značky na asfalte alebo betóne v tvare I, L alebo X, taktiež výrazné prvky v krajine ako strechy budov, obrubníky a pod.

Presnosť DMR sa vyhodnocuje na základe odchýlok $\Delta z(\mathbf{s}_i)$ (chýb DMR) medzi súradnicami x_{DMR} , y_{DMR} , z_{DMR} v bode $\mathbf{s}_{DMRi}$ na ploche DMR a súradnicami x_{REF} , y_{REF} , z_{REF} na jemu zodpovedajúcom referenčnom bode $\mathbf{s}_{REFi}$ vypočítaných podľa:

$$\Delta x(\mathbf{s}_i) = x_{DMR}(\mathbf{s}_i) - x_{REF}(\mathbf{s}_i)$$

$$\Delta y(\mathbf{s}_i) = y_{DMR}(\mathbf{s}_i) - y_{REF}(\mathbf{s}_i)$$

$$\Delta z(\mathbf{s}_i) = z_{DMR}(\mathbf{s}_i) - z_{REF}(\mathbf{s}_i)$$

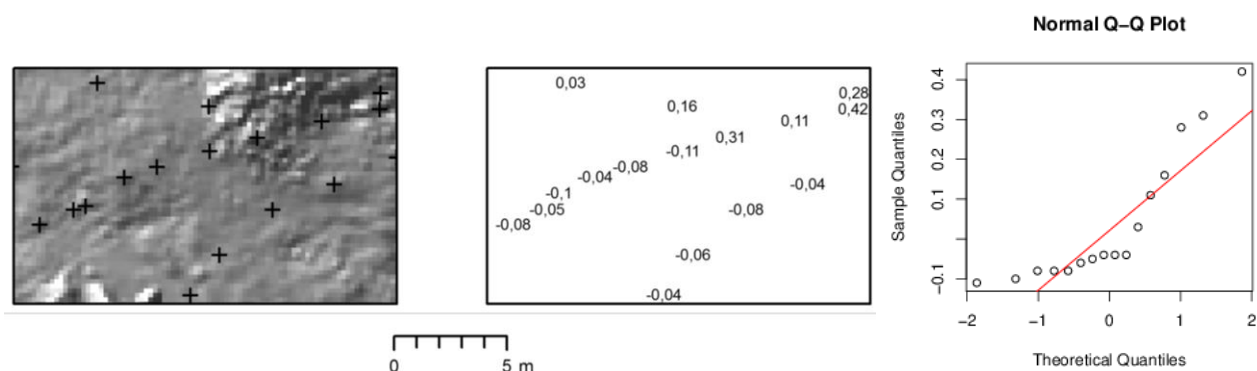
Odchýlky $\Delta x(\mathbf{s}_i)$ a $\Delta y(\mathbf{s}_i)$ vyjadrujú horizontálnu (polohovú) zložku chyby a $\Delta z(\mathbf{s}_i)$ vyjadruje vertikálnu chybu DMR. Celková odchýlka na bode $\mathbf{s}_i$ je daná vzťahom:

$$\Delta xyz(\mathbf{s}_i) = \sqrt{\Delta x(\mathbf{s}_i)^2 + \Delta y(\mathbf{s}_i)^2 + \Delta z(\mathbf{s}_i)^2}$$

Horizontálne odchýlky $\Delta xy(\mathbf{s}_i)$ sa spravidla počítajú z x a y komponentu zlúčené:

$$\Delta xy(\mathbf{s}_i) = \sqrt{\Delta x(\mathbf{s}_i)^2 + \Delta y(\mathbf{s}_i)^2}$$

Tento postup výpočtu odchýlok je bežne používaný v mnohých štúdiách hodnotiacich presnosť DMR (Holmes et al., 2000, Li et al., 2005, Anderson et al., 2005, Wise, 2008, Mičietová a Iring, 2013) a je odporúčaný taktiež ASPRS (2014). Keďže poloha merania výšky na referenčnom bode je zriedkakedy zhodná s polohou uzla rastrovej mriežky DMR so zapísanou hodnotou výšky, existuje viacero spôsobov ako odchýlku prakticky vypočítať. Najjednoduchšie je odčítať hodnotu výšky na referenčnom bode od hodnoty výšky pre bunku, ktorá obsahuje referenčný bod. Avšak v tomto prípade sa vnáša do výpočtu chyba v dôsledku odlišnej veľkosti oblasti, ktorej meranie zodpovedá (measurement support, pozri kapitolu 1.6). Preto je vhodnejším riešením interpolovať hodnotu DMR pre polohu referenčného bodu, aj napriek tomu, že vnášame určitú mieru neurčitosti do interpolovanej hodnoty výšky DMR na tomto bode (ASPRS 2014, Höfle a Potůčková, 2011). Bežne sa pre tento účel používa jednoduchá lineárna interpolácia, pretože zložitejšie metódy vyžadujú viac subjektívnych rozhodnutí používateľa. Okrem použitia referenčných bodov, je možné použiť aj referenčný DMR odvodený z presnejšie meraných vstupných dát. Aj v tomto prípade je potrebné zjednotiť rozlíšenie hodnoteného a referenčného DMR prevzorkovaním, ktoré zahŕňa interpoláciu. Ako referenčný DMR je vhodný model odvodený z lidarových dát, ktorých presnosť je na úrovni centimetrov až decimetrov. Gallay et al. (2010) takto postupovali pri hodnotení presnosti DMR odvodených z vektorizovaných vrstevníc, fotogrametricky a interferometrickým SAR-om, ktorých deklarovaná presnosť bola na úrovni metrov.



Obr. 5.2: Vertikálne odchýlky medzi nadmorskou výškou v bunkách rastrového DMR a výškou na im zodpovedajúcich referenčných bodoch (križiky) v metroch. Štatistické rozdelenie odchýlok vzhľadom na teoretické normálne rozdelenie zobrazuje kvantilový(Q-Q)graf. V prípade normálneho rozdelenia by sa mali hodnoty odchýlok (križky) sústreďovať okolo červenej úsečky. Štatistické vyhodnotenie uvádza Tab.5.1.

Tab. 5.1: Štatistické ukazovatele vertikálnej presnosti DMR na základe hodnôt z Obr. 5.2.

počet	minimum	maximum	ME	MAE	SDE	RMSE	medián (Q50)	NMAD
16	-0,110	0,420	0,039	0,124	0,167	0,665	-0,040	0,074

Obr. 5.2 znázorňuje princíp výpočtu vertikálnych odchýlok DMR vzhľadom na referenčné body merané tachymetricky. Tab. 5.1 sumarizuje štatistické ukazovatele vertikálnych odchýlok na Obr. 5.1. Najpoužívanějšími štatistickými ukazovateľmi presnosti DMR vzhľadom na referenčné dáta sú: priemerná odchýlka (ME), absolútna odchýlka (MAE), štandardná odchýlka chýb DMR (SDE), a stredná štvorcová chyba (angl. root-mean-square error, $RMSE$). Pre vertikálnu zložku presnosti (analogicky pre horizontálnu) ich určíme podľa nasledovných vzťahov:

$$ME = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta z(s_i)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\Delta z(s_i)|$$

$$SDE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n [\Delta z(s_i) - ME]^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n [\Delta z(s_i)]^2}$$

Priemerná odchýlka ME rôzna od nuly poukazuje na systematickú odchýlku DMR od referenčných bodov. Je dôležité minimalizovať systematický posun v hodnotách DMR, pretože môže spôsobiť výrazné chyby vo výpočte objemu zemných prác pri stavebných aplikáciách DMR. Štandardná odchýlka chyby DMR SDE vyjadruje rozptyl hodnôt odchýlok DMR od priemernej chyby. $RMSE$ je výpočtom podobný ukazovateľ ako SDE , avšak vyjadruje strednú štvorcovú chybu ako mieru stredného rozptylu hodnôt výšok DMR od referenčných hodnôt, teda nie vzhľadom na (jednu) priemernú hodnotu. V ideálnom prípade by malo platiť, že $RMSE = SDE = ME = 0$, teda hodnoty DMR a referenčné hodnoty sú totožné

a DMR je vzhľadom na referenčné body bezchybný. Ak $ME=0$, $RMSE$ a SDE sú rôzne od nuly, platí že $RMSE = SDE$. Pri uvádzaní presnosti pre DMR produkty sa uvažuje s normálnym (Gaussovým) rozdelením chýb DMR. Vtedy možno SDE a $RMSE$ použiť pre stanovenie miery pravdepodobnosti, s ktorou sa chyby v určitom intervale vyskytujú v hodnotenom DMR. V európskych krajinách sa používajú $1 * SDE$ a $1 * RMSE$ ako ukazovatele presnosti (1 sigma). Za predpokladu normálneho rozdelenia odchýlok a nulovej priemernej chyby ich hodnoty indikujú 68,3% pravdepodobnosť výskytu chyby DMR v intervale $\pm 1 * RMSE$. Napríklad, ak $RMSE = 1,5\text{m}$, 68,3% odchýlok DMR sa nachádza v intervale $-1,5$ až $+1,5$ m. V USA sa používa 95. percentil ako hraničný interval spoľahlivosti (ASPRS, 2014). Vertikálna presnosť $V_{95\%}$ a horizontálna presnosť $H_{95\%}$ sú definované pri normálnom rozdelení odchýlok ako:

$$V_{95\%} = 1,96.RMSE_z$$

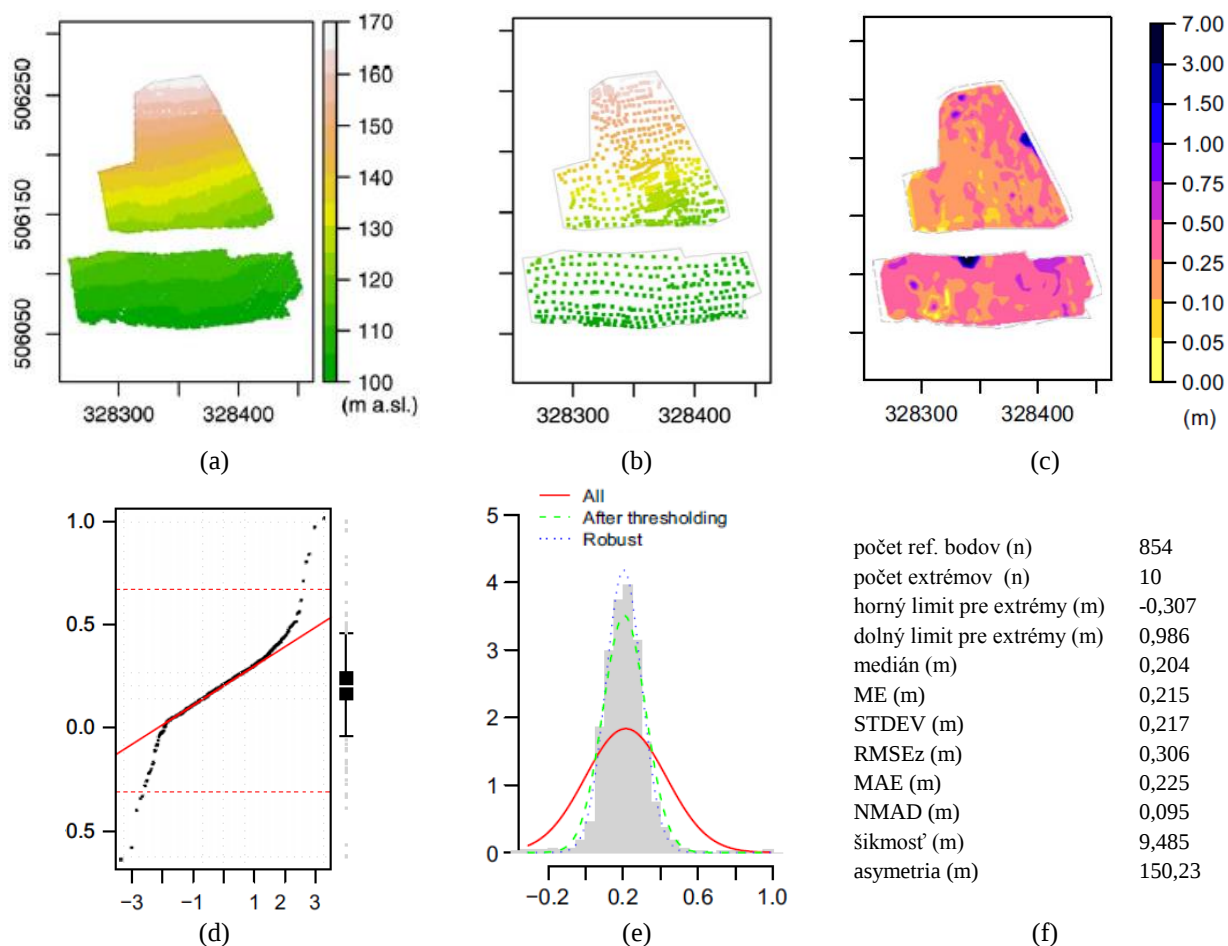
$$H_{95\%} = 1,7308.RMSE_{xy}$$

Pri takto deklarovanej presnosti to znamená, že iba 5% odchýlok môže byť menších ako ukazovateľ presnosti. Pre $RMSE_z = 1,5\text{m}$ by zodpovedala hodnota vertikálnej presnosti pri 95% miere spoľahlivosti 2,94 m. Pre korektné hodnotenie presnosti DMR je potrebné identifikovať spomedzi súboru hodnôt extrémne hodnoty (angl. outliers, blunders) a vyhodnotiť ich osobitne, pretože ovplyvňujú vypočítané štatistické ukazovatele. Jednou z možností je použiť násobok $RMSE$ (napr. $3 * \pm RMSE$) pre stanovenie intervalu, mimo ktorého budú odchýlky považované za extrémne (Höfle a Potůčková, 2011). Pre lepšiu predstavu o štatistickom rozdelení odchýlok v hodnotenom súbore je vhodné zostaviť histogram alebo kvantilový graf (Obr. 5.2, 5.3), na ktorých možno vizuálne zistiť, či sa súbor približuje normálnemu rozdeleniu. Pokiaľ je identifikovaných veľa extrémnych hodnôt alebo hodnotený súbor nespĺňa predpoklad normálneho rozdelenia, je potrebné použiť *robustné štatistické ukazovatele*, ktoré nie sú ovplyvnené extrémnymi hodnotami. Takýmito ukazovateľmi sú mediánová odchýlka (50-ty percentil, Q_{50}), normalizovaná mediánová absolútna odchýlka ($NMAD$) ako ekvivalenty priemernej odchýlky ME a štandardnej odchýlky SDE pri normálnom rozdelení hodnôt. Podrobne výpočet a aplikáciu robustných štatistík pri hodnotení presnosti DMR opisuje Höfle a Potůčková (2011) a príkladom ich aplikácie je práca Gallay et al. (2013).

5.2 Neurčitost' DMR a jej šírenie

Sumárne štatistické ukazovatele, ktoré boli vyššie v texte opísané sú jednoducho vypočítateľné avšak podávajú predstavu o súbore odchýlok celkovo, globálne a limitujú tak pohľad na neurčitost' DMR na niekoľko číselných hodnôt (Wood a Fisher, 1993, Wise, 1998, Kraus et al., 2004, Fisher and Tate, 2006, Wechsler and Kroll, 2006). Práve pre jednoduchosť a zrozumiteľnosť je $RMSE$ častokrát jediným ukazovateľom presnosti DMR dát, ktorú zákazník alebo budúci užívateľ dostane k dispozícii od poskytovateľa dát. Táto skutočnosť bola zároveň motiváciou pre množstvo vedeckých prác (Hunter and Goodchild, 1997, Oksanen and Sarjakoski, 2005, Fisher, 1998, Wechsler and Kroll, 2006, Gallay et al. 2010) zameraných na modelovanie neurčitosti v DMR dátach a vplyv propagácie chyby. Chyby určenia výšky v DMR sa šíria ďalej a ovplyvňujú odvodené parametre spôsobom, ktorý sa zložito predpovedá. Chyby DMR sú zväčša priestorovo pozitívne autokorelované, teda ak je skutočná výška v danom bode nadhodnotená, podobne bude nadhodnotená v blízkom susednom bode. Neurčitost' chyby DMR výrazne ovplyvňuje odvodené parametre z DMR. So vzrastajúcim rádom parametra rastie aj jeho citlivosť na chyby merania nadmorskej výšky v okolí bodu, pre ktorý je počítaný. Napríklad relatívne malá chyba 5 cm na vodorovnej ploche vyvolá zmenu smeru toku vody, pretože v dôsledku chyby je reliéf modelovaný ako naklonený.

Pri modelovaní chýb DMR sa vychádza z *centrálnej limitnej vety* v teórii pravdepodobnosti, ktorá hovorí, že súčet veľkého počtu nezávislých náhodných premenných (viď kapitola 1.8) s konečnou strednou hodnotou a rozptylom má asymptoticky normálne rozdelenie. Pri dostatočne veľkom počte sa pracuje s náhodnými premennými ako s normálne rozdelenou náhodnou premennou, v tomto prípade odchýlkami DMR.



Obr. 5.2: Vyhodnotenie vertikálnej presnosti DMR na báze leteckého laserového skenovania (a) vzhľadom na referenčné body zamerané tachymetricky totálnou stanicou (b). Farebná škála pre (a) vyjadruje nadmorské výšky pre (a) a (b). Pre jednotlivé referenčné body boli určené vertikálne odchýlky DMR, z ktorých bol lineárnou interpoláciou odvodený spojitý povrch odchýlok ako raster (c). Odchýlky na jednotlivých bodoch sú zobrazené graficky formou kvantilového grafu s boxovým grafom (d) a histogramu (e). Rozdelenie odchýlok (d) sa na oboch koncoch výrazne odchyľuje od úsečky indikujúcej normálne rozdelenie. Intervaly extrémov indikuje červená prerušovaná čiara. Histogram (e) poukazuje na výrazne špicaté rozdelenie hodnôt odchýlok odchyľujúce sa od teoretického normálneho rozdelenia definovaného ME a SDE (červená krivka v tvare zvonu). Skutočné rozdelenie odchýlok lepšie aproximuje krivka definovaná robustnými ukazovateľmi medián a NMAD (bodkovaná modrá krivka). Štatistické ukazovatele sumarizuje Tab. (f). Upravené podľa Gallay et al. (2013).

Ich štatistické rozdelenie možno potom parametrizovať na základe štandardnej odchýlky SDE a priemernej chyby ME . ME sa zvykne uvažovať rovná nule. Cieľom modelovania neurčitosti šírenia chyby DMR je stanoviť neurčitosť hodnôt vo výstupe U použitej operácie g (napr. odvodnenie sklonitosti), do ktorej vstupuje neurčitosť vstupných dát A (bodové pole nadmorských výšok), ktorých počet je m :

$$U = g(A_1, \dots, A_m)$$

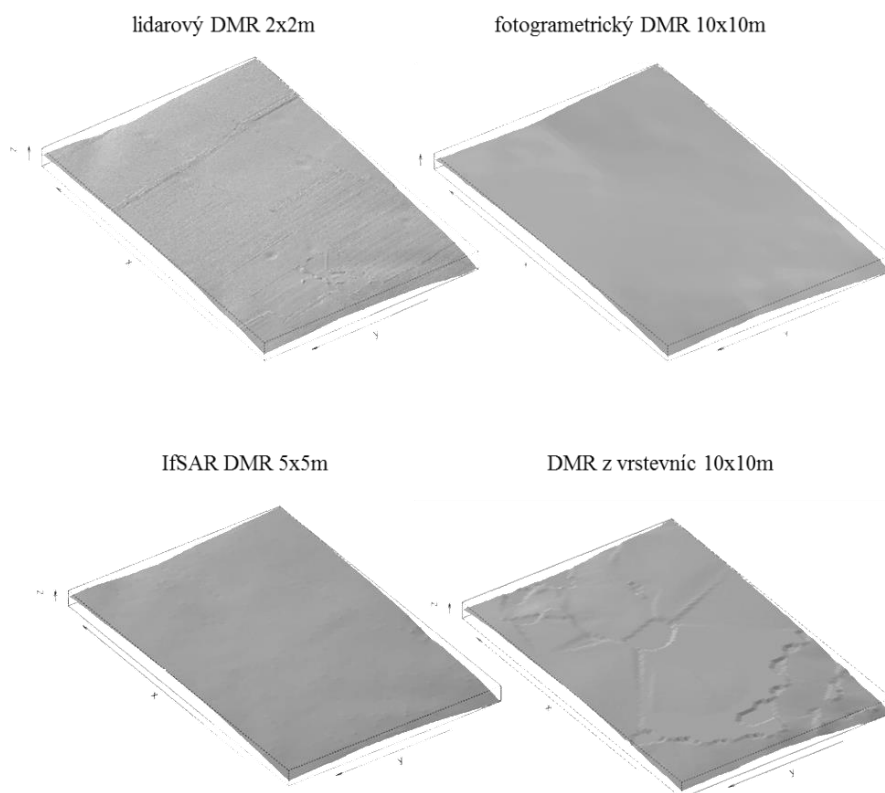
V prípade odvodenia geomorfometrických parametrov bude počet A zväčša jeden, pretože napríklad do výpočtu sklonu z rastroveho DVM vstupujú iba hodnoty nadmorskej výšky v pohybujúcom sa okne 3×3 . Pri modelovaní erózie, ako to uvádza kapitola 4.2, je počet vstupných parametrov 6. Bežne sa pre účely modelovania šírenia chyby v geomorfometrických analýzach využíva Monte-Carlo simulácia. Jej hlavným princípom je vykonanie operácie g a výpočet parametra U použitím hodnôt A_m náhodne vybraných spomedzi spojeného rozdelenia pravdepodobnosti charakterizovaného štandardnou odchýlkou a priemernou hodnotou. Cieľom je vykonať N -krát operáciu g a vypočítať štatistické ukazovatele

získaných výstupov U . Možno si ich predstaviť ako N rastrových vrstiev sklonitosti, pre ktoré sa určí priemerná hodnota štandardnej odchýlky, RMSE atď. pre jednotlivé bunky a celý súbor N rastrových modelov sklonu. Problematiku modelovania a šírenia chyby vysvetľuje Heuvelink (1998) alebo Temme et al. (2008). Ako príklad aplikácie Monte-Carlo simulácie chyby DMR a jej vplyvu na modelovanie bleskových povodní v GRASS GIS možno odporučiť prácu Hofierka a Knutová (2015).

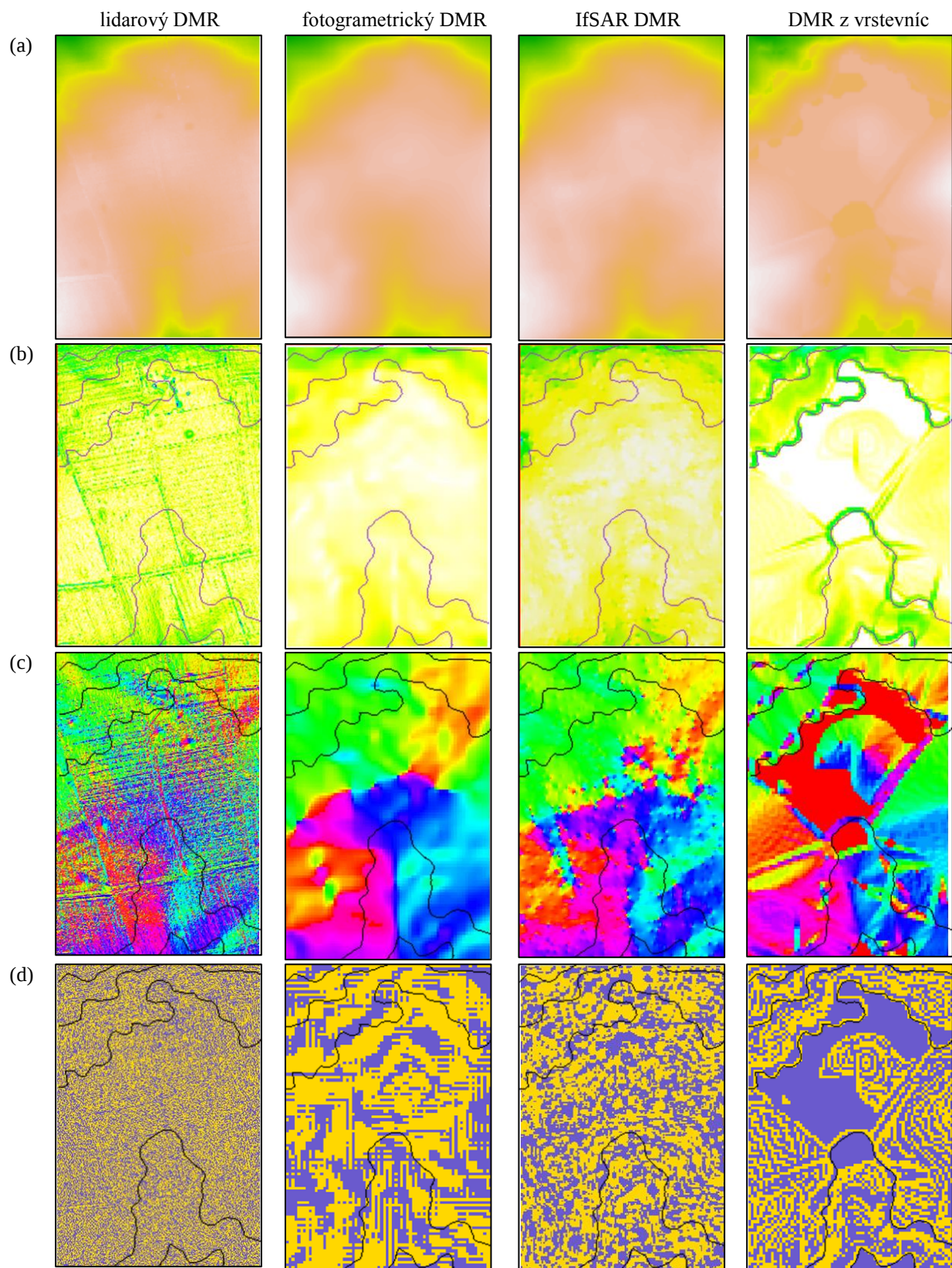
5.3 Vizualié nástroje hodnotenia kvality DMR

Cieľom tvorby DMR je často ododenie morfometrických parametrov vyššieho rádu, ktoré vstupujú do aplikovaných modelov ako napríklad povodňové modely, modely príkonu slnečného žiarenia a pod. Z toho dôvodu je dôležité poznať nielen globálne štatistické ukazovatele a presnosť nadmorských výšok DMR, ale aj priestorovú distribúciu chýb odvodených parametrov. Pokiaľ nie sú dostupné referenčné body, čomu je tak vo väčšine prípadov, postačuje vykonať sled jednoduchých krokov súvisiacich s vizualizáciou dát.

Určite najpohodlnejším, ale efektívnym spôsobom preverovania kvality DMR je vizualizácia dát. Mal by to byť vždy prvý krok hodnotenia kvality modelu po jeho vytvorení alebo zakúpení (optimálne pred ním). Vizualizáciou v 2D aj v 3D perspektíve rýchlo a intuitívne nadobudneme predstavu o vlastnostiach modelu (Podobnikar, 2009). Dôležité je testovať rôzne farebné škály, pretože sa DMR so zmenou farebného kontrastu alebo nasvietenia 3D plochy môže javiť rôzne. Možno tak odhaliť najmä hrubé chyby v ploche DMR ako to demonštruje Obr. 5.3, ktorý zobrazuje DMR vytvorený z dát získaných rôznymi metódami zberu. V prípade DMR odvodeného z vektorizovaných vrstevníc sú viditeľné artefakty, ktoré vznikli v dôsledku nedostatku dát mimo vrstevníc a konverzie TIN na raster, ktorá sa prejavuje evidentnými trojuholníkovými vzormi. Zobrazenie výšok v 2D nemusí vôbec odhaliť nedostatky DMR (porovnaj Obr. 5.4a). Tieto sa väčšmi prejavajú na odvodených parametroch vyššieho rádu, ako je sklon, orientácia a rôzne typy krivosti reliéfu (Obr. 5.4b, c, d). Percepciu plochy DMR v 2D zobrazení zlepšuje ododenie tieňovaného reliéfu (angl. shaded relief, hillshade).

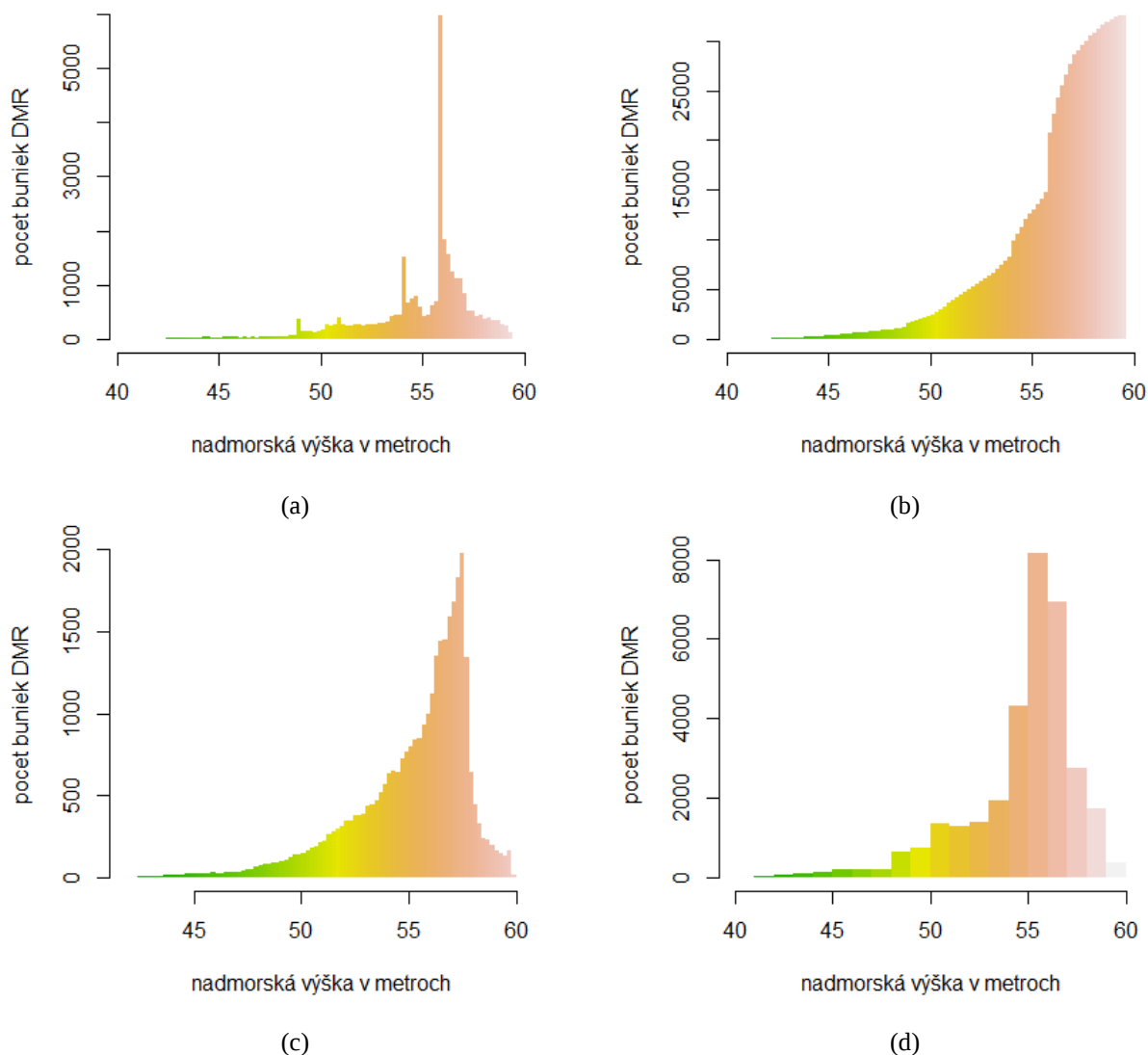


Obr. 5.3: Perspetívny 3-D pohľad na DMR vytvorené použitím štyroch rôznych metód zberu dát o nadmorskej výške. Ide o vzorky oficiálnych DMR produktov pre územie pri meste Barton upon Humber v Anglicku. Zdroj: Gallay (2010)



Obr. 5.4: Vizualizácia morfometrických parametrov rastrových DMR s veľkosťou bunky 5x5m: (a) nadmorská výška, (b) sklon, (c) orientácia, (d) normálová krivosť v smere spádnice (žltá – konvexné plochy, fialová - konkávne plochy). Pre (b), (c), (d) sú doplnené vrstevnice s intervalom 5 m.

Z kvantitatívnych nástrojov veľa napovie histogram nadmorských výšok a odvodených parametrov. Ide o jednorozmerný spôsob vizualizácie dát formou stĺpcového grafu. Výška stĺpca vyjadruje počet hodnôt v súbore spadajúcich do zvoleného intervalu hodnôt. Histogram pomôže odhaliť neprírodzene vysoké zastúpenie nadmorských výšok v dôsledku prítomnosti umelých prvkov DMR (Obr. 5.5a), čo sa prejaví výraznými, zväčša osamotenými vrcholmi („strapatý histogram“). V podobe kumulatívneho histogramu (Obr. 5.5b) sa vysoko početné hodnoty buniek prejavia náhlymi skokmi histogramu. Hladký histogram predstavuje rovnomerné zastúpenie hodnôt výšok v DMR (Obr. 5.5c). Interval, resp. počet tried, je potrebné vhodne zvoliť, pretože potom ostanú nedostatky DMR maskované (Obr. 5.5d). Analýzu histogramu treba spojiť s vizualizáciou dát a experimentovať pri voľbe rozpätia intervalov histogramu.



Obr. 5.5: Vizualizácia hodnôt výšok pre DMR pomôže odhaliť prítomnosť nedostatkov plochy DMR. Výšky DMR z vektorizovaných vrstevníc v podobe histogramu (a) a kumulatívneho histogramu (b) s počtom intervalov 100. Histogram výšok DMR odvodeného fotogrametricky (b) s počtom intervalov 100. Príliš nízky počet intervalov histogramu (d) neodhalí neprírodzene vysoký počet niektorých hodnôt DMR odvodeného z vrstevníc (d).

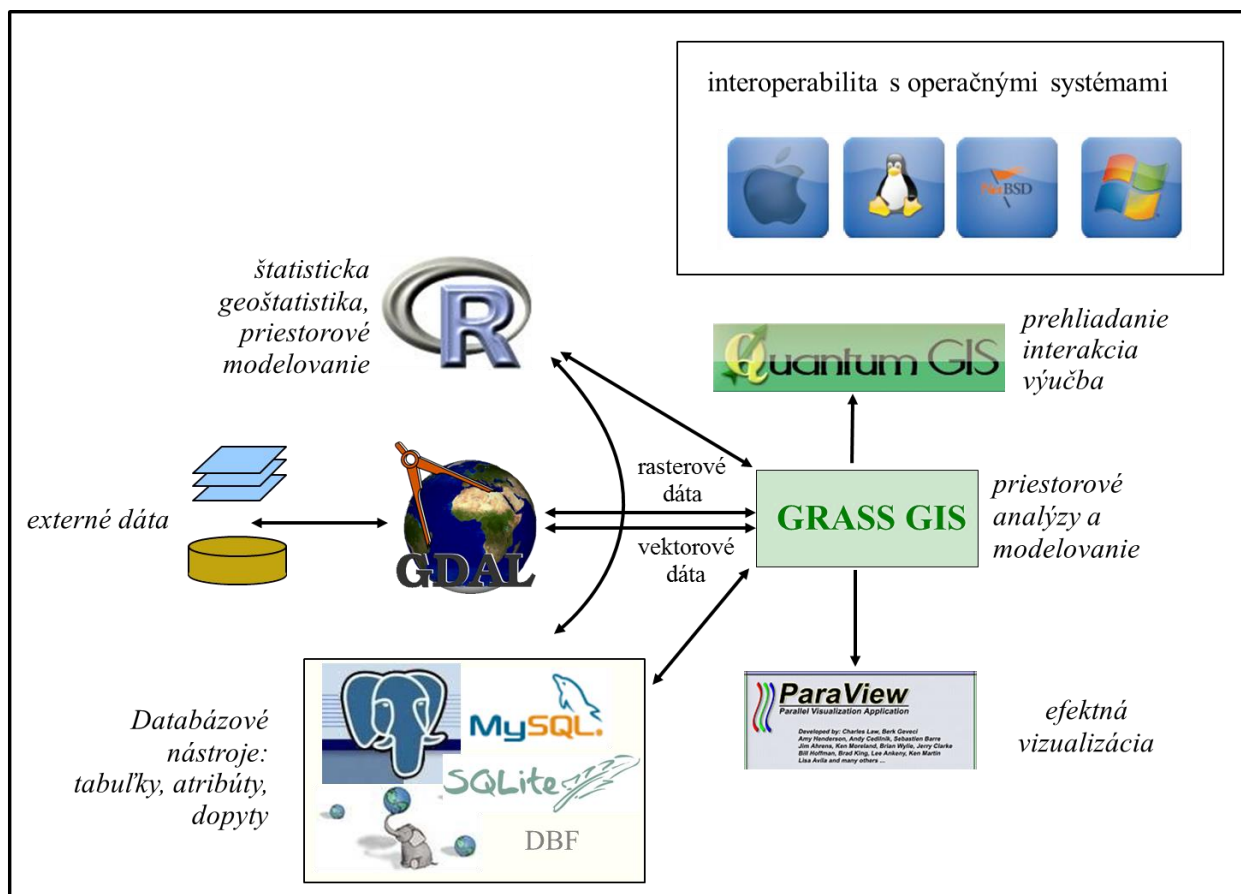
Pre tvorbu DMR a ich geomorfometrickú analýzu, či ďalšie modelovanie existuje mnoho softvérových riešení, ktoré možno použiť. Tab. 6.1 uvádza zoznam vybratých softvérových balíkov na báze otvoreného kódu (open-source), ako aj komerčných produktov. Výber je otázkou preferencií a možností užívateľa a zoznam nemá ambíciu byť vyčerpávajúci. Bližšie sa s jednotlivými balíkmi možno zoznámiť na ich vlastných webových stránkach. Na tvorbu a geomorfometrickú analýzu DMR je zameraná druhá časť diela Hengl a Reuter (2008), pričom Wood (2008) uvádza prehľad relevantných softvérov. Na základe skúseností autora, ako aj prehľadu publikovaných prác možno povedať, že najkomplexnejšiu paletu nástrojov v oblasti open-source ponúka GRASS GIS. Funkcionalitu softvéru rozširuje možnosť úzkeho spojenia s prostredím R, čo je hlavným dôvodom obľúbenosti GRASS-u a R vo vedecko-výskumnej komunite. Na báze GRASS GIS a ďalších open-source programov možno zostaviť veľmi silný nástroj pre modelovanie krajiny a procesov v nej prebiehajúcich, ako to zobrazuje schéma na Obr. 6.1. Podrobnejší opis uvádzame v ďalšom texte pre GRASS GIS, Quantum GIS, R a LAStools.

Tab. 6.1. Prehľad bežne používaných softvérov pre modelovanie reliéfu

Názov programu	Dostupnosť programu	Licencovanie
GRASS GIS	<i>grass.itc.it</i>	<i>voľný kód, GPL</i>
Landserf	<i>www.soi.city.ac.uk</i>	<i>freeware,</i>
Surfer	<i>www.goldensoftware.com</i>	<i>komerčná licencia</i>
ArcGIS	<i>www.esri.com</i>	<i>komerčná licencia</i>
GeoMedia	<i>www.hexagongeospatial.com</i>	<i>komerčná licencia</i>
SAGA GIS	<i>www.saga-gis.org</i>	<i>voľný kód, GPL</i>
ILWIS	<i>www.ilwis.org</i>	<i>voľný kód, GPL</i>
MicroDEM	<i>www.usna.edu</i>	<i>freeware</i>
Quantum GIS	<i>www.qgis.org</i>	<i>voľný kód, GPL</i>
The R Project for Statistical Computing	<i>www.r-project.org</i>	<i>voľný kód, GPL</i>
LAStools	<i>rapidlasso.com/lastools</i>	<i>čiastočne voľný kód, LGPL</i>

6.1 GRASS GIS

GRASS je akronym pre anglický názov Geographic Resources Analysis Support System, ktorý je GIS určeným pre spracovanie a manažment geopriestorových dát, produkciu grafických a kartografických výstupov, priestorové modelovanie a vizualizáciu geopriestorových dát označovaným skratkou GRASS GIS (Neteler et al., 2012). Ide o voľne šíriteľný softvér s otvoreným kódom uvoľneným pod licenciou

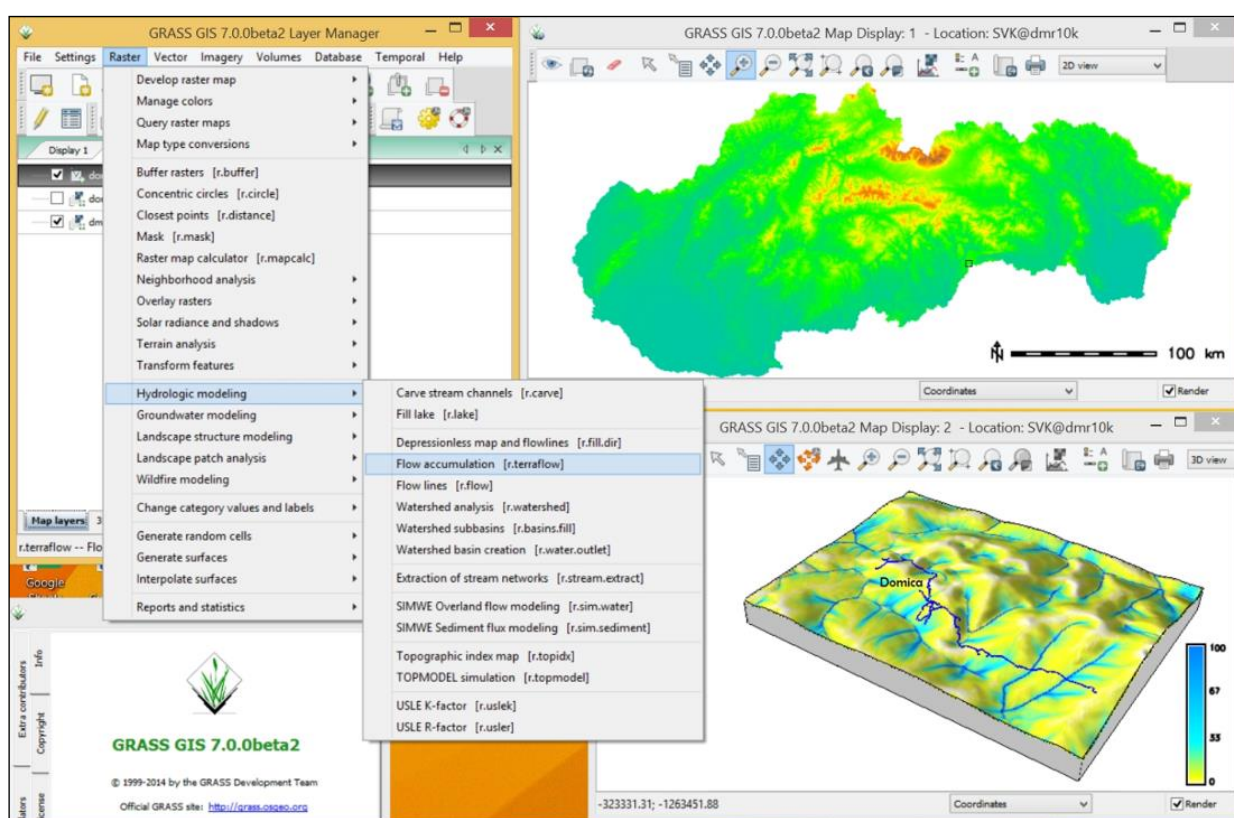


Obr. 6.1: Příklad desktopového GIS na báze open-source softvérov úzko prepojených s GRASS GIS, ktorý má centrálnu pozíciu. Zdroj: Helena Mitášová, <http://courses.ncsu.edu/gis582/common/>

GNU General Public License. GRASS GIS je oficiálnym projektom Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), avšak pôvodne bol vyvíjaný U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories (USA-CERL, 1982-1995). GRASS GIS je v súčasnosti veľmi silný nástroj používaný v širokej akademickej a komerčnej komunite, ako aj vládny inštitúciami po celom svete. GRASS GIS bol a je vyvíjaný na platforme operačného systému UNIX, pre ktorú je jeho funkcionálnosť najkompletnejšia. Dostupný je však aj vo verzii pre Windows a OS. GRASS GIS je založený na princípe modulov, ktoré možno vyvolať a efektívne ovládať z príkazového riadku, avšak mnoho modulov je organizovaných a dostupných cez grafické rozhranie (GUI, Obr. 6.2). Plne integrovaných je vyše 350 modulov a mnohé ďalšie je možno doplniť z repozitára http://grasswiki.osgeo.org/wiki/AddOns/GRASS_7. Dáta sú v GRASS GIS organizované vo vlastnom formáte, ale interoperabilita so širokou paletou externých dátových formátov je zabezpečená implementáciou knižníc GDAL a OGR. Dáta sú v GRASS GIS organizované v jednotnej GRASS databáze (GRASS GIS DATABASE). Pracovať možno iba v rámci určitého geografického priestoru (LOCATION) definovaného predovšetkým súradnicovým systémom, v ktorom dáta existujú a do ktorého musia byť transformované. To zabezpečuje spoľahlivosť priestorových analýz. V rámci LOCATION existuje aspoň jeden súbor dát (MAPSET). Zmyslom MAPSET-u je usporiadanie dát pre určitý typ úlohy (napr. hydrologické analýzy, tvorba DMR) alebo menšie územie v rámci LOCATION. Z hľadiska dátovej štruktúry si jednoducho možno predstaviť organizáciu dát ako priečinky v hierarchickom poradí DATABASE – LOCATION – MAPSET. GRASS GIS používa v rámci LOCATION princíp pracovného regiónu, pre ktorý je potrebné definovať priestorový rozsah a rozlíšenie, avšak jeho nastavenia možno podľa potrieb v priebehu práce meniť, okrem súradnicového systému (príkaz *g.region*).

Dnešná podoba GRASS GIS je výsledkom spolupráce širokej geovednej komunity. Na jeho vývoji sa spolupodieľali aj slovenskí geovedne orientovaní osobnosti najmä v 90. rokoch minulého storočia ale aj neskôr. Mnohé spomedzi modulov GRASS GIS zameraných práve na modelovanie reliéfu spolupostavili Helena Mitášová, Jaroslav Hofierka, Marcel Šúri, Tomáš Cebecauer, Marián Zlocha, Tomáš Paudits. Ich mená je možné nájsť v manuáloch k niekoľkým modulom, napr. k modulu *r.sun*, *v.surf.rst*, *r.flow*, *r.horizon*, *nviz*, *v.vol.rst*, *r3.mask*. Niekoľko nástrojov pre spracovanie vektorových údajov vyvíjali osobnosti z českej geovednej komunity (napr. Radim Blažek a Jáchym Čepický, Martin Landa, Václav Petráš, Anna Petrášová). Podrobne celý systém opisuje Neteler and Mitášová (2008) alebo oficiálna stránka (viď Tab. 6.1). Pre riešenie praktických úloh v GRASS GIS s podrobným opisom v slovenskom jazyku odporúčame prácu Burian et al. (2015). Stále sú aktuálne aj staršie návody Radoslava Bonka dostupných na <http://www.root.cz/autori/rado-bonk/>. Z hľadiska geomorfometrie sa na prácu v GRASS GIS zameriava Hofierka et al. (2008).

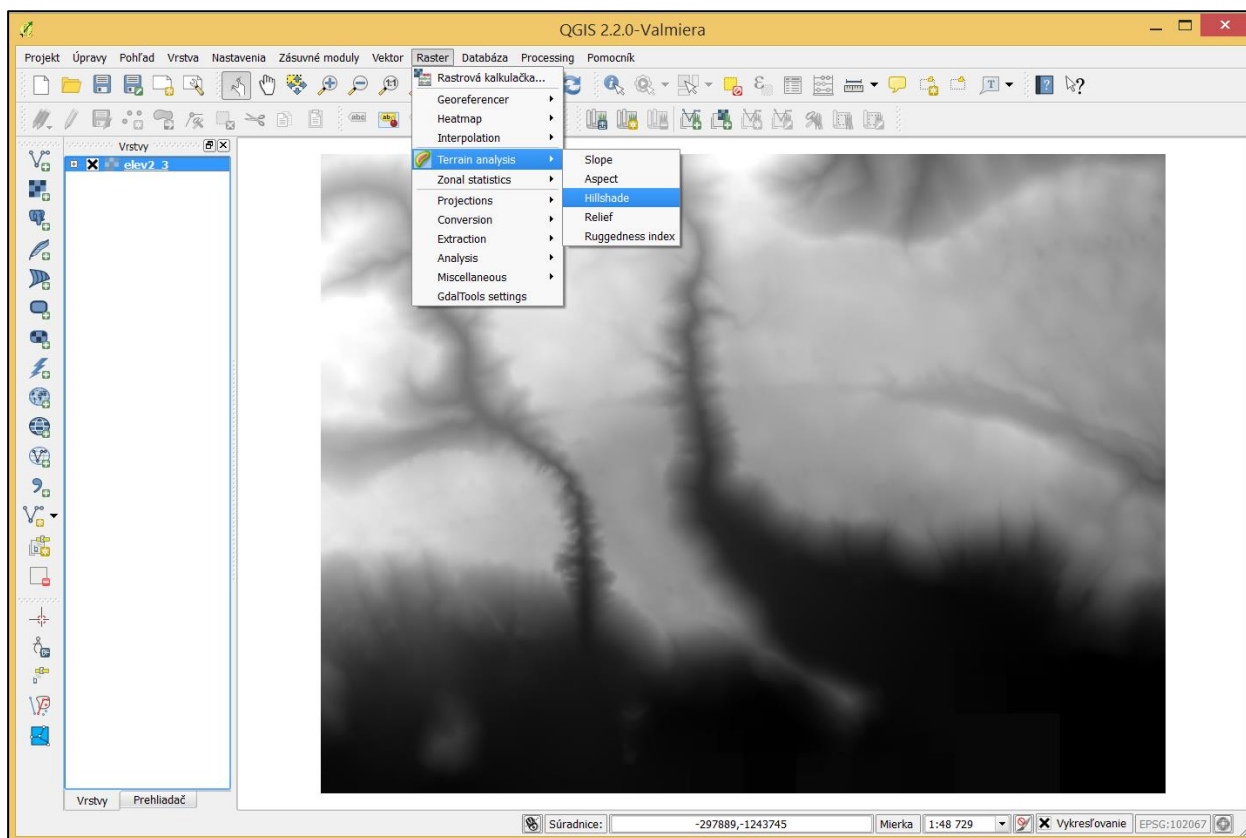
Funkcionalitu a využitie GRASS GIS výrazne rozširuje možnosť úzkeho prepojenia s externými programami, ako je napríklad R, QGIS, ktorým sa venujú nasledujúce podkapitoly.



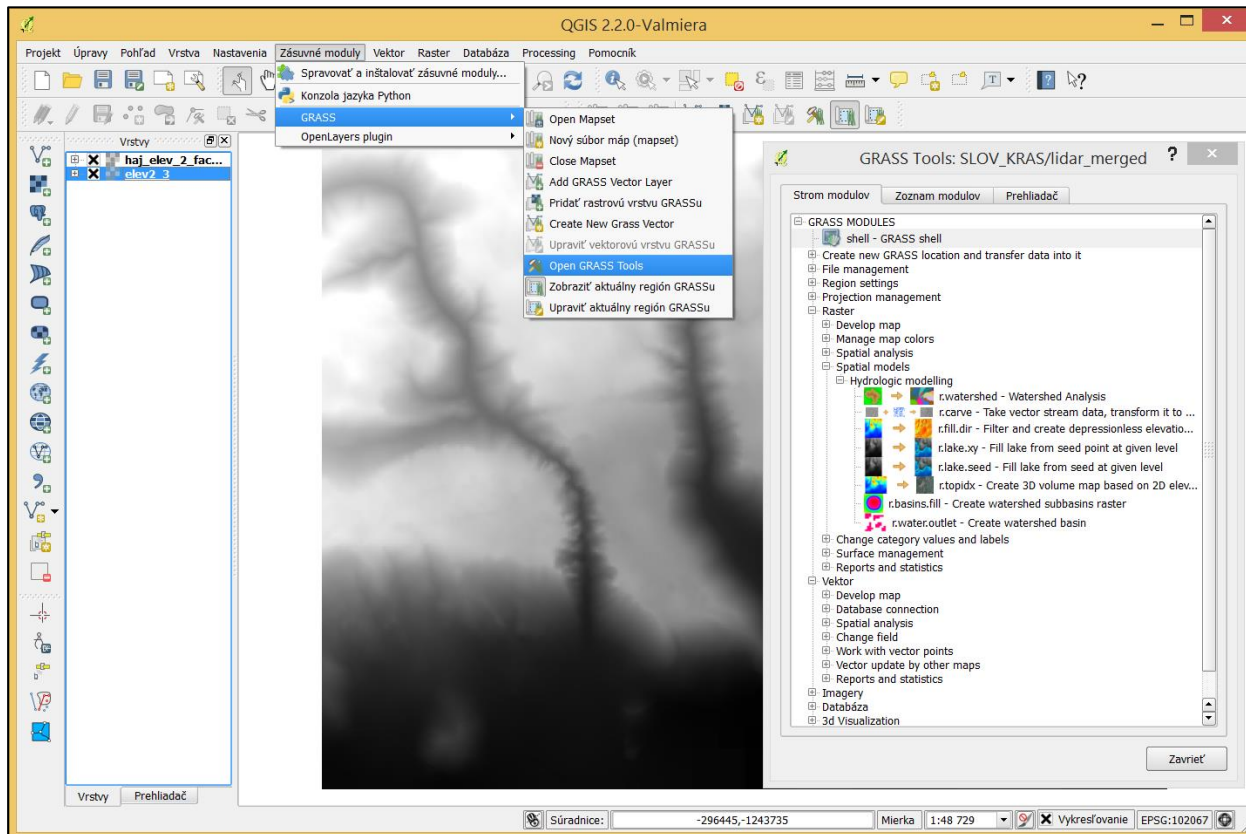
Obr. 6.2: Používateľské rozhranie slobodného softvéru s otvoreným kódom GRASS GIS.

6.2 Quantum GIS

Quantum GIS je označovaný aj ako QGIS. Je to užívateľsky veľmi priateľský open-source softvér dostupný v rámci GNU General Public License. Podobne ako GRASS GIS je QGIS oficiálnym produktom OSGeo. Jeho rozhranie je podobné ako v prípade ArcGIS a aj preto si naň mnoho začiatočníkov ľahko zvykne. QGIS podporuje mnoho vektorových, rastrových a databázových dátových modelov, čo mu umožňuje integrovať mnoho rôznych typov údajov. QGIS samostatne umožňuje niektoré základné operácie v tvorbe DMR, ako je interpolácie do rastra, tvorba TIN z vektorových dát, a odvodenie základných geomorfometrických parametrov. QGIS však v sebe integruje aj GRASS GIS, do ktorého možno vstupovať priamo v rámci QGIS. Užívateľ tak nestráca možnosť jednoduchého ovládania v GUI a získava plnú funkcionality GRASS GIS. Ukážky grafického rozhrania programu sú na Obr. 6.3 a 6.4.



Obr. 6.3: Grafické rozhranie Quantum GIS verzie 2.2.0 Valmiera s ponukou pre prácu s rastrovými dátami.



Obr. 6.4: Grafické rozhranie Quantum GIS verzie 2.2.0 Valmiera s rozhraním pre ovládanie funkcií GRASS GIS.

6.3 Prostredie R

R je jednoduchý názov pre objektovo orientovaný programovací jazyk, ako aj softvérové prostredie pre počítačové štatistické výpočty a grafiku (R Core Team 2014). R je kolaboratívny projekt mnohých autorov dostupný ako voľný softvér pod GNU General Public License a ide o open-source implementáciu komerčného softvéru S. Samotný softvér obsahuje základné programovacie a štatistické funkcie avšak je rozširiteľný podľa potreby užívateľa inštalovaním programových balíkov (angl. packages), ktorých je v súčasnosti vyše 6000. S prostredím R možno pracovať samostatne, ale aj v prepojení s inými programami ako GRASS GIS, ArcGIS, SAGA GIS, čo ešte viac zvyšuje užívateľský potenciál a kapacitu. Najmä vo vedecko-výskumnej oblasti predstavuje R neobmedzené možnosti štatistickej analýzy dát vrátane geopriestorových. Príkladom efektívnej práce s geopriestorovými dátami je tvorba histogramu na Obr. 5.5a výpočet sumárnych štatistických ukazovateľov nadmorských výšok DMR, pre čo bol použitý jednoduchý skript:

```
> library(sp)
> dmr.grid <- read.asciigrid("D:/R_home/Morphometry/1_Barton/1_lp5bl_t_elev.asc")
> hist(dmr.grid@data[[1]], breaks=100, col=terrain.colors(99), main="", border=F,
      xlab="nadmorská výška v metroch", ylab="pocet buniek DMR")
> summary(dmr.grid)
Object of class SpatialGridDataFrame
Coordinates:
      min      max
[1,] 500250 500990
[2,] 420900 422000
Is projected: NA
proj4string : [NA]
Grid attributes:
      cellcentre.offset cellsize cells.dim
1          500252.5         5         148
2          420902.5         5         220
Data attributes:
      Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.    Max.     NA's
40.58  53.92   56.00   54.84  56.43   59.45      1
```

Po zoznámení sa s prostredím a syntaxom sa stane analýza dát a tvorba výstupov v R veľmi rýchla a efektívna. Pre viac informácií o použití R s GRASS GIS odporúčame publikácie Grohman (2004), Neteler a Mitasova (2008) a Bivand et al. (2013). Prepojenie s GRASS GIS je možné použitím balíka *spgrass6* (Bivand 2014) a spustením R z prostredia GRASS GIS resp. Quantum GIS. Pre spustenie verzie GRASS GIS 7 a vyššej je vhodnejší balík *rgrass7* (Bivand et al. 2015). Balík *spgrass6* využíva ďalšie balíky pre presun dát medzi R a GRASS-om. Ide najmä o balíky *rgdal* a *sp*, ktoré tak ako GRASS GIS majú hlavný mechanizmus exportu a importu dát založený na knižniciach GDAL a OGR. Rozhranie R-GRASS funguje na výmene dočasných dátových súborov vo formátoch, ktoré R a GRASS poznajú a dokážu spracovať.

Ďalej v texte je uvedený sled príkazov (skript) demonštrujúci funkcionality prepojenia R a GRASS GIS. R bol spustený v rámci GRASS GIS, v ktorom bola otvorená vzorová LOCATION pre Severnú Karolínu „nc_basic_spm_grass7“. Pre spustenie R je nutné v príkazovom riadku GRASS GIS zadať umiestnenie spustiteľného binárneho súboru Rgui.exe a spustiť ho ako to vidieť na Obr. 6.5. V prostredí R potom možno pracovať s GRASS GIS pomocou uvedených príkazov ich označením a spúšťaním kombináciou kláves Ctrl+R. Riadky v skripte začínajúce znakom # sú opisné a R ich nevykoná. Niektoré výstupy skriptu ukazuje Obr. 6.6.

```
# po otvorení R v rámci GRASS-u s nastavenou LOCATION a MPASET-om
# načítanie balíka spgrass6 a rgdal pre prácu s GRASS GIS
# ak balíky ešte neboli inštalované, je potrebné tak urobiť príkazom
library(spgrass6)
library(rgdal)
```

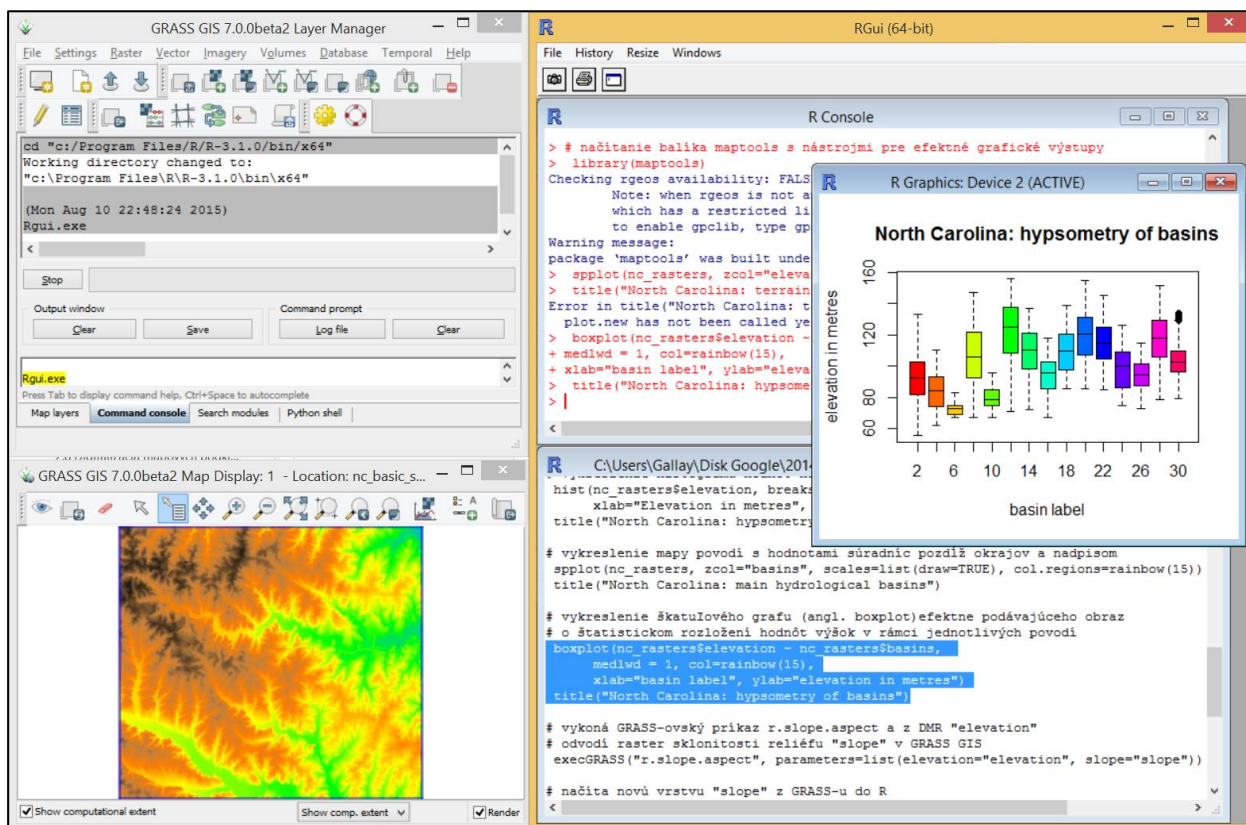
```

# install.packages("spgrass6")
# analogicky pre ostatné balíky

#vypíše parametre aktuálnej LOCATION a jej regiónu
gmeta6()

# vypíše zoznam rastorvých vrstiev v rámci LOCATION
execGRASS("g.list", parameters=list(type="rast"))
# nastaví región LOCATION tak, aby sa zhodoval s rozsahom vrstvy "elevation"
execGRASS("g.region", parameters=list(rast="elevation"))
# do premennej nc_rasters načíta dve rastrové vrstvy z LOCATION z GRASS-u
nc_rasters <- readRAST6(c("basins", "elevation"),cat=c(FALSE, FALSE), ignore.stderr=TRUE,
plugin=NULL)
# vykoná GRASS-ovský príkaz r.stats pre vrstvu "basins"
execGRASS("r.stats", flags=c("c", "l"), parameters=list(input="basins"),
ignore.stderr=TRUE)
# výpis základnej štatistiky v rámci R na základe načítaných dát "basins"
# v premennej nc_rasters
table(nc_rasters$basins)
# zmení hodnoty buniek vo vrstev basins na hodnoty typu "faktor"
# z reálnych čísiel sa stanú kategorické hodnoty
# reprezentujúce povodia ako popisky
nc_rasters$basins <- factor(nc_rasters$basins)
# sumárne štatistiky pre vrstvu "elevation", stále v rámci R
summary(nc_rasters$elevation)
# načítanie balíka mapprotools s nástrojmi pre efektné grafické výstupy
library(mapprotools)
# vykreslenie mapy nadmorských výšok s hodnotami súradníc pozdĺž okrajov
# a nadpisom
spplot(nc_rasters, zcol="elevation", scales=list(draw=TRUE), col.regions =
terrain.colors(20))
title("North Carolina: terrain elevation")
# vykreslenie histogramu hodnôt nadmorských výšok s nadpisom
hist(nc_rasters$elevation, breaks=21, col=terrain.colors(20),
xlab="Elevation in metres", ylab="Number of cells", main="")
title("North Carolina: hypsometry")
# vykreslenie mapy povodí s hodnotami súradníc pozdĺž okrajov a nadpisom
spplot(nc_rasters, zcol="basins", scales=list(draw=TRUE), col.regions=rainbow(15))
title("North Carolina: main hydrological basins")
# vykreslenie škatulového grafu (angl. boxplot) efektne podávajúceho obraz
# o štatistickom rozložení hodnôt výšok v rámci jednotlivých povodí
boxplot(nc_rasters$elevation ~ nc_rasters$basins,
medlwd = 1, col=rainbow(15),
xlab="basin label", ylab="elevation in metres")
title("North Carolina: hypsometry of basins")
# vykoná GRASS-ovský príkaz r.slope.aspect a z DMR "elevation"
# odvodí raster sklonitosti reliéfu "slope" v GRASS GIS
execGRASS("r.slope.aspect", parameters=list(elevation="elevation", slope="slope"))
# načíta novú vrstvu "slope" z GRASS-u do R
# a doplní ju do existujúcej premennej nc_rasters v rámci R
nc_rasters <- cbind(nc_rasters, readRAST6(c("slope"),cat=c(FALSE), ignore.stderr=TRUE,
plugin=NULL))
# vykreslenie mapy sklonitosti reliéfu s hodnotami súradníc
# pozdĺž okrajov a s nadpisom
spplot(nc_rasters, zcol="slope", scales=list(draw=TRUE),
col.regions=rev(heat.colors(20)))
title("North Carolina: terrain slope angle")
# vykreslenie škatulového grafu sklonitosti reliéfu pre jednotlivé povodia
boxplot(nc_rasters$slope ~ nc_rasters$basins,
medlwd = 1, col=rainbow(15),
xlab="basin label", ylab="slope in degrees")
title("North Carolina: slope angle of basins")
# koniec skriptu

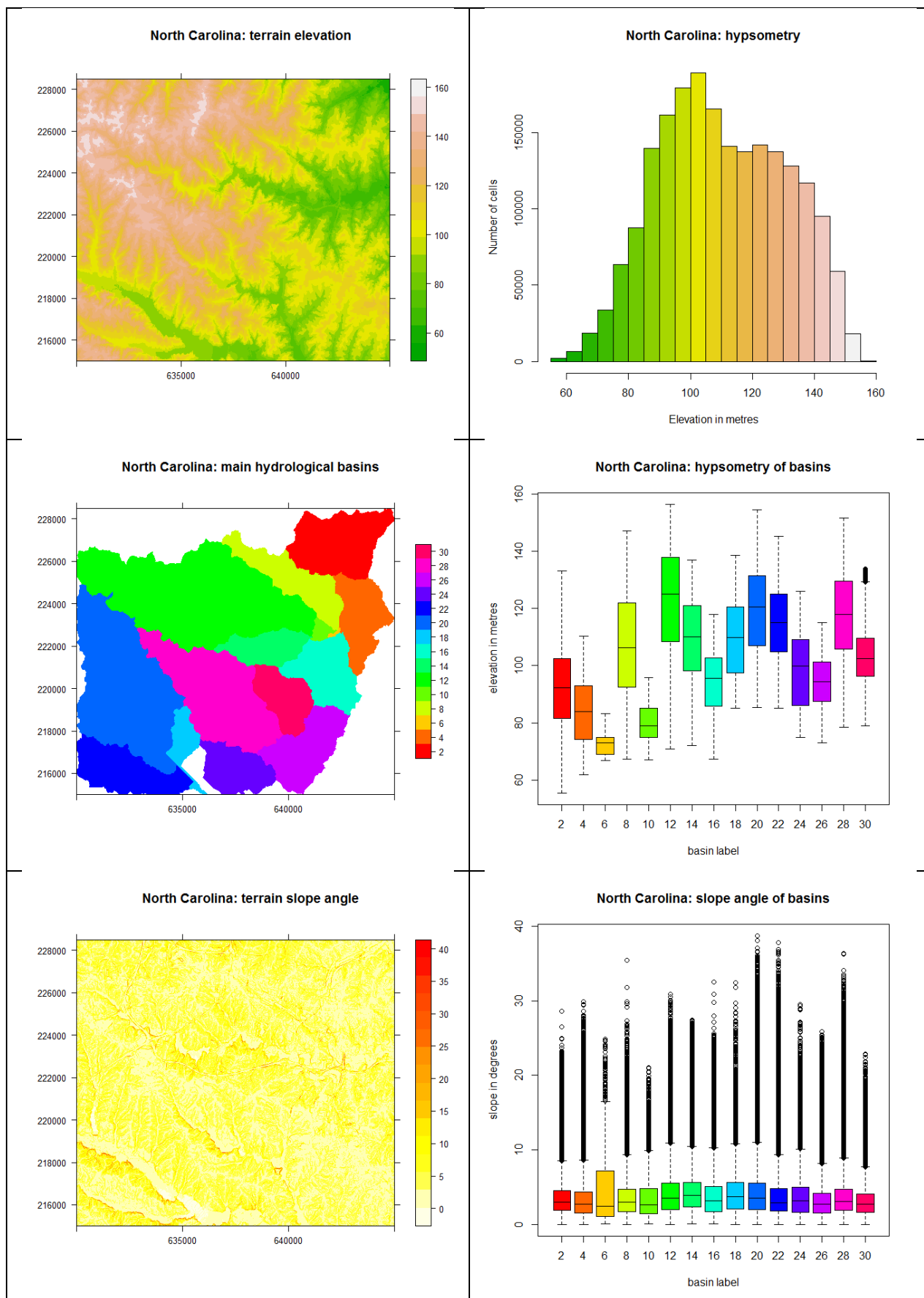
```



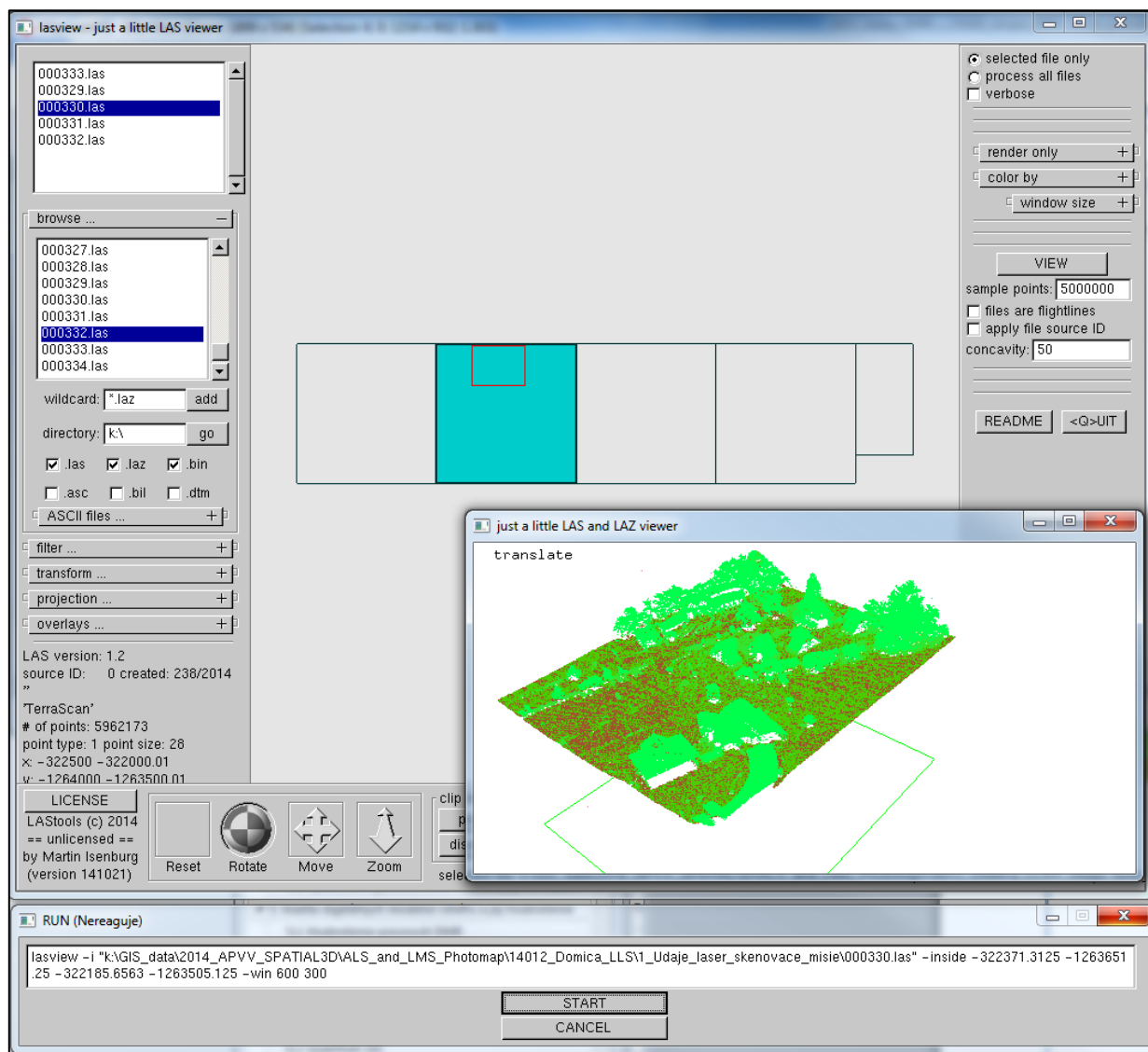
Obr. 6.5: Grafické rozhranie GRASS GIS so spusteným prostredím R.

6.4 LAStools

Doménou LAStools je spracovanie údajov z leteckého laserového skenovania, klasicikácia, filtrácia, tvorba DMR a DSM, ako aj konverzie dátových formátov (Isenburg, 2014). Tento softvér má veľmi dobre prepracované algoritmy plne schopné využiť viacjadrové procesory a tak umožniť rýchle prekresľovanie a výpočty s miliónmi súradníc tvoriacich mračná bodov získavaných laserovým skenovaním. LAStools sú určené primárne pre dáta z leteckého skenovania, avšak možno tu spracovať aj iné 3D bodové dáta. Začiatok sa môže s programom oboznámiť na blogu ich tvorca Martina Isenburga (<http://rapidlasso.com/2013/10/13/tutorial-lidar-preparation/>), ktorý vlastní firmu rapidlasso GmbH. LAStools je súborom samostatných nástrojov, ktoré možno ovládať cez grafické rozhranie alebo skriptami v príkazovom riadku (Obr. 6.7). Dostupné sú aj ako zásuvný modul pre Quantum GIS a ArcGIS. Časť nástrojov je open-source a sú dostupné v rámci licencie LGPL 1.2, ostatné nástroje možno používať pre nekomerčné účely, avšak pri prekročení počtu bodov 2 milióny bude vo výstupe uhlopriečne vynechaný pás dát. Riešenie je buď zakúpiť komerčnú licenciu alebo rozdeliť dáta na menšie časti, tak aby neprekračovali uvedený limit. Obr. 2.19 ukazuje výstupy práce s konkrétnymi nástrojmi LAStools, ktoré boli použité pre identifikáciu bodov na teréne a mimo neho (*lasground*), odstránenie bodov príliš vzdialených od terénu (*lasheight*) a klasifikáciu bodov (*lasclassify*). Tvorba DMR z lidarových dát nie je triviálna úloha najmä pokiaľ ide o rozsiahle územia. Šašák (2015) prezentuje postup tvorby DMR s veľkosťou bunky 1x1 m využívajúc funkcionality LAStools, QGIS a GRASS GIS zo vstupných dát obsahujúcich 10 miliárd bodov na ploche 68 km² Slovenského krasu. Obr. 2.22 a Obr. 5.1 zobrazujú ďalšie príklady výstupov práce v LAStools.



Obr. 6.6: Výstupy vykonania príkazov využívajúcich prepojenie R a GRASS GIS na základe skriptu uvedeného v texte aj s vysvetlivkami.



Obr. 6.7: Uživatelské rozhranie LAStools pre nástroj lasview so zobrazením lidarových dát pre vstupný areál jaskyne Domica.

- Albrecht, J. (2015). *Natural neighbours*. Dostupné na: <http://www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lectures/lecture10/3Dconcepts/Natural%20Neighbors.htm>.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) (2014). American Society for Photogrammetry and Remote Accuracy Standards for Digital Geospatial Data, *Photogrammetry Engineering & Remote Sensing*, November 2014.
- Anderson, E.S., Thompson, J.A., Austin, R.E. (2005). LIDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 3889 - 3900.
- Atkinson, P. M., Tate, N. J. (2000). Spatial Scale Problems and Geostatistical Solutions: A Review. *The Professional Geographer*, 52, 607-623.
- Augath, W. and Ihde, J. (2002). Definition and Realization of Vertical Reference Systems – The European Solution: EVRS/EVRF 2000. *FIG XXII International Congress*. Dostupné na: http://www.fig.net/pub/fig_2002/procmain.htm.
- Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 83-94.
- Bamler, R., Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse problems*, 14, 1-154.
- Bannister, A., Raymond, S., Baker, R. (1998). *Surveying*. Pearson Education Ltd., Harlow.
- Bastian, O., Steinhardt, U., Naveh, Z. (2002). *Development and Perspectives of Landscape Ecology*, Springer. 498 s.
- Bitterer, L. (2005). *Základy fotogrametrie*. Katedra geodézie, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita, 3. vydanie. Dostupné na: <http://svf.uniza.sk/kgd/>
- Bivand, R. (2014). *spgrass6: Interface between GRASS 6 and R*. R package version 0.8-6.
- Bivand, R. Krug, R., Neteler, M. (2015). *rgrass7: Interface Between GRASS 7 Geographical Information System and R*. 0.1-0.
- Bivand, R.S., Pebesma, E., Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied Spatial Data Analysis with R. UseR! Series*, Springer, 2. vydanie, 405 s.
- Blair, R. W., Jr. (2003) Geomorphology: Boundaries between Media. In: Evans, I. S., Dikau, R., Tokunaga, E., Ohmori, H., Hirano, M. (Eds.) *Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives*, TERRAPUB, Tokyo, 33-42.
- Blunt, L., Jiang, X. (Eds.) (2003). *Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand"*, Elsevier. 355 p.
- Bolťižiar, M. (2007). *Štruktúra vysokohorskej krajiny Tatier - veľkomierkové mapovanie, analýza a hodnotenie zmien aplikáciou údajov diaľkového prieskumu Zeme*. Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre.
- Büdel, J. (1982). *Climatic Geomorphology*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 443 s.
- Bue, B. D., Stepinski, T. F. (2006). Automated classification of landforms on Mars. *Computers & Geosciences*, 32, 604-614.
- Burian, L., Jenčo, M., Rusnák, M. (2015). *GRASS GIS: Geovedné aplikácie*. Bratislava: Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodoved. fakulta a Slovenská akadémia vied, Geografický ústav, 103 s. Dostupné na: http://staryweb.fns.uniba.sk/fileadmin/user_upload/editors/geog/kfg/Katedra/Studium/Vyuzitie_PC_vo_FGV_2/skripta_burian_et_al_grassgis_2015.zip.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, Oxford.
- Cambridge advanced learner's dictionary, (2008). Cambridge advanced learner's dictionary. Cambridge University Press; 3. vyd., 1814 s.

- Carrara, A., Bitelli, G., Carla, R. (1997). Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 451-473.
- Cignoni P., Ranzuglia G., (2014). MeshLab, Visual Computing Lab – ISTI – CNR. Dostupné na: <http://meshlab.sourceforge.net/>
- COED (2005). *Compact Oxford English Dictionary of Current English*, Oxford University Press.
- Cressie, N.A.C. (1993). *Statistics for spatial data*, John Wiley and Sons, New York. 900 s.
- Čerňanský, J., Kožuch, M., Stanková H. (2013). *Základy fotogrametrie*. Univerzita Komenského, Bratislava.
- Demek, J. (1987). *Úvod do štúdia teoretickej geografie*. Slovenské pedagogické nakladateľstvo Bratislava.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G. (1998). *GSLIB : geostatistical software library and user's guide*, Oxford University Press, New York ; Oxford. 369 s.
- Dikau, R. (1989). The application of digital relief model to landform analysis in geomorphology. In *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems* (Ed, Raper, J.) CRC Press, pp. 189.
- Dikau, R., Schmidt, J. (1999). Georeliefklassifikation. In : Schneider-Sliwa, R., Schaub, D., Gerold, G., Töpfer, K. (Eds.) *Angewandte Landschaftsökologie*, Springer, 217-229.
- El-Rabbany, A. (2002). *Intorduction to GPS: The Global Positioning System*, Artech House, London.
- El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A. (2005). *Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications*, Artech House, Norwood, MA, USA.
- Evans, I. S. (1972) General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistic. In: Chorley, R. J. (Ed.) *Spatial analysis in Geomorphology*, Methuen, London, 17-90.
- Evans, I. S. (1990) General geomorphometry. In: Goudie, A. (Ed.) *Geomorphological techniques*, London.
- Feciskanin, R. (2011). Metódy zjednodušovania modelov plôch pri modelovaní georeliéfu nepravidelnou trojuholníkovou sieťou. *Kartografické listy*, 19, 46-54.
- Fisher, P. F., Tate, N. J. (2006). Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*, 30, 467-489.
- Gallay, M. (2010). *Assessing alternative methods of acquiring digital elevation data*. (doktorandská práca). Queen's University Belfast, School of Geography, Archaeology and Palaeoecology. Dostupné na: http://kosice.upjs.sk/~michal.gallay/2010_GALLAY_Michal_PhD_thesis_image_compression_high_300DPI_15MB.pdf
- Gallay, M. (2013). Section 2.1.4: Direct Acquisition of Data: Airborne laser scanning. In: Clarke, L.E., Nield, J.M. (Eds.) *Geomorphological Techniques (Online Edition)*. British Society for Geomorphology; London, UK. Dostupné na: http://www.geomorphology.org.uk/onsite_publications
- Gallay, M., Kaňuk, J., Hofierka, J., Hochmuth, Z., Meneely, J. (2015). Mapping and geomorphometric analysis of 3-D cave surfaces: a case study of the Domica Cave, Slovakia. In Jasiewicz, J., Zwoliński, Z., Mitasova, H., Hengl, T. (Eds.) *Geomorphometry for Geosciences*, Poland: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Adam Mickiewicz University in Poznań - Institute of Geoecology and Geoinformation, 69-73.
- Gallay, M., Kaňuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J., Hofierka, J., Sedlák, V. (2015b). Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 44(3). (v tlači)
- Gallay, M., Kaňuk, J., Petrvalská, A., Hochmuth, Z. (2013b). Využitie údajov leteckého laserového skenovania vo výskume krasovej krajiny na príklade východnej časti Slovenského krasu. *Slovenský kras : Acta Carsologica Slovaca*, 51, 99-108.
- Gallay, M., Lloyd, C. McKinley, J., Barry, L. (2013a). Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: A case study from the Lake District, England. *Computers & Geosciences*, 51, 216-227.

- Gallay, M., Lloyd, C., McKinley, J. (2010). Using geographically weighted regression for analysing elevation error of high-resolution DEMs. In: *Accuracy 2010: Proceedings of the Ninth International Symposium : 20.-23.7.2010*, Leicester. University of Leicester, 109-113.
- Gallay, M., Lloyd, C., McKinley, J. (2012). Optimal interpolation of airborne laser scanning data for fine-scale DEM validation purposes. In Růžicka, J. (Ed.) *GIS Ostrava 2012 – Proceedings: Surface models for geosciences*. VSB-TU v Ostravě, Ostrava.
- Goodchild, M. F. (2001). Metrics of scale in remote sensing and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3, p. 114-120.
- Goovaerts (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. In *Journal of hydrology*, 228 (1-2), 113-129.
- Grohmann, C. H. (2004). Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. *Computers & Geosciences*, 30(9-10), 1055-1067.
- Guth, P. (2010): Geomorphometric comparison of ASTER GDEM and SRTM. *A special joint symposium of ISPRS Technical Commission IV & AutoCarto in conjunction with ASPRS/CaGIS 2010 Fall Specialty Conference, November 15-19, 2010 Orlando, Florida*.
- Haklay, M. (2004). Map Calculus in GIS: a proposal and demonstration. *International Journal of Geographic Information Science*, 18, 107-125.
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences*, 32, 1283-1298.
- Hengl, T., Evans, I. S. (2008). Mathematical and Digital Models of the Land Surface. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.) *Geomorphometry: concepts, software, applications*, Developments in Soil Science, 33, 31-64.
- Hengl, T. and Reuter, H. I. (Eds.) (2008). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33, Elsevier. 765 p.
- Heuvelink, G. B. M. (1998). *Error propagation in environmental modelling with GIS*, Taylor & Francis, London. 127 p.
- Hofierka et al. (1998). Rastrové digitálne modely reliéfu a ich aplikačné možnosti. *Folia Geographica*, 2, 208-217.
- Hofierka, J., (1993). Geometrická analýza povrchov (2D) a objemov (3D) ako nástroj pre skúmanie dynamických javov prírodnej krajiny v rámci 3D geoinformačných systémov. *Kartografické listy*, 1, 107-112.
- Hofierka, J., (1997). Modelovanie prírodných javov v prostredí geografického informačného systému, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského Bratislava (doktorandská práca).
- Hofierka, J. (2012). Topographic Solar Radiation Modeling for Environmental Applications. In: Meyers, R. A. (Ed.): *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, 10621-10636.
- Hofierka, J., Cebecauer, T., Šúri, M. (2007). Optimisation of Interpolation Parameters Using a Cross-validation. In: Peckham, R. J., Jordan, G. (Eds.) *Digital terrain modelling : development and applications in a policy support environment*, Springer, 67-82.
- Hofierka, J., Kaňuk, J., Gallay, M. (2014). *Geoinformatika*. Vysokoškolská učebnica, Košice (Univerzita Pavla Jozefa Šafárika), 194 s.
- Hofierka, J., Knutová, M. (2015). Simulating Spatial Aspects of a Flash Flood Using the Monte Carlo Method and GRASS GIS: a Case Study of the Malá Svinka Basin (Slovakia). *Open Geosciences*, 7(1), 118-125.
- Hofierka, J., Mitášová, H., Neteler, M. (2008). Geomorphometry in GRASS GIS. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33, Elsevier, 387-410.
- Hofierka, J., Šúri, M., Cebecauer, T., (1998). Rastrové digitálne modely reliéfu a ich aplikačné možnosti. *Acta Facultatis Studiorum Humanitatis et Naturae Universitatis Prešovensis. Prírodne vedy, Folia Geographica*, 2, 208-217.
- Hofierka, J., Zlocha, M., (1993). Application of Surface and Volume Geometry Analysis in Geosciences. *Geologica Carpathica*, 44, 94-94.

- Hofierka, J., Zlocha, M. (2012). A New 3-D Solar Radiation Model for 3-D City Models. *Transactions in GIS*, 16(5), 681-690.
- Höhle, J., Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398–406.
- Höhle, J., Potůčková, M. (2011). *Assessment of the Quality of Digital Terrain Models*. Official Publication no. 60. European Spatial Data Research (EuroSDR). Dostupné na: <http://www.eurosd.net/publications/60.pdf>
- Hojovec, V., Daniš, M., Hájek, M., Veverka, B. (1987). *Kartografie*, GKP, Prague. 660 s.
- Holmes, K. W., Chadwick, O. A., Kyriakidis, P. C. (2000). Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology*, 233, 154-173.
- Huggett, R.J. (1995). *Geocology: A Evolutionary approach*. Routledge. 320 s.
- Huggett, R.J., Cheesman, J. (2002). *Topography and the Environment*. Pearson Education. 274 s.
- Hunter, G.J., Goodchild, M.F. (1997). Modeling the Uncertainty of Slope and Aspect Estimates. *Geographical Analysis*, 29, 35-49.
- Hutchinson, M. F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106, 211-232.
- Chorley, R. J. and Haggett, P. (1969). *Socio-Economic Models in Geography*, Methune, London. 468 s.
- Chudý, R., Iring, M., Feciskanin, R. (2013). Evaluation of the Data Quality of Digital Elevation Models in the Context of INSPIRE. *GeoScience Engineering*, 59(2), 9-24.
- Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. (1989). *Applied geostatistic*. Oxford University Press. 561 s.
- Isenburg, M. (2014). *LAStools - efficient LiDAR processing software* (version 141017, unlicensed). Dostupné na: <http://rapidlasso.com/LAStools>
- Jackson, J. A., Mehl, J. P. and Neuendorf, K. K. E. (2005). *Glossary of geology*. Springer Science & Business. 779 s.
- Jenčo, M. (1992a). Distribúcia priameho slnečného žiarenia na georeliéfe a jej modelovanie pomocou Komplexného digitálneho modelu reliéfu, *Geografický časopis*, 44(4), 342-355.
- Jenčo, M. (1992b). The Morphometric Analysis of Georelief in Terms of a Theoretical Conception of the Complex Digital Model of Georelief. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica*, 33, 133 – 153.
- Jordan, G., Scott, B. (2005). Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. A case study. *Remote Sensing of Environment*, 94, 31-38.
- Kaňuk, J., Gallay, M., Hofierka, J. (2015). Generating time series of virtual 3-D city models using a retrospective approach. *Landscape and Urban Planning*, 139, 40-53.
- Kianička, J., Čapková, I. (2005). Využitie SAR interferometrie pre vytváranie DEM a detekciu deformácií v Severočeskej hnedouhoľnej panve. In Růžička, J. (Ed.) *Sborník mezinárodního sympózia GIS Ostrava Interoperabilitou k mobilitě*, 23. – 26. januára 2005, VŠB-TU v Ostrave. Dostupné na: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2005/Sbornik/cz/Referaty/default.htm.
- Kraus, K., Briese, C., Attwenger, M. and Pfeifer, N. (2004). Quality measures for digital terrain models. In: Altan, O. (Ed.) *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress Proceedings*, Vol. XXXV. Part B/2, ISPRS, Istanbul, 113-118.
- Krcho, J. (1964). To the problem of the construction of maps of slope gradient, maps of isoclines, isoaluminclines, isoaluminchons. *Geografický časopis*, 16, 61-75.
- Krcho, J. (1973). Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory. *Acta Geographica Universitatis Comenianae, Geographia Physica*, 1, 11-233.

- Krcho, J., (1978). The spatial organization of the physical-geographical sphere as a cybernetic system expressed by means of entropy. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica*, 16, Bratislava, 57-145.
- Krcho, J. (1987). Mathematical properties of the topographical surface of georelief from the viewpoint of morphometric analysis as well as modelling by means of a complex digital model (in Slovak, with English abstract). *Geografický časopis*, 39, 169-204.
- Krcho, J. (1990). *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Bratislava, Veda, 416 s.
- Kugler, H. (1974). *Das Georelief und seine kartographische Modellierung*. Martin-Luther-Universität Halle. Wittenberg. (doktorandská práca)
- Kumler, M. P. (1994). An Intensive Comparison of Triangulated Irregular Networks (TINs) and Digital Elevation Models (DEMs). *Cartographica*, 31, 1-99.
- Lam, N. S.-N. (1983). Spatial Interpolation Methods: A Review. *Cartography and Geographic Information Science*, 10, 129-150.
- Lam, N. S.-N., Quattrochi, D. A. (1992). On the Issues of Scale, Resolution, and Fractal Analysis in the Mapping Sciences. *The Professional Geographer*, 4, s88-98.
- Lexique_topographique (2000). *Lexique topographique 2000*. Association française de topographie, 2000. Dostupné na: <http://aftopo.club.fr/publications/lexique/pagelexique.htm>.
- Li, Z. (2008) Multi-scale Digital Terrain Modelling and Analysis. In: Zhou, Q., Lees, B., Tang, G.-a. (Eds.) *Advances in Digital Terrain Analysis*, Springer, 59-81.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: Principles and Methodology*. CRC Press, London.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W., (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley & sons.
- Lloyd, C. D. (2007). *Local models for spatial analysis*, CRC/Taylor & Francis, Boca Raton. 244 s.
- Lloyd, C. D. and Atkinson, P. M. (2002). Non-stationary Approaches for Mapping Terrain and Assessing Prediction Uncertainty. *Transactions in GIS*, 6, 17-30.
- Lloyd, C. D. and Atkinson, P. M. (2006). Deriving ground surface digital elevation models from LiDAR data with geostatistics. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, 535-563.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (2011). *Geographic Information Systems and Science*. John Wiley & Sons.
- Lukács, I.E., Riesz, F. (2001). A Simple Algorithm for the Reconstruction of Surface Topography from Makyoh-Topography Images. *Crystal Research and Technology*, 36, 1059-1064.
- Matheron, G. (1965). *Les variables régionalisées et leur estimation*, Paris.
- Maune, D. (Ed.) (2001). *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*, American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, Bethesda, MD, 540 s.
- Mercer, B. (2001) Combining LIDAR and IfSAR: What can you expect? In: Fritsch, D., Spiller, R. (Eds.) *Photogrammetric Week 2001*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 227-237. Dostupné na: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Mercer.pdf>.
- Mičian, L., Zatkálík, F., (1986). *Náuka o krajine a starostlivosť o životné prostredie*. Vysokoškolské skriptá. Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského Bratislava.
- Mičietová, E., Iring, M. (2011). Hodnotenie kvality digitálnych výškových modelov. *Geodetický a kartografický obzor*, 57(3), 45-57.
- Miller, C. L., Laflamme, R. A. (1958). The Digital Terrain Model -Theory & Application. *Photogrammetric Engineering*, 24, 433-442.
- Minár, J. (1992). The principles of the elementary geomorphological regionalization. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae. Geographica.*, 33, 185-198.

- Minár, J., Evans, I. D. (2008). Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 95 (3-4), 236-259.
- Minár, J., Jenčo, M., Evans, I.S., Minár, J. jr. , Kadlec, M., Krcho, J., Pacina, J., Burian, L., Benová, A. (2013). Third-order geomorphometric variables (derivatives): definition, computation and utilization of changes of curvatures. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(7), 1381-1402.
- Mitas, L., Mitasova, H. (1998). Distributed erosion modeling for effective erosion prevention. *Water Res. Res.*, 34, 505-516.
- Mitas, L., Mitasova, H. (2000). *Unit 130 - Process Modeling and Simulations*. NCGIA Core Curriculum in Geographic Information Science, <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc>
- Mitasova, H., Mitas, L., Ratti, C., Ishii, H., Alonso, J., & Harmon, R. S. (2006). Real-time landscape model interaction using a tangible geospatial modeling environment. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 26(4), 55–63. Dostupné na: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1652927
- Mitasova, H., Overton, M., Recalde, J.J., Bernstein, D., Freeman C. (2009). Raster-based analysis of coastal terrain dynamics from multitemporal lidar data. *Journal of Coastal Research*, 25, 507-514.
- Mitáš, L., Mitášová, H. (1999). Spatial interpolation. In: Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W (Eds.) *Geographical Information Systems. Volume 1: Principles and Technical Issues*, John Wiley & Sons, New York, 481-492.
- Mitášová, H., Hofierka, J. (1993). Interpolation by regularized spline with tension : II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25, 657-659.
- Mitášová, H., Mitáš, L. (1993). Interpolation by regularized spline with tension : I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, 25, 641-655.
- Mitášová, H., Brown, W., Hofierka, J., 1994, Multidimensional dynamic cartography. *Kartografické listy*, 2, 37-50.
- Mitášová, H., Mitáš, L., Harmon, R. S. (2005). Simultaneous spline approximation and topographic analysis for lidar elevation data in open source GIS. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2, p. 375-379.
- Molodenskij M. S., Eremeev V. F., Yurkina M. I., 1960: *Methods for Study of the External Gravitational Field and Figure of the Earth*. Translated from Russian by the Israel Program for Scientific Translations for the Office of Technical Services, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., U.S.A., 1962.
- Mulla, D. J. (1988). Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of southeastern Washington State, U.S.A. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 389-405.
- Naveh, Z., Lieberman, A. S. (1994). *Landscape Ecology: theory and application*, Springer. 360 s.
- Neteler, M., Mitášová, H. (2008). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, 3. vydanie, Kluwer Academic Press, Boston.
- Neteler, M., Bowman, M.H., Landa, M., Metz, M. (2012): *GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. Environmental Modelling & Software*. 31, 124–130.
- Neteler, M., Mitasova, H., 2004, *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, 2. vydanie, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Oksanen, J., Sarjakosi, T. (2006). Uncovering the statistical and spatial characteristics of fine toposcale DEM error. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, 345-369.
- Oksanen, J., Sarjakoski, T. (2005). Error propagation of DEM-based surface derivatives. *Computers & Geosciences*, 31, 1015-1027.
- Oosterom, P. J. M. v., Zlatanova, S., Penninga, F. and Fendel, E. M. (Eds.) (2008). *Advances in 3D Geoinformation Systems*, Springer. 441 s.
- Pan, X., Nakamura, H., Liu, Y., Lang, Y. (2005). Automatic analysis algorithm for side-slope cut-fill based on digital elevation model. *Geoinformatics*, 16, 35-40.

- Pasák, V., Janeček, M., Šabata, M., 1983, Ochrana zemědělské půdy před erozí. *Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe*, 11. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství Praha.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A. Kenyon, S. C. Factor, J.K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research*, 117, B04406, doi:10.1029/2011JB008916.
- Pike, R.J. (2002). *A Bibliography of Terrain Modeling (Geomorphometry), the Quantitative Representation of Topography - Supplement 4.0*. USGS. Available online: <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of02-465/of02-465.pdf>.
- Pike, R.J., Evans, I.S. and Hengl, T. (2008) Geomorphometry: A brief guide. In: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33, Elsevier, 3-30.
- Pisca, P. (2005). *Globálne navigačné systémy*. Vysokoškolské skriptá. Stavebná fakulta Žilinskej univerzity, Žilina. Dostupné online: <http://svf.utc.sk/kgd/>
- Podobnikar, T. (2009). Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *S.A.P.I.E.N.S*, 1, 1-10. Dostupné na: <http://sapiens.revues.org/index738.html>.
- Pravda, J. (2004). Semantics and standard level of language with cartographic terms. *Geodetický a kartografický obzor*, 50/92, 179-183.
- Quattrochi, D.A., Goodchild, M.F. (1997). *Scale in remote sensing and GIS*, CRC Press. 406 p.
- R Core Team (2014). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Viedeň, Rakúsko. Dostupné na: <http://www.R-project.org/>
- Rapant, P. (2002). *Družicové polohové systémy*. VŠB-TU v Ostravě, 200 s. (vysokoškolské skriptá)
- Rees, W. G. (2000). The accuracy of Digital Elevation Models interpolated to higher resolutions. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 7-20.
- Rees, W. G. (2000). The accuracy of Digital Elevation Models interpolated to higher resolutions. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 7-20.
- Sedlák, V. (1997). *Globálna geodézia II*. Technická univerzita v Košiciach, Fakulta baníctva, ekológie, riadenia a geotechnológií, 93 s. (vysokoškolské skriptá)
- Shan, J., Toth, C.K. (2009). *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*. CRC Press.
- Schabenberger, O., Gotway, C. A. (2005). *Statistical methods for spatial data analysis*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton. 488 s.
- Sickle, J. V. (2001). *GPS for land surveyors*, CRC Press. 284 s.
- Sládek, J., Rusnák, M., (2013). Nízkonákladové mikro-uav technológie v geografii (nová metóda zberu priestorových dát). *Geografický časopis*, 65(3), 269 – 285.
- SLEX, 2015: *Slovník slovenského jazyka*. Dostupné na: <http://slovník.juls.savba.sk/>
- Smreček, R., Michňová, Z. (2014). Identification of individual trees and groups of trees in the landscape using airborne laser scanning data, *Geodesy and Cartography*, 40(3), 110-115.
- Starek, M.J., Mitsova H., Wegmann, K, Lyons, N., (2013). Space-Time Cube Representation of Stream Bank Evolution Mapped by Terrestrial Laser Scanning, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6), 1369-1373.
- Sütti, J. (1987). *Geodézia*. ALFA, Bratislava. (vysokoškolská učebnica). 475 s.
- Svobodová, J., Tuček, P. (2009). Creation of dem by kriging method and evaluation of the results. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 2009(1), 53-60.
- Šašák, J. (2015). Spracovanie masívnych lidarových dát pre použitie v GIS. In: Růžička, J. (ed.), GISáček 2015. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut geoinformatiky. Dostupné na: http://gis.vsb.cz/GISacek/GISacek_2015/referaty/sasak.pdf

- Šíma, J. (2002). Musíme používat pracovní slang při prezentacích a v publikacích o geografických informačních systémech? In: Růžička, J. (Ed.) *Sborník z konference GIS Ostrava 2002, VŠB-TU v Ostravě*. Dostupné na: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2002/Sbornik/Referaty/sima.htm
- Šúri M., Cebecauer T., Hofierka J., Fulajtár E. (2002). Soil erosion assessment of Slovakia at a regional scale using GIS. *Ekológia*, 404-422.
- Šúri, M., Hofierka, J. (2004). A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments. *Transactions in GIS*, 8, 175-190.
- Temme, A.J.A.M., Heuveling, G.B.M., Schoorl, J.M., Claessens (2008). Geostatistical simulation and Error propagation in Geomorphometry. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (eds.), 2008, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33, Elsevier, 121-140.
- Tennant, J.K., Coyne, T. (1999). STAR-3i interferometric synthetic aperture radar (INSAR): Some lessons learned on the road to commercialization. In: *Proceedings of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing, 21-24 June 1999*. Ottawa, Ontario, Canada. Dostupné na: <http://www.intermap.com/uploads/1170701047.pdf>.
- Thrower, N. J. W. (2007). *Maps & Civilization: Cartography in Culture and Society*, University of Chicago Press. 352 s.
- Tobler, W. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, 234-240.
- Troll, C. (1939). Luftbildplan and ökologische bodenforschung. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde Zu Berlin*, 241-298.
- Vaniček, P., Kingdon, R., Santos, M. (2012). Geoid versus quasigeoid: a case of physics versus geometry. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(1), 101-118.
- Vojtek, M., Oláhová, J., Boltižiar, M. (2013). Vertical Accuracy Assessment of Digital Terrain Models Derived from Topographic Maps. In: *Scientia iuvenis: Book of Scientific Papers*. Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre. 289-296.
- Vojtičko, A., Pražák, J., Hájek, M., Hrnčiar, D., Petrovič, M., Rambousek, J., Skládal, L., Sokáčová, P., Vanko, J. (Eds.) (1998). *Terminologický slovník geodézie, kartografie a katastra*. Úrad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky, Bratislava. 544 s.
- Vosselman, G., Maas, H.-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing.
- Wechsler, S.P., Kroll, C.N. (2006). Quantifying DEM Uncertainty and its Effect on Topographic Parameters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 1081-1090.
- Weisberg, D. E. (2008). *Engineering Design Revolution*. Cyon Research. Dostupné na: <http://www.cadhistory.net>.
- Weisstein, E. W. (2009a). *Exponential integral*. MathWorld--A Wolfram Web Resource. Dostupné na: <http://mathworld.wolfram.com/ExponentialIntegral.html>.
- Weisstein, E. W. (2009b). *Surface*. MathWorld--A Wolfram Web Resource. Dostupné na: <http://mathworld.wolfram.com/Surface.html>.
- Wilson, J. P., Gallant, J. C. (2000). *Terrain analysis : principles and applications*, Wiley, New York. 479 s.
- Wise, S. (1998). Digital terrain models - traps for the unwary. In *Proceedings of the 3rd International Conference on GeoComputation '98*. University of Bristol, UK, pp. 1-18.
- Wise, S. (2008). The Accuracy of Gridded Digital Elevation Models Interpolated to Higher Resolution. In Lambrick, D. (Ed.) *Proceedings from the GIS Research UK 2008 16th Annual Conference*, Manchester Metropolitan University, pp. 150-155.
- Wood, J. (1996). *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. University of Leicester. PhD thesis. <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd> Leicester.
- Wood, J. (2008): Overview of Software Packages Used in Geomorphometry. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (eds.), 2008, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33, Elsevier, 257-267.

- Wood, J., Fisher, P. (1993). Assessing interpolation accuracy in elevation models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 13(2), 48-56.
- Wysocki, D.A., Hooper, P.S. (1995). *Real time three dimensional geo-referenced digital orthophotograph-based positioning, navigation, collision avoidance and decision support system*. Google Patents. <https://www.google.com/patents/US5381338>
- Yao, J., Li, J., Summers, R. M. (2009). Employing topographical height map in colonic polyp measurement and false positive reduction. Pattern Recognition. Digital Image Processing and Pattern Recognition Techniques for the Detection of Cancer, *Journal of Pattern Recognition*, 42, 1029-1040.
- Zhou, Q., Lees, B. and Tang, G.-a. (Eds.) (2008). *Advances in Digital Terrain Analysis*, Springer. 462 s.

DIGITÁLNE MODELOVANIE RELIÉFU V OPEN-SOURCE GIS

Vysokoškolské učebné texty

Autor: Mgr. Michal Gallay, PhD.

Vydavateľ: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Miesto vydania: Košice

Rok vydania: 2015

Náklad: 200 ks

Rozsah strán: 84

Rozsah: 7 AH

Vydanie: prvé

Tlač: EQUILIBRIA, s.r.o.

Účelová publikácia, nepredajná.

ISBN 978-80-8152-289-5