

DIGITÁLNE VÝŠKOVÉ DÁTA PRE MODELOVANIE POVODNÍ: HODNOTENIE PRESNOSTI DMR**DIGITAL ELEVATION DATA FOR FLOOD MODELING: ACCURACY ASSESSMENT OF DEM**

Ing. Michal Podhorányi¹, Ing. Mgr. Ivan Mudroň¹, Doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D.², Ing. Peter Bobál¹,
Ing. Mgr. Jozef Richnavský¹, Ing. Martin Ďuricha¹, RNDr. Ing. Boris Šír¹, Ing. Juraj Cirbus¹, Ing.
Branislav Devečka¹, Ing. Ondřej Malek², Ing. Petr Vavroš¹, Mgr. Vladimír Těthal¹, Ing. Veronika
Říhová², Ing. Mgr. Michaela Hořínková¹, Mgr. Vladimíra Haplová¹, Bc. Marie Vyležíková²,

¹Institut geoinformatiky, Hornicko-geologická fakulta, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15,
708 33 Ostrava-Poruba, ČR

{*michaela.horinkova, sir.boris, michal.podhoranyi, vladimira.kolarova, vladimir.tethal, branislav.devecka,*
peter.bobal, martin.duricha, jozef.richnavsky, petr.vavros, ivan.mudron, juraj.cirbus}@vsb.cz

²Institut geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta,
VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15,
708 33 Ostrava-Poruba, ČR

{*jan.unucka, veronika.rihova, ondrej.malek, marie.vylezikova.stj*}@vsb.cz

Abstrakt

Účinným prostriedkom pre rozhodovanie, plánovanie a manažment protipovodňovej ochrany sú mapy inundačných území, ktoré sú vytvorené na základe výsledkov hydrodynamických modelov. Môžu prinášať informácie o rozsahu záplavy pre rôzne návrhové povodne alebo povodňové scenáre. Miera korektnosti získaných informácií však kolíše s presnosťou vstupných dát. Vstupné dáta sú základným kameňom každej simulácie a preto im spracovateľ musí venovať významnú pozornosť. Hydrodynamické modely vykazujú výraznú citlivosť na vstupné dáta a už pri minimálnych nepresnostiach sa vo výsledkoch zobrazujú veľké nepresnosti. Práve vstupnými dátami a ich významom pre modelovanie povodní sa bude zaoberať nasledujúci príspevok. Základnými a zároveň najdôležitejšími metódami zberu údajov pre modelovanie povodní sú fotogrametria, interferometria a laserové skenovanie známe aj pod skratkou LIDAR. Každá z metód má svoje klady a zápory z pohľadu dát, ktoré sa prostredníctvom nich dajú získať. Primárnym a najčastejším výstupom všetkých spomínaných metód je digitálny model reliéfu (DMR), ktorý je základným podkladom pre každú simuláciu povodňovej aktivity. Práve tomuto aspektu vstupných dát sa bude venovať väčšina príspevku. Digitálny model reliéfu a jeho presnosť je najdôležitejším krokom pre úspešné a presné modelovanie povodňových scenárov, a preto vybratie najvhodnejšej metódy pre jeho tvorbu a zminimalizovanie potenciálnych chýb pri jeho tvorbe je veľmi dôležitým krokom.

Kľúčové slová: DMR, chyby DMR, hodnotenie presnosti

Abstract

The maps of inundation areas, which have been created using the results of hydrological modeling, are an effective tool and support for decision, planning and managing the flood protection. They are carrying the information about spatial extend of variously modeled proposed floods. The precision of the result depends on the input data. So input data is becoming as the basis for all simulations more important and therefore has to be taken a big emphasis on data collection. Hydrodynamic models are sensitive to input data and just the small deviations from the true state of nature are giving greater incorrectness in results. This contribution deals with input data and its importance for flood modeling. Photogrametry, interferometry and laser scanning (also known as LIDAR) are the most common and important ways of data gathering. All of them have some pros and cons. The result of gathered data is merely presented as a digital model of terrain (DMT), which is the basic condition for every single flood simulation. Generally said, the most important step of making a flood simulation is the creation of a correct

and accurate DMT. Choosing the right method and minimizing the errors of DMT generation have a significant place and can't be skipped.

Keywords: DEM, DEM errors, accuracy assessment

ÚVOD

Účinným prostriedkom pre rozhodovanie, plánovanie a manažment protipovodňovej ochrany sú analýzy inundačných území, ktoré sú vytvorené na základe výsledkov simulácií v hydrodynamických modeloch. Tieto analýzy môžu prinášať informácie o rozsahu záplavy pre rôzne návrhové povodne alebo povodňové scenáre. Miera korektnosti získaných informácií však kolíše s presnosťou vstupných dát. Vstupné dáta sú preto základným kameňom každej simulácie, a preto im spracovateľ musí venovať významnú pozornosť. Hydrodynamické modely vykazujú výraznú citlivosť na vstupné dáta a už pri minimálnych nepresnostiach sa vo výsledkoch zobrazujú veľké nepresnosti.

Základnými a zároveň najdôležitejšími metódami zberu údajov pre modelovanie povodní sú fotogrametria, interferometria a laserové skenovanie známe aj pod skratkou LIDAR. Každá z metód má svoje klady a zápory z pohľadu dát, ktoré sa prostredníctvom nich dajú získať. Primárnym a najčastejším výstupom všetkých spomínaných metód je digitálny model reliéfu (DMR), ktorý je základným podkladom pre každú simuláciu povodňovej aktivity, a práve tomuto aspektu vstupných dát sa bude venovať väčšina príspevku. Digitálny model reliéfu a jeho presnosť je najdôležitejším krokom pre úspešné a presné modelovanie povodňových scenárov, a preto vyhodnotenie kvality presnosti a zminimalizovanie potenciálnych chýb pri jeho tvorbe je veľmi dôležitým krokom.

Cieľom celého príspevku je popísať základné metodiky spojené s vyhodnotením kvality DMR, tak z pohľadu vizuálnej ako aj štatistickej a ukázať niektoré z nich na skutočnom príklade.

SÚČASNÝ STAV

Problematikou vstupných dát a to nielen na úrovni analýz týkajúcich sa povodní sa zaoberá čoraz viac príspevkov. Z nich väčšina rozoberá neistoty spojené z asi najviac používaným dátovým vstupom, a to digitálnym modelom reliéfu. Kvalitný digitálny model reliéfu tvorí základ kvalitnej a presnej analýzy, a preto zhodnotenie jeho kvality by malo byť súčasťou každého príspevku, ktorý ho využíva. Hodnotiť kvalitu vstupného DMR sa dá z dvoch hľadísk, a to po vizuálnej a štatistickej stránke. Vizuálnym hodnotením sa oproti tej štatistickej zaoberá podstatne menej štúdií a ani jednotlivé štandardy (USGS) neposkytujú prehľad o jej hodnotení. Jedna z prác, ktorá sa zaoberá komplexne vizuálnym hodnotením DMR je článok od autora Podobnikar (2009) uverejnený v časopise Sapiens (Surveys and Perspectives Integrating Environment & Society), kde rozlišuje prístupy hodnotenia DMR na jedno a viac súborové.

Štatistickým hodnotením DMR sa zaoberá celý rad nielen článkov, ale aj monografií. Monografia, ktorá poskytuje celkový prehľad o možnostiach vyhodnotenia DMR, možných chybách a ich odstránení bola napísaná autormi Li, Zhu, Gold (2005) – Digital Terrain Modeling – Principles and Methodology. Pokročilými metódami vyhodnotenia DMR a to hlavne sklonov sa zaoberá monografia od autora Zhou et.al. (2008). Čiastkové problémy ako vyhodnotenie výškovej chyby (Gao a kol., 2006), polohovej chyby (dokument FGDC, 1999) resp. chyby sklonov (Barringer a Lillburne, 2009) a orientácií (Zhou a Liu, 2008) sú v príspevkoch spomínané v závislosti od konkrétnej analýzy.

Kombináciou vplyvu resp. citlivosťou vstupných dát na výsledky analýz spojených s povodňovou aktivitou sa zaoberá o.i. hlavne autor Prof. Paul D. Bates, Ph.D. (School of Geographical Sciences, Univerzita Bristol), ktorý vo svojich viacerých príspevkoch popisuje neistoty používania rôznych vstupných dát a ich dopadov pri

modelovaní povodní (2000, 2003). Citlivosťou hydrodynamických modelov na vstupné dáta a vyhodnocovaním chýb sa čiastočne zaoberá monografia kolektívu autorov Elevation Data for Floodplain Mapping (2007), kde sú spísané jednotlivé možnosti vstupných dát v spojení s ich problematickými spôsobmi spracovania. Autori v stručnosti načrtli problematické miesta pri celkovom spracovaní a aplikovaní dát do hydrodynamických modelov.

Journal of Hydraulic Research, International Journal of River Basin Management, Environmental Modeling and Software sú periodiká, ktoré v jednotlivých svojich príspevkoch rozoberajú hlavne hydraulickú časť problematiky modelovania povodní a ide v nich hlavne o otázky citlivosti výstupov z modelov na neistoty v určovaní vstupov.

1. DIGITÁLNE MODELY RELIÉFU

Digitálne modely reliéfu sú v posledných dekádach veľmi používané geoinformačné technológie. Tieto technológie umožňujú reprezentovať reliéf terénu v prostredí geoinformačných systémov, umožňujú vytvárať rôzne analýzy a takisto umožňujú vizualizovať reliéf terénu. Zjednodušene sa dá teda povedať, že DMR je digitálnou reprezentáciou reliéfu terénu v geoinformačnom systéme. DMR sú využívané v celej rade aplikácií z oblasti vied o Zemi, životného prostredia, inžinierstva a postupne sa rozvinuli ako dôležitá metóda pre modelovanie a analýzu dát o reliéfe terénu. [15]

Myšlienka digitálnej reprezentácie reliéfu terénu v počítači sa objavuje na sklone 50 – tich rokov 20. storočia na MIT (Massachusetts Institute of Technology) v Bostone. Bol tu vytvorený program na optimalizáciu vedenia diaľnic, a tu aj vznikla prvá definícia DMR. Od týchto čias sa definícia DMR vyvíjala a postupne menila. Jednou z používaných definícií súčasnosti je napr.: *DMR je digitálna reprezentácia reliéfu terénu, zložená z dát a interpolačného algoritmu, ktorá umožňuje odvodzovať nadmorské výšky v ľubovoľných bodoch nachádzajúcich sa vo vnútri modelovanej oblasti.*[15] V oblasti definícií DMR, hoci ich je niekoľko, sú vedecké kruhy pomerne jednotné, ale čo sa týka jeho rozdelenia a terminológií, tak tu vznikajú isté rozdielnosti na úrovni zahraničných literatúr. Preto je nutné pre tento príspevok definovať zdroje termínov a definícií pre jednotlivé DMR. Príspevok čerpal zo zdroja od autora Rapant (2006), tak terminologické ako aj informácie o rozdelení DMR. Jednotlivé používané termíny s ich definíciou poskytuje tab.1.

Tab.1 Definície Digitálnych Modelov Reliéfu [15]

Dáta	Popis
DMR ,LIDAR	rozlíšenie: 5x5 m
Bodové pole nivelačných bodov	papierová forma, zdroj: ZÚ

Príspevok sa vo svojej podstate venuje vyhodnoteniu kvality DMR. Ako podkladový DMR pre vyhodnotenie si príspevok zobral digitálny model vytvorený metódou LIDAR (Light Detection and Ranging) a ako referenčné dáta boli použité nivelačné body (tab.2). Celkovo bolo použitých 22 kontrolných nivelačných bodov.

Testovací DMR (Lidar) je situovaný pri sútoku riek Olša a Stonávka, ktorý sa nachádza pri meste Karviná (celkovo zachytáva 5.9 km dlhý úsek rieky Olše a 3.2 kilometrový úsek Stonávky). Výber takto ohraničeného územia bol ovplyvnený hlavne dostupnosťou dát potrebných pre kvalitatívne vyhodnotenie.

Tab.2 Dátové zdroje

Termín	Definícia
Digitálny model reliéfu (DMR)	DMR je digitálna reprezentácia reliéfu terénu, ktorá je zložená z dát a interpolačného algoritmu, umožňujúceho odvodzovať nadmorské výšky v ľubovoľných bodoch nachádzajúcich sa vo vnútri modelovanej oblasti. DMR sa ďalej delí na DVM, DMP, DMT, DMK.
Digitálny výškový model (DVM)	Angl. DEM (Digital elevation model) Je postavený iba na bodoch, ktoré reprezentujú nadmorské výšky (nepoužíva línie ani polygóny).
Digitálny model povrchu (DMP)	Angl. DSM (Digital surface model) Pracuje s bodmi o známych nadmorských výškach. Tieto body sú rozmiestnené na povrchu reliéfu terénu i všetkých objektoch na nich sa nachádzajúcich.
Digitálny model terénu (DMT)	Angl. DTM (Digital terrain model) Pracuje so všetkými typmi geoprvkov. (body, línie, polygóny) Reprezentuje priebeh terénu, bez objektov na ňom sa nachádzajúcich.
Digitálny model krajiny (DMK)	Angl. DLM (Digital lanscape model) Vychádza z DMT alebo DVM. Do modelu sú doplnené i objekty nachádzajúce sa na povrchu, ako sú domy, stromy, cesty, pokrív a pod.

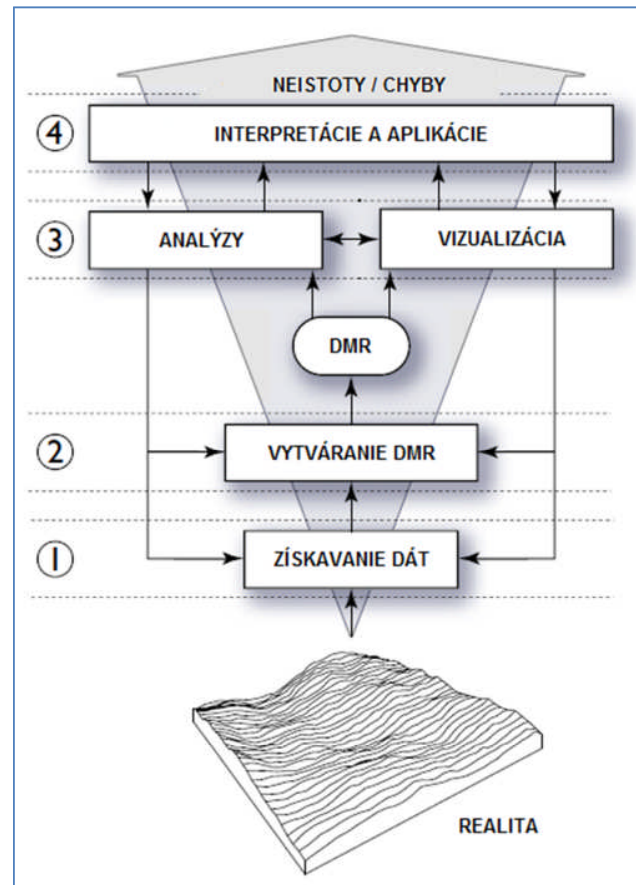
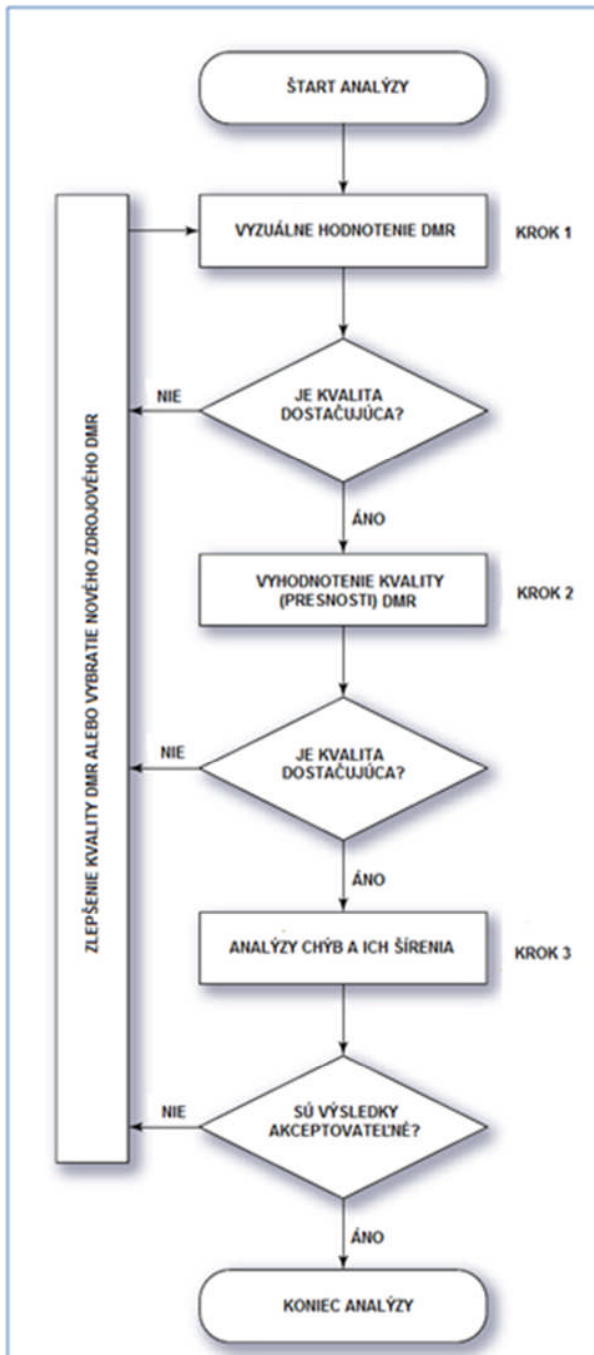
2. POSTUP HODNOTENIA KVALITY DMR

Rozhodnutie o vhodnosti dostupného DMR pre ďalšie analýzy sa vo všeobecnosti uskutočňuje v troch krokoch. Celý tento postup hodnotenia sa dá zhrnúť do schémy navrhutej na obr.1.

Prvým krokom je vizuálne hodnotenie. Týmto postupom sa dajú identifikovať hrubé chyby, ktoré musia byť pred každou terénnou analýzou odstránené. Výhodou postupu vizuálneho hodnotenia je v tom, že užívateľ nepotrebuje žiadne podporné dáta pre jeho vykonanie. Tento prístup sa dá povedať, že je rutinný a používa sa prakticky pred každou analýzou.

Druhý krok odhaľuje či DMR spĺňa požiadavky na kvalitu presnosti, ktorá bola ustanovená pred analýzou. Do tohto kroku sa zaraďujú napríklad výpočty vertikálnej a horizontálnej presnosti DMR. Najčastejšia metóda pre posúdenie týchto presností je pomocou RMS chyby, (Root Mean Square) čo je stredná kvadratická odchýlka. Znázorňuje odmocninu z priemerného štvorca odchýlky nameraných hodnôt od namodelovaných. Okrem spomínanej možnosti pre posúdenie presnosti DMR sa do tohto kroku zaraďujú aj výpočty pomocou deskriptívnej štatistiky, transformácie medzi súradnicovými systémami a globálne respektívne lokálne analýzy semivariogramov. Tento krok si však vyžaduje vstupné dáta pomocou, ktorých bude presnosť vyhodnotená. Vhodnými údajmi pre vyhodnotenie môžu byť napríklad geodeticky zamerané body, ktoré obsahujú údaje o horizontálnej a vertikálnej polohe.[12]

Tretí a posledný krok analýzy vhodnosti môže odhaliť, že neistota v podobe zavedených chýb DMR, ktorá bola odhalená v kroku dva je príliš vysoká pre danú špecifickú úlohu alebo analýzu. Tento krok sa teda zaoberá vzniknutými chybami a ich šírením.[12] K najznámejším metódam zaoberajúcimi sa chybami patrí simulácia Monte Carlo. Do tohto kroku môžeme zaradiť aj výpočty sklonov a orientácií prípadne korelačné analýzy.



Obr.1 Postup hodnotenia kvality DMR; upravené podľa [12] (vlevo)

Obr.2 Fázy budovania DMR postihované chybami; upravené podľa [12 (nahore)]

2.1 Neistoty DMR a analýzy chýb

Chyby DMR vznikajú v každej fáze tvorby od samotného zberu dát až po jeho aplikáciu v praxi (obr.2). Preto pochopenie spôsobovania chýb je veľmi dôležité.

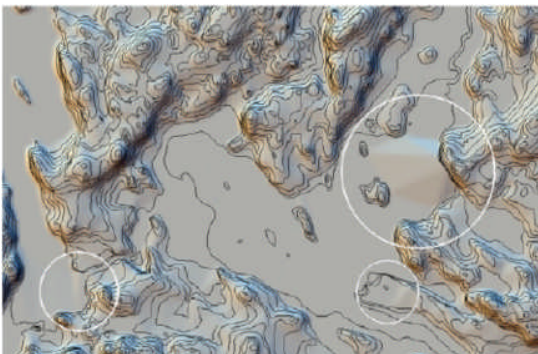
Každá fáza budovania DMR vytvára chyby, ktoré sú potom vnášané do výsledného produktu. Prvá fáza budovania pokrýva náhodné chyby a chyby spôsobené priamo človekom. Sú to chyby, ktoré sú vytvárané hlavne pri meracích zariadeniach (GPS, stereoploter alebo LIDAR). Môžu byť však spôsobované aj oblačnosťou, výškou a hustotou vegetácie, zakrivením Zeme, atmosférickou refrakciou, geometrickými transformáciami, kartografickou generalizáciou a pod. Chyby sú ďalej vytvárané aj v ďalšej fáze, ktorá sa skladá z vybranej metódy reprezentácie terénu, metód aproximácie DMR a stupňa detailu DMR (napr.: veľkosť bunky, hustota TIN bodov). Fáza tri pozostáva z neistôt spôsobených hlavne z vybraných algoritmov pre výpočet topografických atribútov. Ďalej sa v tejto fáze vnášajú chyby na úrovni

analýz alebo na základe zvolenej vizualizácie. Neistoty v poslednej fáze vnáša hlavne interakcia medzi človekom a počítačom, ktorá môže rezultovať do zlej interpretácie dosiahnutých výsledkov.[12]

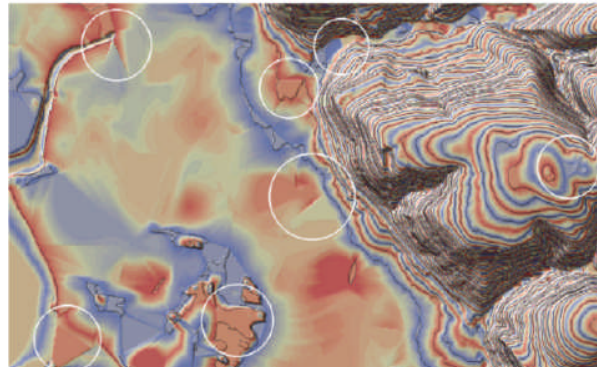
2.2 Typy chýb v dátach DMR

DMR dáta obsahujú chyby troch typov: hrubé, ktoré musia byť odstránené pred vstupom do prípadnej geodatabázy; systematické chyby, ktoré majú v sebe určitý vzor pre opakovanie a náhodné chyby, ktoré sú čisto náhodného charakteru a sú úplne nepredvídateľné. Hoci rozsah všetkých troch typov chýb môže byť vo výslednom DMR znížený, nemôžu byť úplne odstránené.

Hrubé chyby sú chyby, ktoré vykazujú veľké rozdiely medzi očakávanou a nameranou hodnotou. Pre dáta DMR, hrubá chyba môže byť vertikálna chyba, ktorá má veľké proporcie a často prekračuje maximálnu povolenú absolútnu chybu (pri štandarde USGS je to 3 sigma). [20] Okrem toho, hrubá chyba, je známkou toho, že proces zhromažďovania dát sa zhoršil nad úroveň jednoduchých systematických alebo náhodných chýb. Hrubé chyby sú ľahko identifikovateľné už pri vizuálnom hodnotení (obr.3,4) a všetky musia byť z DMR odstránené. Chyby tohto typu sa často odstraňujú napríklad pomocou nízkofrekvenčných filtrov, ktoré prepúšťajú iba nízkofrekvenčnú informáciu (hrubé chyby sú vysokofrekvenčné informácie). Hrubé chyby vznikajú často pri mapovaní, kedy je hlavný faktor ľudská nepozornosť. Ďalšie dôvody vzniku chýb môže byť chybné zvolená interpolácia (napr. môžu vzniknúť fantómové vrstevnice) alebo pri výbere nesprávnej hustoty bodov pri triangulácii.



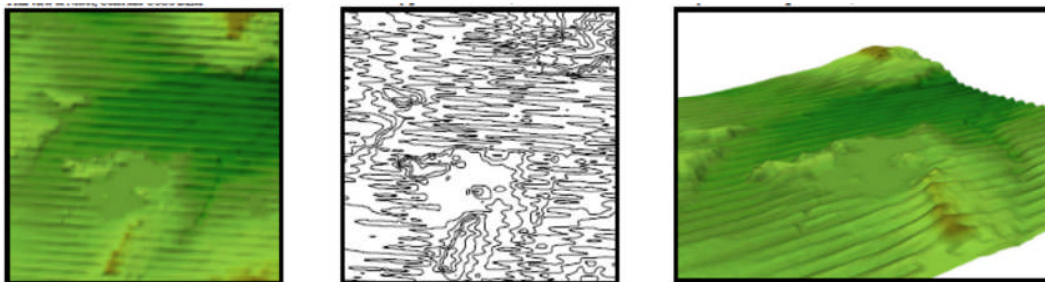
Obr. 3 Príklad vizuálneho detekovania hrubých chýb pomocou zobrazenia DMR v podobe tieňovaného reliéfu (hrubé chyby sú v bielom krúžku) [11]



Obr. 4 Hrubé chyby vzniknuté pri triangulácii (detekované hrubé chyby sú v bielom krúžku) [11]

Náhodné chyby sú tie, ktoré zostali po odstránení hrubých a systematických chýb. Vyplývajú z náhodnej a neznámej kombinácie príčin mimo kontroly pozorovateľa. Náhodná chyba je teda chyba, ktorá je jednoducho nepredvídateľná. Často krát sa nedá zistiť, čo spôsobilo zdroj chyby. Aj tieto chyby môžu však spôsobiť, že výsledky sú nepresné. Sú teda spôsobované neznámymi a nepredvídateľnými zmenami, ktoré môžu nastať pri meraniach prístrojoch alebo v podmienkach prostredia.

Systematické chyby sú tie chyby, ktoré dodržiavajú nejaký pevne stanovený vzor alebo pravidlo a sú všeobecne konštantnej veľkosti. Sú zvyčajne predvídateľné a odstraňujú sa korekciami. Typickým príkladom systematickej chyby pri DMR je vertikálny posun.[20] Systematické chyby môžu byť odstránené alebo podstatne znížené, keď je príčina známa. Často sa vyskytujú pri automatizovanom prístupe zberu dát pretože každé zariadenie má svoje obmedzenia a prvok systematickej chyby. Príkladom z praxe môže slúžiť systematická chyba, ktorá bola vytvorená na DMR USGS. Jednalo sa o problém páskovania (sú to vlastne chrbty idúce po sebe, v smere väčšinou východ – západ), ktorý bol spôsobený zlou kalibráciou detektorov. Pre odstránenie páskovania bola použitá diskretná Fourierova transformácia, ktorou možno dekomponovať vstupný signál na frekvenčné zložky. Tieto sú vyjadrené komplexnými číslami, ktoré zachytávajú nielen amplitúdu (veľkosť prvku), ale aj fázu vlnenia danej frekvencie (vyjadrenej ako arkus tangens podielu reálnej a imaginárnej zložky prvku).[16]



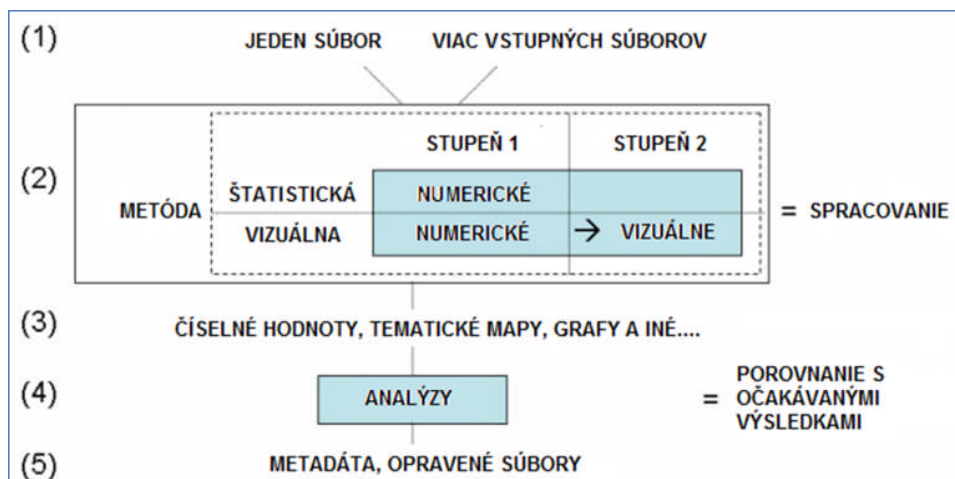
Obr.5 Problém páskovania – systematická chyba, DMR – USGS [16]

2.3 Hlavné štandardy pre hodnotenie kvality DMR

Väčšina štandardov pre hodnotenie DMR zahŕňa niekoľko kvalitatívnych požiadaviek. Vizúálne hodnotenie DMR je prakticky vo všetkých štandardoch opomenuté, a len zriedka sa objavuje jeho popis. Určitá úroveň štandardizácie je poskytovaná USGS (The United States Geological Survey) a National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), ktorá vyvinula Digital Terrain Elevation Data (DTED) ako štandardy pre DMR.

EuroGeographics10 v súčasnosti pripravuje európsku sieť tzv. EuroDEM11. Vzhľadom k tomu, že DMR sú vyrobené z rôznych národných DMR, dôležitá časť tohto projektu spočíva v normalizačných a harmonizačných technikách, ktoré musia počítať z rôznymi súradnicovými systémami, rozlíšeniami a presnosťami.

Navrhovaný postup pre posudzovanie kvality údajov, najmä z DMR, sa skladá z nasledujúcich krokov (obr.6)[14]: (1) príprava dátových súborov, (2) spracovanie pomocou štatistických metód prípadne vizuálne, (3) získanie výsledkov: tematické mapy, grafy, číselná podoba atď.... (4) analýza (porovnanie s očakávanými výsledkami) (5) získanie metadát alebo opravených súborov.



Obr.6 Navrhovaný postup pre posudzovanie kvality údajov; upravené podľa [14]

2.4 Príprava dátového súboru

Postup na posúdenie kvality je založený predovšetkým na jedno (S_1) alebo viac súborovom (S_n) prístupe.[14] V prípade jedno súborovej možnosti je testovaný iba samotný DMR, zatiaľ čo pri viac - súborom sa testujú DMR plus ďalšie (nezávislé) referenčné súbory. Referenčné súbory môžu mať súborový typ napr. bod príp. línia. Základným kritériom pre výber vhodných referenčných dát je ich kvalita. Referenčné údaje by mali byť reprezentatívne (dostatočné množstvo), mali by mať určitý stupeň pravidelnosti a význam s ohľadom na celú oblasť. Tieto metódy nie sú vhodné pre oblasti, kde dostupnosť referenčných dátových súborov je veľmi nízka.

2.4.1 Štatistické hodnotenie S_1 a S_n

Jedno - súborové (S_1): Pre hodnotenie kvality DMR môžeme za relevantné považovať nasledujúce štatistiky: aritmetický priemer výšok a sklonov, smerodajnú odchýlku σ , rozsah (minimum/maximum), korelačné analýzy (Lee and Marion, 1994), kovariančné funkcie pre výšky, sklony, a objemy (Östman, 1987).

Analyzovať odhadovanú neistotu vo výškových dátach sa dá resp. sa používa metóda Monte Carlo. Je to metóda odhadu založená na štatistickej eliminácii dát, ktoré dostatočne nekorelujú so zadaným prahom. (Kraus and Pfeifer, 1998). Presnosť môže byť tiež odhadnutá vzhľadom na hustotu pôvodných dát a miestnom zakrivení terénu (Kraus et al., 2004).

Viac – súborové (S_n): Medzi možné spôsoby hodnotenia DMR s referenčnými dátami môžeme zaradiť: výpočet strednej chyby, (indikátor pre systematickú chybu), stredná kvadratická chyba (RMSE) (indikátor pre náhodné chyby pokiaľ boli systematické odstránené), rozsah (minimum / maximum), a ďalšie. Navyše ďalšie testy sú odporúčané ako napríklad: regresie, histogrami prípadne objemové rozdiely.

3. PRÍSTUPY HODNOTENIA PRESNOSTI DMR

Povrch DMR je 3-D resp. 2,5-D zobrazenie terénu pričom v každom z týchto rozmerov sú obsiahnuté chyby (X,Y,Z súradnice). Dve súradnice z nich (X a Y) vo svojej kombinácii udávajú polohopisnú chybu a súradnica Z udáva výškovú chybu. Významnosť všetkých týchto chýb je nutné hodnotiť z dôvodu ich neskoršieho výrazného vplyvu na výsledky. Hodnotenie presnosti DMR je možné vykonávať v dvoch rôznych režimoch: [9]

- Polohopisná a výšková presnosť môže byť posudzovaná samostatne
- Polohopisná a výšková presnosť môžu byť hodnotené súčasne

Všeobecne sú zaužívané štyri prístupy k posudzovaniu presnosti DMR:[9]

- Predikcia vychádzajúca z použitých metód a postupov merania a tvorby DMR: hodnotia sa chyby vnášané jednotlivými fázami tvorby DMR (od vstupných dát cez prevzorkovanie atď); výsledná chyba je daná kumuláciou jednotlivých chýb.
- Odhad chýb na základe charakteristík oblasti: základom je predpoklad, že na vstupe sú vrstevnice; ich vertikálna presnosť je závislá na priemernom sklone terénu v tejto oblasti.
- Ohodnotenie kartometrickým testovaním: potrebujeme sadu kontrolných bodov; ich skutočné výšky porovnáваме s hodnotami z modelu.
- Ohodnotenie pomocou diagnostických bodov: zo zdrojových materiálov sú získané sady diagnostických bodov, ktoré neboli použité pre generovanie DMR; iba pre testovanie.

Na základe dostupných dát a celkovom rozsahu testovania kvality DMR sa pre tento príspevok použila metóda kartometrickým testovaním.

Celková chyba, ktorá sa hodnotí však nevzniká iba vplyvom jedného faktoru, ale je ovplyvnená množstvom faktorov, ktoré vstupujú do tvorby DMR a je iba na užívateľovi, aby šíreniu resp. zhoršovaniu chýb zabraňoval čo možno v najväčšej miere. Presnosť DMR môžeme charakterizovať ako funkciu počtu premenných ako je drsnosť povrchu, interpolačné funkcie, interpolačné metódy a tri atribúty (presnosť, hustota, distribúcia) zdrojových dát . Všetky tieto faktory majú vplyv na celkovú presnosť výsledného DMR. Matematicky môžeme dané faktory vyjadriť nasledovne [9]:

$$A_{DMR} = f (C_{DMR}, M_{modelovanie}, R_{terén}, A_{dáta}, D_{dáta}, DN_{dáta}, O) \quad (3.1)$$

, kde A_{DMR} je celková presnosť DMR; C_{DMR} charakterizuje povrchy obsiahnuté v DMR; $M_{modelovanie}$ je metóda, ktorá bola použitá pre modelovanie DMR; $R_{terén}$ je drsnosť terénu v rámci analyzovaného DMR;

$A_{dáta}$, $D_{dáta}$, $DN_{dáta}$ reprezentujú tri atribúty (presnosť, distribúcia a hustota) zdrojových dát pre tvorbu DMR; O reprezentuje ďalšie faktory, ktoré môžu ovplyvniť výslednú presnosť.

Drsnosť ($R_{terén}$) terénu určuje zložitosť reprezentácie DMR. Keď je terén jednoduchý tak stačí zozbierať iba pár bodov, aby sme ho zrekonštruovali. Napríklad ak je terén plochý tak potrebujem iba tri body na vymodelovanie tejto časti. Ak je terén však zložitejší tak potrebujeme pochopiteľne viac bodov.

DMR povrch môžeme modelovať dvomi spôsobmi ($M_{modelovanie}$):

- Priama metóda – priamo z nameraných dát
- Nepriama metóda – je vyhotovený z gridových dát, ktoré sú interpolované (presnejšia je však prvá metóda pretože pri interpolácii dochádza ku strate presnosti)

Tri atribúty ako presnosť, distribúcia a hustota ($A_{dáta}$, $D_{dáta}$, $DN_{dáta}$) majú tiež veľký vplyv na finálny DMR pretože ak je veľa bodov v hladkých územiach a pár bodov v zložitom teréne, tak potom výsledky nie sú uspokojivé a dochádza k výrazným nárastom chýb, tak v polohovej ako aj výškovej presnosti.

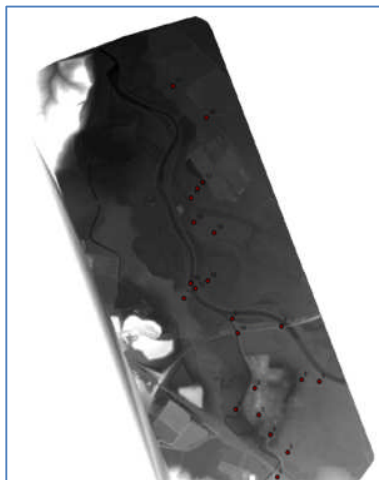
Trochu iná situácia čo sa týka presnosti nastáva, keď vstupné údaje nie sú namerané body, ale vrstevnice. Presnosť vrstevníc je najviac postihovaná presnosťou digitizéra, kvalitou originálnej mapy a presnosťou merania. Presnosť vrstevníc môžeme opäť matematicky zapísať a to v podobe:

$$m_c = m_h + m_p \times \tan \alpha \quad (3.2)$$

, kde m_h je presnosť výškového merania; m_p je planimetrická presnosť vrstevnicovej čiary; α je uhol sklonu terénu; m_c je celková výšková presnosť vrstevníc.

3.1 Test výškovej a polohovej presnosti DMR

Pre test výškovej a polohovej presnosti bolo použitých celkovo 22 nezávislých bodov (obr. 8). Tieto body boli pre test získané z bodového nivelačného poľa Zememeračského úradu ČR (Triangulačný List 3601). Bodové pole je voľne dostupné v podobe záznamov, ktoré zobrazuje príslušné informácie o zameranom bode (súradnice JTSK, nadmorská výška). Na selekciu jednotlivých bodov nemala vplyv nadmorská výška ani rozloženie reliéfu. Do výpočtu boli zaradené všetky body, ktoré spadali do skúmaného územia (obr. 7). Rozloženie bodov pre testy podobného typu nebola veľmi vhodná, pretože drvivá väčšina bodov sa nachádza v strede, a len málo na okraji študovaného územia.



Obr.7 DMR – LIDAR a 22 nivelačných bodov

č. bodu	Nivelačný bod (m)	DMR (m)	rozdiel (m)
1	227.167	224.737	2.43
2	228.831	227.867	0.964
3	230.302	227.61	2.692
4	230.104	225.542	4.562
5	231.556	229.764	1.792
6	230.93	234.021	-3.091
7	228.113	227.558	0.555
8	228.909	226.192	2.717
9	229.021	227.894	1.127
10	222.337	221.657	0.68
11	220.918	220.221	0.697
12	221.297	219.789	1.508
13	220.889	220.415	0.474
14	225.19	225.618	-0.428
15	222.003	221.835	0.168
16	221.322	219.25	2.072
17	224.677	224.098	0.579
18	223.167	222.616	0.551
19	222.123	220.095	2.028

Obr. 8 Porovnanie výšok realita / DMR

3.1.1 Test výškovej presnosti

Pre testy výškovej presnosti sa najčastejšie používajú RMS chyby, (Root Mean Square) čo je stredná kvadratická odchýlka. Znárodňuje odmocninu z priemerného štvorca odchýlky nameraných hodnôt od namodelovaných. Do vzorca RMS sa ako modelová situácia zadáva hodnota výšky pre danú bunku, pre jednotlivé rastre a ako skutočná hodnota sa zadáva výška geodeticky zameraných bodov (nivelačné body).[1]

$$RMSE_{DMR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{Ri} - E_{DMRi})^2}{N}} \quad (3.3)$$

, kde

E_{Ri} - označuje skutočnú výšku (geodeticky zameranú)

E_{DMRi} - označuje výšku na DMR

N - celkový počet použitých bodov

Podľa autora Li (1988) je určitou alternatívou štandardná chyba S a priemerná chyba \bar{d} .

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}} \quad (3.4)$$

, kde

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

$$d_i = z_{skutočná výška} - z_{DMR}$$

Okrem vyššie spomínaných štatistík sa používajú pre dotvorenie prehľadu o vertikálnej presnosti výsledného DMR aj nasledujúce charakteristiky:[9]

- Extrémne hodnoty (e_{max} a e_{min})
- Modus (najpravdepodobnejšia hodnota)
- Medián (centrum najväčšej frekvencie)
- Vážený priemer (matematická pravdepodobnosť)
- Meranie rozptylu (charakteristiky ako rozsah, smerodajná odchýlka atď)

Rozsah:

$$R = e_{max} - e_{min} \quad (3.5)$$

Používanie rozsahu je však veľmi problematické pretože dáva veľmi skresľujúce výsledky a to hlavne z dvoch dôvodov. Prvým je závislosť iba na dvoch hodnotách, pričom ostatné sú ignorované a druhým je, že pravdepodobnosť hodnôt $e(x,y)$ je tiež zanedbaná.

Smerodajná odchýlka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (e - \mu)^2}{N - 1}} \quad (3.6)$$

3.1.2 Test polohovej presnosti

Podobne ako je tomu pri vertikálnej chybe, tak i polohová presnosť sa vyjadruje pomocou RMS chyby. Avšak zložitosť tohto výpočtu je podstatne vyššia ako je to u vertikálnej presnosti, a preto je ťažké uviesť tieto prístupy do praxe. To je možno dôvod, prečo je otázka presnosti polohopisu zriedka riešená. Ani štandard USGS nerieši polohovú presnosť. DMR od USGS sú podľa štandardu umiestnené na presne matematicky definovanej pozícii v UTM metroch alebo arc sekundách. Mriežky sú fixované v polohe a môžu byť považované za konštanty pre účel určenia presnosti.[20]

Polohovou presnosťou sa zaoberá dokument vydaný FGDC (Federal Geographic Data Committee). Tento štandard vychádza ako už bolo vyššie spomínané z RMS chyby:

$$RMSE_x = \sqrt{\sum (x_{dáta,i} - x_{NZ,i})^2 / n} \quad (3.7)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\sum (y_{dáta,i} - y_{NZ,i})^2 / n} \quad (3.8)$$

, kde

$x_{dáta,i}, y_{dáta,i}$ - súradnice i - teho bodu z testovacích dát

$x_{NZ,i}, y_{NZ,i}$ - súradnice i - teho bodu z nezávislého zdroja dát z vysokou presnosťou

n - je počet testovacích bodov

Horizontálna chyba na i - tom bode je potom definovaná ako:

$$\sqrt{(x_{dáta,i} - x_{NZ,i})^2 + (y_{dáta,i} - y_{NZ,i})^2} \quad (3.9)$$

Horizontálna RMS chyba je:

$$RMSE_r = \sqrt{(x_{dáta,i} - x_{NZ,i})^2 + (y_{dáta,i} - y_{NZ,i})^2} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (3.10)$$

4. ZÁVER

Posúdenie použiteľnosti konkrétneho DMR pre vybranú analýzu na základe vyššie spomínaných metód hodnotenia sa dá len čiastočne pretože každá metóda zohľadňuje len určitú časť chýb, ktoré sa môžu na DMR vyskytnúť. Prijateľný prístup je kombinovať čo najviac metód, aby sa prípadné chyby mohli buď zminimalizovať prípadne úplne odstrániť. Keby sme sa napríklad chceli riadiť iba podľa základnej štatistiky (tab. 3), tak RMS chyba, ktorá je často uvádzaná viacerými výrobcami a spracovateľmi ako relevantný údaj pre posúdenie kvality, tak s hodnotou 1.946 m by sme mali predstavu, že náš DMR je v porovnaní s ostatnými používanými DMR rôznych mapovacích agentúr (tab. 4) veľmi presný, a tým pádom je použiteľný pre všetky analýzy. Nie je tomu úplne tak pretože RMS chyba zohľadňuje hlavne výškovú chybu a aj to iba v rámci bunky rastra, v ktorej sa nachádza. Tým pádom aj rozlíšenie má výrazný vplyv. RMS chyba napríklad neposkytuje informácie o tvarovej presnosti terénu, čo je dôležité hlavne pre hydrologické modelovanie a zahrňuje obe chyby, tak náhodné ako systematické. Kvalitatívne hodnotenie každého DMR by malo teda obsahovať testy pre výškovú a polohovú presnosť, metódy pre detekciu všetkých druhov chýb a takisto testy pre tvarovú presnosť reliéfu. Zahnúť všetky testy je hlavne pre väčšie územia veľmi časovo náročné, a preto v niektorých prípadoch neostáva nič iné iba sa obmedziť na určitú oblasť testovania.

Tab.3 Štatistické vyhodnotenie DMR (Lidar) - údaje sú v metroch

Štatistické vyhodnotenie DMR (viac – súborový prístup)				
RMS chyba	štandardná od.	priemerná chyba	štandardná chyba	min. / max. chyba
1.946	1.538	1.529	1.558	0.114 / 4.562

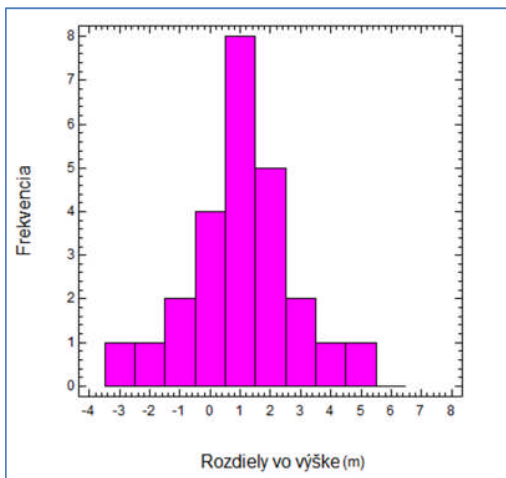
Ďalší problém, ktorý vzniká už priamo pri ďalšom spracovaní už vzniknutého DMR je šírenie chýb. Je hlavne na užívateľovi, aby pri konkrétnych metódach spracovania DMR si vybral také postupy, aby nezhoršoval výškovú resp. polohovú presnosť. Príkladom môže slúžiť prevzorkovanie rastra, pri ktorom sa používajú tri základné metódy (metóda najbližšieho suseda, bilinéarna interpolácia, kubická konvolúcia) a každá z nich v inej miere znehodnocuje výškovú presnosť, preto analýza každej metódy by bola vhodným doplnkom pre zminimalizovanie šírenia chýb.

Tab.4 Presnosti DMR v svetových mapovacích agenturách [11]

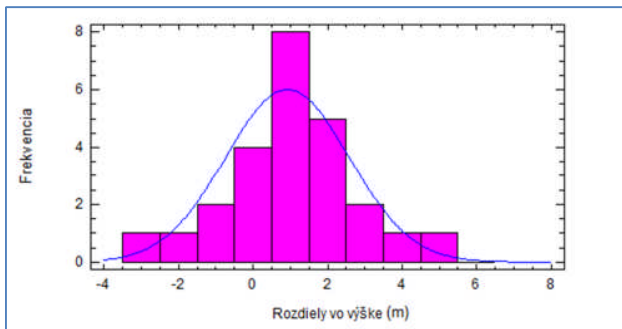
Mapovacia agentúra	Presnosti DMR
National Land Survey of Finland (Fínsko)	Priemerná presnosť pre celú krajinu je 1.76 m, smerodajná odchýlka je 1.39 m.
National Land Survey of Sweden (Švédsko)	Štandardná chyba vo výškach je 2.5 m.
Ordnance Survey (Veľká Británia)	Výšková presnosť každého bodu DMR je rovnaká alebo lepšia ako polovica intervalu vrstevníc, z ktorých bol robený (+ / - 2.5 m chyba pre interval 5 m vrstevníc).
Swisstopo – Federal Office of Topography (Švajčiarsko)	Priemerná presnosť – 1.5 m (Swiss Plateau), 2 m (Ticino), 3 m (Alpy)

Charakteristiky uvádzané v tab.3 by však mali byť doplnené o štatistické metódy, ktoré poukazujú na rozdelenie spracovávaných údajov. Používané sú histogramy, regresie alebo krabicové grafy. Krabicové grafy sú užitočné pre grafické vyjadrenie tvaru rozdelenia, jeho strednej hodnoty a variability. Stredná čiara v krabici predstavuje medián. Hranice krabice potom predstavujú 1. a 3. kvartil. Oblasť medzi 1. a 3. kvartilom sa označuje ako interkvartilový interval (IQR). Extrémne hodnoty (1.5 násobok IQR) predstavujú koncové úsečky. Body, ktoré sa nachádzajú vo väčšej vzdialenosti než 1.5 násobok IQR od mediánu sú zobrazené v podobe štvorčekov (odľahlé hodnoty) (obr. 11). Podľa výškových rozdielov (rozdiel realita / model) získaných z DMR krabicový graf vykazuje dve odľahlé hodnoty, ktoré by mohli naznačovať výraznejšiu chybu (- 3.091, 4.562). Medián sa pohybuje na úrovni 0.9 a interkvartilový interval od 0.7 po 2.

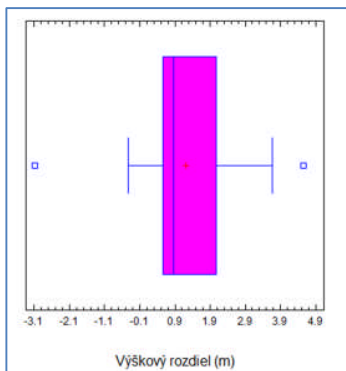
Očakávaným výsledkom je, že distribúcia chýb v DMR má normálne rozdelenie. Normálne rozdelenie je také rozdelenie početností, že väčšina hodnôt sa grupuje okolo strednej hodnoty a histogram početností vyzerá ako "zvonovitá krivka" vid' obrázok 9 a 10. Pre lepšie pochopenie celkovej distribúcie chýb je vhodné zaznamenávať aj výskyt veľkých chýb. Obr. 9,10 ukazuje rozdelenia početností chýb v testovanom DMR.



Obr. 9 Histogram rozdielov vo výške



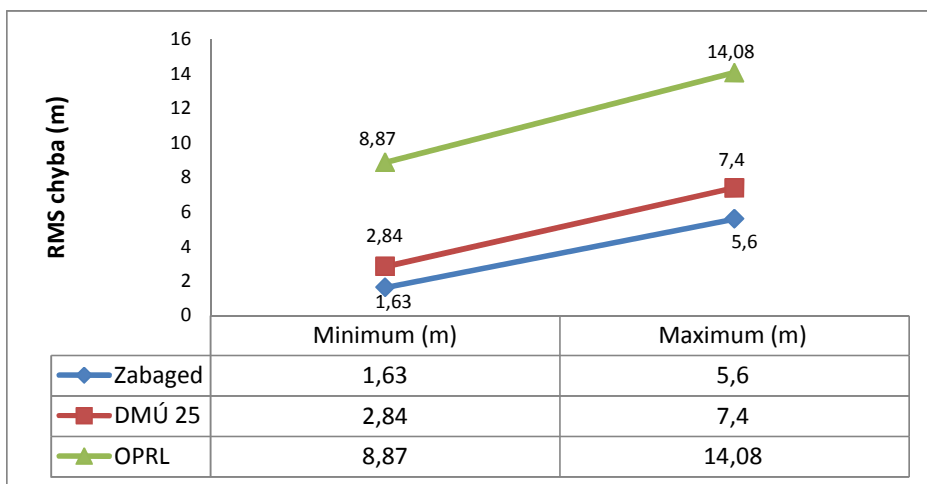
Obr. 10 Histogram rozdielov vo výške(normálne rozdelenie)



Obr. 11 Krabicový graf

Svetový štandard ako USGS rozdeľuje na základe kvality DMR do troch stupňov, pričom primárnym prvkom pre posúdenie je chyba RMS. USGS vyčleňuje prvý stupeň ako: Vertikálna RMSE = 7 metrov alebo menej je štandardnou požadovanou presnosťou. RMSE = 15 metrov je maximálna povolená. Druhý stupeň: vstup vrstevnice; RMSE 1/2 intervalu vrstevnice je maximálne povolená. Nemôže však obsahovať chyby väčšie ako jeden interval vrstevníc. Tretí stupeň: vstup vrstevnice; RMSE 1/3 intervalu vrstevníc je maximálne povolená. Nemôže obsahovať chyby väčšie ako 2/3 intervalu vrstevníc. Keby sme sa riadili iba týmto štandardom, tak ako ukazuje graf.1 ,tak z digitálnych dát, ktoré sú často používané pre rôzne analýzy v ČR by kvalitatívne prešiel iba Zabaged. (testovaný DMR by s údajom 1.946 m bol zaradený na prvý stupeň)

Graf 1 Porovnanie RMS chyby pre často používané digitálne dáta používané v ČR (interval od do)



POĎAKOVANIE

Príspevok vznikol za podpory grantov VŠB-TUO SP/2010192 (Možnosti modelování přírodních a environmentálních rizik způsobených extrémními hydrometeorologickými situacemi) a SP/2010101 (Integrace GIS a numerických modelů pro analýzu zranitelnosti území a operativní krizové řízení ve vztahu k vybraným přírodním a antropogenním rizikům).

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Barringer, J.R.F., Lilburne, L., (1997) An Evaluation of Digital Elevation Models for Upgrading New Zealand Land Resource Inventory Slope Data. *GeoComputation 97 & SIRC 97*, 26 – 29 august, Nový Zéland. s. 15 – 22.
- [2] Bates, P.D., Roo De A.P.J., (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*. 236 (2000), s.54 – 77.
- [3] Bates, P.D., Marks, K. J., Horritt, M.S., (2003) Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models. *Hydrological Processes*. 17 (2003), s. 537-557.
- [4] Gao, W., Zhang, J., Yan, Q., Qiu, Z., (2006) Assessment and Analysis of DEM Accuracy Generated From SPOT-5 HRS Imagery. *Symposium Remote Sensing: From Pixels to Processes*, 8-11 Máj, Enschede.
- [5] Kraus, K., Pfeifer, N., (1998) Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53 (4),s.193–203.
- [6] Kraus, K., et al. (2004) Quality Measures for Digital Terrain Models, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXV-B2.
- [7] Lee, J., Marion, L.K., (1994) Analysis of Spatial Autocorrelation of USGS. 1:250 000 Digital Elevation Models, *GIS/LIS*, s. 504–513.
- [8] Li, Z., (1988) On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy. *Photogrammetric Record*, 72(12),s. 873-877.
- [9] Li, Z., Zhu, Q., Gold, Ch., (2005) *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press, Florida.
- [10] National research council, (2007) *Elevation Data for Floodplain Mapping*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- [11] Oksanen, J., (2003) Tracing The Gross Errors of DEM . *Visualization Techniques for Preliminary Quality Analysis*. 21st International Cartographic Conference (ICC). 10 - 16 August, Durban, South Africa.
- [12] Oksanen, J., (2006) *Digital Elevation Model Error in Terrain Analysis*. Faculty of Science, Helsinki.
- [13] Östman, A., (1987) Quality control of photogrammetrically sampled digital elevation models. *Photogrammetric Record*, 12 (69),s.333–341.
- [14] Podobnikar, T., (2009) Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *Surveys and Perspectives Integrating Environment & Society (SAPIENS)*. 2 (2009), online.
- [15] Rapant, P., (2006) *Geoinformatika a geoinformační technologie*. Institut Geoinformatiky VŠB-TU, Ostrava.
- [16] Russell, E., Kumler, M., Ochis, H.,(1995) Identifying and removing systematic errors in USGS DEMs. *GIS in the Rockies Conference Proceedings*, Sep 25-27, Denver, CO.
- [17] Tang, G., Strobl, J., Gong, J., Zhao, M., Chen, Z., (2001) Evaluation on the accuracy of digital elevation models. *Journal of Geographical Sciences*. 2 (11),s. 209–216.

[18] Zhou, Q., Lees, B., Tang, G., (2008) Advances in Digital Terrain Analysis. Springer, Berlin.

Štandardy:

[19] Geospatial Positioning Accuracy Standards (1998) Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Federal Geographic Data Committee.

[20] National Mapping Program Technical Instructions (1998) Part 1,2,3: General Standards for Digital Elevation Models. U.S. Geological Survey.

[21] Digital Terrain Elevation Data (2000) National Geospatial-Intelligence Agency.

www:

[22] ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD [online], Bodová pole, dostupné na www: <<http://czepos.cuzk.cz/>>.