



**ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI**

**Fakulta aplikovaných věd
Katedra matematiky**

**Testování výškové přesnosti navigační GPS pro
účely (cyklo)turistiky**

Bakalářská práce

Plzeň 2006

David Velhartický

Zadání práce

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a následné obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr bakalářského studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

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

Plzeň, květen 2006

.....

vlastnoruční podpis

Název práce: Testování výškové přesnosti navigační GPS pro účely (cyklo)turistiky

Autor: David Velhartický

Vedoucí práce: Ing. Karel Jedlička

Abstrakt

Práce popisuje výškovou přesnost navigační GPS a porovnává výsledky měření s ohledem na různou úroveň zakrytí oblohy. Prostorová data byla získána měřením při jízdě na kole a zaznamenána pomocí aplikace ArcPad 6. Další zpracování naměřených dat proběhlo v GIS software společnosti ESRI, statistické vyhodnocení pak v Microsoft Excel 2000.

Nejprve byla zhodnocena relativní přesnost navigační GPS – rozdíly výšek naměřených na stejném stanovišti v různém čase. Následně proběhlo hodnocení absolutní přesnosti – odchylek naměřených hodnot výšek od skutečných nadmořských výšek terénu. Pro toto hodnocení byly využity digitální modely terénu vytvořené na základě vrstevnic a fotogrammetricky vyhodnoceného souboru kót.

Statistické hodnocení proběhlo po úsecích naměřené trasy, které reprezentují různou úroveň zakrytí oblohy. Ta velkou měrou ovlivňuje přesnost určené polohy. V obou případech statistického hodnocení byly určeny průměrné odchylky výšek, jejich výběrové rozptyly a směrodatné odchylky.

Klíčová slova: navigační GPS, absolutní a relativní vertikální přesnost, digitální modely terénu

Title: Testing of altitudinal accuracy of navigational GPS for purposes of cycling and tourism

Author: David Velhartický

Supervisor: Ing. Karel Jedlička

Abstract

This work describes elevational accuracy of the navigational GPS and compares results of measurements considering various levels of sky obstructions. Spatial data was attached by measurement on moving bike and saved by ArcPad 6 application. Further data elaboration was done in ESRI GIS software, statistical evaluation was done in Microsoft Excel 2000.

There was estimated relative accuracy of navigational GPS at first. That means differences of elevations, that have been measured more times on the same place. There was done the absolute accuracy evaluation subsequently. There were evaluated variances of measured elevation and elevation of real terrain. Two different digital terrain models were used for that purpose.

The statistical evaluation has proceeded in sections of measured road. Sections represent different level of sky obstructions which influences the accuracy of intended position. There were assigned medial elevational differences, their variances and standard deviations in both cases of statistical evaluation.

Keywords: navigational GPS, relative and absolute vertical accuracy, digital terrain models

Obsah

1. Úvod	1
2. GPS data	3
2.1 Sběr dat	3
2.2 Transformace měřených dat	6
3. Digitální modely terénu	10
3.1 Vytvoření DMT interpolací vrstevnic	10
3.2 Fotogrammetrický DMT	14
4. Hodnocení přesnosti navigační GPS	16
4.1 Zhodnocení relativní přesnosti navigační GPS	16
4.1.1 Postup vyhodnocování relativní přesnosti GPS	17
4.1.2 Výsledky statistického hodnocení relativní přesnosti GPS	20
4.2 Zhodnocení absolutní přesnosti navigační GPS	24
4.2.1 Příprava prostorových dat pro vyhodnocování	24
4.2.2 Problematika přesnosti porovnávaných dat	25
4.2.3 Statistické hodnocení	28
4.2.4 Výsledky statistického hodnocení absolutní přesnosti GPS	28
5. Závěr	37
Literatura	40
Seznam příloh	41

1. Úvod

GIS, neboli geoinformační systémy, je poměrně nové, rychle se rozvíjející odvětví se širokými možnostmi uplatnění. Již na střední škole mě zaujala práce s digitálními mapami a jejich správa, a proto jsem si za své vysokoškolské zaměření zvolil geomatiku. Při volbě tématu bakalářské práce jsem pak hledal zadání, které by mi umožnilo pracovat s programy vytvářejícími GIS aplikace a s moderními technologiemi sběru a vyhodnocování dat.

GPS, globální systém určování polohy, se stává v posledních letech stále běžnější pomůckou. Původně byl vyvinut pro vojenské účely a po svém uvolnění pro civilní sektor se stal drahým vybavením geodetických společností a luxusních automobilů. V posledních letech náklady na pořízení tohoto navigačního systému postupně klesají, a tak se systémy GPS začínají stále více rozšiřovat mezi širší veřejnost.

Výhody tohoto systému - určení polohy kdekoliv na světě a rychlá a poměrně přesná navigace – předurčují GPS při malých rozměrech přijímačů pro široké užití nejen v různých oborech ekonomiky, ale i pro volnočasové aktivity. GPS může ve spojení s digitální mapou nahradit autoatlas i turistické mapy.

Většímu rozšíření technologie GPS v oblasti turistiky a cestovního ruchu dnes stále brání poměrně vysoké náklady na její pořízení. Protože s cenou systému koresponduje i jeho přesnost, jsou na trhu k dispozici různě kvalitní GPS přijímače. Výrobci nejrozšířenějších navigačních systémů dnes uvádí přesnost svých výrobků 10 metrů (například použitá anténa Navilock BT-338, <http://www.navilock.de>). Internetová encyklopedie Wikipedia však uvádí směrodatnou odchylku v určení polohy 12 m [9] a při pokusném měření v reálných podmínkách (dlouhodobé měření na jednom bodě) určoval navigační systém Navilock BT-338 polohu s odchylkou až 25 m. (viz příloha A.)

Výškové přesnosti navigační GPS je věnována o mnoho menší pozornost. Pokud se o ní zdroje zmiňují, je většinou uváděna jako 1,5-násobek odchylky polohové (např. <http://gps.slansko.cz/testy.html>), ale žádná přesnější hodnota uváděna není. Jedině výše zmíněná encyklopedie Wikipedia uvádí efektivní vertikální chybu 19 m (“...jen orientační číslo, vycházející z průměrné hodnoty DOP“ – cit. [9], Shrnutí přesnosti). Protože je oblast výškové přesnosti navigačních GPS málo prozkoumaná, zvolil jsem si popsání této problematiky za téma bakalářské práce.

Technologie GPS pracuje na základě určení vzdálenosti mezi přijímačem a alespoň třemi (pro určení polohy i výšky alespoň čtyřmi) satelity, jejichž poloha je v daném čase známá. Pro zjištění těchto vzdáleností je důležitá přímá viditelnost mezi satelitem a

přijímačem. Přesnost určení polohy tak ovlivňuje počet v dané době dostupných satelitů a rozsah zakrytí stanoviště okolním terénem, zástavbou, případně porostem vegetace.

Při běžném použití navigace se zakrytí oblohy nevyhneme a určení přesné polohy v méně přehledném terénu je často mnohem důležitější než na otevřeném prostranství. Cílem mé práce je proto zhodnocení vlivu zakrytí oblohy na přesnost určení nadmořské výšky. Vzorové výstupy z měření polohy navigačním systémem GPS porovnáám s výškopisnými daty Základní báze geodetických dat (ZABAGED) a výškopisem vyhodnoceným na základě letecké fotogrammetrie (FGM).

2. GPS data

Navigační využití technologie GPS je stále častější. Nejde jen o jízdu automobilem po hlavních silničních a dálničních trasách v přehledném a málo zakrytém terénu, ale stále častěji i o navigaci při turistice, kdy naopak k úplnému zakrytí oblohy vegetací často dochází. I v těchto případech by nás ale měla navigační GPS dokázat informovat alespoň o přibližné poloze. V následující práci se pokusím ozřejmit, jak spolehlivé určení hodnot nadmořské výšky můžeme v těchto případech očekávat.

2.1 Sběr dat

Přesnost určení polohy systémem GPS závisí na dostupnosti satelitů, na základě jejichž vzdálenosti od přijímače je poloha určována. Podmínkou pro funkci systému GPS je dostupnost minimálně tří (pro určení výšky čtyř) satelitů v každém okamžiku určování polohy, přičemž při dostupnosti vyššího počtu satelitů přesnost určené polohy stoupá.

Systém GPS určuje polohu na základě 24 družic umístěných na nestacionárních oběžných drahách Země, jejichž dráhy splňují výše zmíněnou podmínku dostupnosti alespoň čtyř satelitů z libovolného místa Země v každém okamžiku. Podmínka dostupnosti satelitů je sice splněna, ale platí pro ideální podmínky - otevřená prostranství (místa bez zakrytí). Pokud ale stojí mezi satelitem a přijímací anténou aparatury GPS nějaká překážka, může toto stínění způsobit snížení kvality nebo úplnou ztrátu signálu z tohoto satelitu, což v důsledku způsobí zhoršení přesnosti určení polohy. V našich zeměpisných šířkách má větší vliv na přesnost určené polohy stínění v jižních směrech, protože vzhledem ke sklonu drah se většinou pohybuje více satelitů právě na jižní části oblohy.

Z výše popsaných důvodů je třeba otestovat přesnost navigační GPS v různých podmínkách – zakrytí výhledu vegetací a zástavbou z různých směrů nebo stínění okolním terénem (přesnost měření v údolí nebo ve svahu).

Pro vyhodnocení jsou potřebná data naměřená za mnoha různých podmínek. Proto byla v Plzni a jejím okolí zvolena vzorová trasa po ose Hradiště – centrum města, Americká – Fakultní nemocnice Lochotín (dále jen F. n. Lochotín) – Košutka (konečná tramvaje č. 4) – Krkavec (plán trasy viz příloha B.), na níž se vyskytuje skutečně mnoho typů okolního prostředí (od rovinatého terénu s minimálním zakrytím při řekách Úhlavě a Radbuze až po příkrý svah s lesním porostem na Krkavci). Pro zvýšení množství sebraných dat a vyloučení vlivu nízkého počtu satelitů při měření byla celá trasa změřena dvakrát. Dvě nezávislá měření na stejné trase také umožní provést hodnocení relativní přesnosti navigačního systému GPS (možný rozptyl naměřených výšek určených na daném stanovisku).

Měření proběhlo 13.10.2005 přibližně v těchto časech:

Tab. 2.1.1 Jízdní časy měřených úseků

Úsek	Doba jízdy [min]	Přibližný čas jízdy	Název souboru (*.shp)
ZČU, Bory - Hradiště	20	10:30-10:50	ZCU-Hradiste1
Hradiště - centrum (Americká)	15	10:55-11:10	Hradiste-Americka1
Americká - F. n. Lochotín	15	11:15-11:30	Americka-nemocnice1
F.n.Lochotín - Košutka, konečná	17	11:35-11:53	Nemocnice-Kosutka1
Košutka, konečná - Krkavavec	23	12:00-12:23	Kosutka-Krkavec1
Krkavavec - Košutka, konečná	12	12:40-12:52	Krkavec-Kosutka1
Košutka, konečná - F.n.Lochotín	14	12:55-13:09	Kosutka-nemocnice1
F. n. Lochotín - Americká	13	13:15-13:28	Nemocnice-Americka1
Americká - Hradiště	17	13:30-13:47	Americka-Hradiste1
Hradiště - Americká	21	14:10-14:31	Hradiste-Americka2

Chůze je pro sběr dat na takto dlouhé trase příliš pomalá a pro automobil jsou některá místa nedostupná – nebylo by možné získat dostatečně rozsáhlou množinu různých případů pro vyhodnocení. Sběr dat tedy proběhl při jízdě na kole. Cykloturistika je navíc odvětví, ve kterém by se navigační GPS mohla v rámci volnočasových aktivit dobře uplatnit (včetně určování výškových profilů projeté cesty).

Vybavení pro příjem signálu a vyhodnocení polohy se skládá z PDA (Personal digital asistent, malý přenosný počítač) a z antény o přibližné velikosti mobilního telefonu, která přijímá signály ze satelitů. (Ke sběru dat byla použita anténa Navilock BT-338 a PDA Fujitsu Siemens Pocket Loox 720. Měření bylo prováděno bez zapnutého příjmu dat systému EGNOS.)



Obr. 2.1.1 Aparatura navigační GPS – PDA a přijímová anténa

Anténa musí být umístěna tak, aby nebyla celá zakryta – tedy připevněna na řídítkách, nebo nosiči bicyklu, popřípadě umístěna v síťce na batohu. Při umístění například uvnitř batohu nebo tašky sice aparatura GPS polohu stále určuje, ale na výstupu jsou již patrné nepřesnosti v důsledku zakrytí antény. Obecně se doporučuje, aby byla anténa systému GPS umístěna co nejvýše – pro minimalizaci jejího zakrývání při běžném pohybu. (Pokud je přijímač umístěn na rámu kola, již samotný cyklista pro něj může představovat nezanedbatelnou překážku.)

Pro využití GPS navigace je umístění antény na bicyklu dostačující. Pro stanovení věrohodných výsledků pro rozbor přesnosti určených souřadnic ale bylo potřeba proměnné zakrytí oblohy vegetací nebo okolní zástavbou a trvalé zakrytí jednoho směru tělem by do výsledků měření vnášelo chyby. Celé měření proto proběhlo s anténou připevněnou na cyklistické přílbě. (Toto umístění není pro běžné užívání GPS navigace při cyklistice vhodné – anténa systému je zde vystavena vyššímu nebezpečí zničení (větve a jiné nízké se vyskytující překážky). Také deformační vlastnosti cyklistické přílby by byly v případě pádu s takto připevněnou anténou nevhodně ovlivněny.)

V základním provedení navigační GPS pouze určuje a vypisuje zeměpisné souřadnice (zeměpisná šířka, zeměpisná délka, elipsoidická výška) v globálním systému WGS 84. Nejnovější přijímače GPS jsou navíc vybaveny modely geoidu, díky nimž je možné naměřené elipsoidální výšky transformovat do normálních výškových systémů, např. Bpv. Tyto transformace jsou prováděny GPS aparaturou automaticky, a tak není nutné výšky získané GPS měřením před jejich vyhodnocováním dále upravovat. Užívány jsou různě přesné modely geoidu, jejichž přesnosti odpovídá přesnost prováděné transformace. Ta dle druhu modelu dosahuje hodnot 40cm až 2m. [10]

Pokud chceme s naměřenými daty dále pracovat (zobrazovat polohu v mapě, ukládat absolvovanou trasu apod.), je třeba systém GPS doplnit dalším softwarovým vybavením. Naměřená data byla dále zpracovávána na GIS aplikacích firmy ESRI. Proto byl k záznamu měření v PDA použit program ArcPad 6, produkt téže firmy, který na základě kompatibility uchovávaných dat umožňuje následnou práci a vyhodnocování informací v programech ArcGIS.

Průběh trasy systém nezaznamenával nepřetržitě. Výsledná linie byla vytvořena na základě interpolace měření polohy v časovém intervalu přibližně jedné vteřiny. V takto vzniklém souboru liniových prvků (*.shp) jsou uchovávány souřadnice jednotlivých lomových bodů linie v systému WGS 84, na jejichž základě bylo provedeno hodnocení přesnosti určení nadmořské výšky.

2.2 Transformace měřených dat

Protože při další práci - vyhodnocení rozdílů mezi naměřenou nadmořskou výškou a nadmořskými výškami srovnávacích dat v aplikaci ArcGIS - je třeba pracovat s daty s polohovou informací uchovávanou v jednom souřadnicovém systému, bylo nutné provést transformaci dat naměřených pomocí GPS a uchovávaných v systému WGS 84 do systému S-JTSK. Pro tyto případy je aplikace ArcGIS vybavena nástrojem *Projections and transformations*.

Celá transformace se provádí pomocí ArcToolbox v rozhraní ArcCatalog. ArcGIS využívá pro transformování mezi souřadnicovými systémy sedmiprvkovou Helmertovu transformaci. Pomocí této transformace jsou určeny souřadnice každého bodu transformovaného souboru na základě sedmi parametrů (tři úhly rotace, tři hodnoty posunu a hodnota změny měřítka). Tyto parametry je nutné zadat do formuláře transformace souřadnic, nebo je nahradit předdefinovanými parametry transformace, pro které je nutné stáhnout z internetových stránek společnosti ArcData definiční soubor Geogtran. (www.arcdata.cz, sekce Podpora uživatelů / Tipy, triky / Transformace souřadnicových systémů). [1]

Postup transformace:

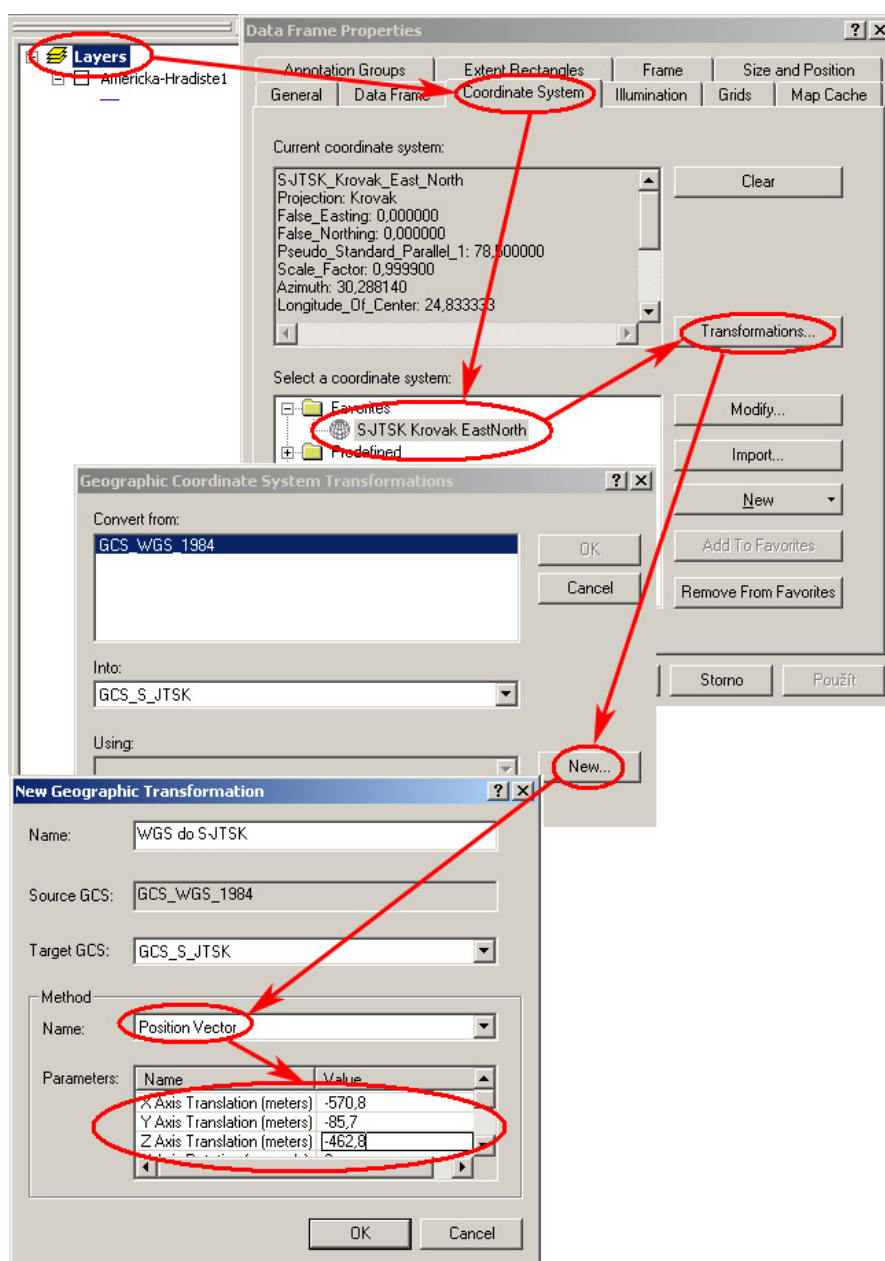
1. Pro jistotu zkontrolujeme, zda mají naměřená data opravdu nastavený souřadnicový systém WGS 84:
 - V ArcCatalog otevřeme v adresářovém stromu cestu k naměřeným datům.
 - Pravým tlačítkem myši vyvoláme nabídku možností pro transformovaný soubor a zvolíme možnost *Properties*.
 - Ve vyvolaném okně zvolíme záložku *Fields* a v tabulce označíme řádek *Shape*. Ve spodním okně by se měla objevit mimo jiné informace o nastaveném souřadnicovém systému WGS 84.
2. Pokud je nastavení souřadnicového systému správné, nastavíme ve formuláři transformace souřadnic programu ArcMap přesnější koeficienty transformace mezi souřadnicovými systémy WGS 84 a S-JTSK:
 - Spustíme ArcMap a zobrazíme v něm data naměřená v systému WGS 84.
 - Pravým tlačítkem myši vyvoláme nabídku možností pro položku *Layers* a zvolíme *Properties*.
 - V záložce *Coordinate Systems* zvolíme cílový souřadnicový systém S-JTSK a stiskneme tlačítko *Transformations*.
 - V novém okně zadáme parametry transformace (Typ transformace: Position vector, Posun X: -570,8 , Y: -85,7 , Z: -462,8 , Rotace X: -4,998 , Y: -1,587 , Z: -5,261 , Změna měřítka: - 3,56). [8] Pokud máme nainstalovaný výše

uvedený soubor Geogtran, zadání parametrů transformace se zjednoduší na výběr položky *WGS to S-JTSK*.

3. Potvrdíme nastavení parametrů transformace a pokračujeme transformací naměřených dat:
 - Otevřeme ArcToolbox a v něm postupně volíme *Data Management Tools – Projections and Transformations – Features – Project*. Po této volbě se otevře okno nastavení transformace.
 - Vyplníme názvy zdrojového a cílového souboru.
 - Třetí rámeček slouží pro zadávání cílové souřadnicové soustavy. Pomocí tlačítka u tohoto rámečku vyvoláme nabídku souřadnicových soustav. Zde vybereme možnost *S-JTSK Krovak East North*.
 - Parametry transformačních koeficientů máme již nastavené a tak můžeme potvrdit dokončení akce.

Do cílového adresáře se uložil soubor s daty sebranými metodou GPS s body uchovávanými v souřadnicové soustavě S-JTSK.

Užijeme-li tyto přesnější parametry transformace souřadnicových systémů, transformace souřadnic proběhne s odchylkami okolo 1 až 3 metrů [8]. Protože ArcGIS pracuje s matematickými souřadnicemi (osa X doprava, Y vzhůru), jsou v této aplikaci souřadnice Křovákova souřadnicového systému zobrazovány v záporných hodnotách.



Obr. 2.2.1 Nastavení transformace WGS 84 – S-JTSK

Pro správnou reprezentaci naměřených dat je ještě třeba provést úpravu zobrazovaných prvků. Aparatura GPS neměří projetou trasu nepřetržitě. Ke stanovení polohy dochází jednou za sekundu a získané body poté využije pro interpolaci linií. Protože ale chceme pracovat s pokud možno přesnými daty, převedeme získané linie zpět do podoby jejich lomových bodů. K tomu využijeme nástroj *Feature Vertices To Points (Data Management Tools - Features)*.

Zobrazení lomových bodů naměřených linií:

1. V systému ArcMap (nástroj je dostupný jen v nejvyšší výbavě - ArcInfo) otevřeme ArcToolbox a ve stromu nástrojů volíme *Data Management Tools - Features - Feature Vertices To Points*. Otevře se nástroj zobrazení lomových bodů.
2. V nástroji načteme převáděnou liniovou vrstvu a vyplníme název a umístění cílového souboru. Po potvrzení volby převede program liniové prvky na množiny jejich lomových bodů.

Tímto způsobem jsme získali kótové body určené měřením GPS aparaturou, které můžeme dále vzájemně porovnávat a statisticky vyhodnocovat. Data již máme připravena k další práci a můžeme přejít k přípravě srovnávacích dat – digitálním modelům terénu.

3. Digitální modely terénu

Pro určení přesnosti navigační GPS v určování nadmořské výšky je třeba získat skutečné hodnoty nadmořské výšky po celé zkoumané trase. Pro účely této bakalářské práce by nivelace nebo jiné přesné geodetické metody byly příliš náročnými postupy. Proto i zde musí nastoupit moderní technologie. Hodnoty nadmořské výšky naměřené navigačním systémem GPS byly porovnány se dvěma různými sadami výškových dat – digitálním modelem terénu (DMT) vytvořeným na základě interpolace kartografických vrstevnic Základní báze geodetických dat (ZABAGED) a s digitálním modelem terénu vytvořeným z fotogrammetrických dat.

Pokládáme-li data těchto digitálních modelů za poměrně přesné zobrazení terénu, lze již jejich porovnáním s hodnotami určenými pomocí GPS určovat přesnost zvolené aparatury.

Protože byly všechny tři porovnávané tématické vrstvy spravované ve stejném souřadnicovém systému, bylo možné linii dat naměřených pomocí GPS promítnout přímo do modelů terénu a tak získat tři výškově se lišící prostorové křivky shodného půdorysu. Vzájemným porovnáním těchto křivek vznikl soubor trojic hodnot nadmořských výšek, z nichž je možné za pomoci matematických a statistických výpočtů určovat absolutní přesnost měření (přesnost určení nadmořských výšek) v různých místech zvolené trasy. (V rámci této práce je hodnocena také relativní přesnost navigační GPS – velikost rozptylu měřených výšek za daných podmínek měření.)

3.1 Vytvoření DMT interpolací vrstevnic

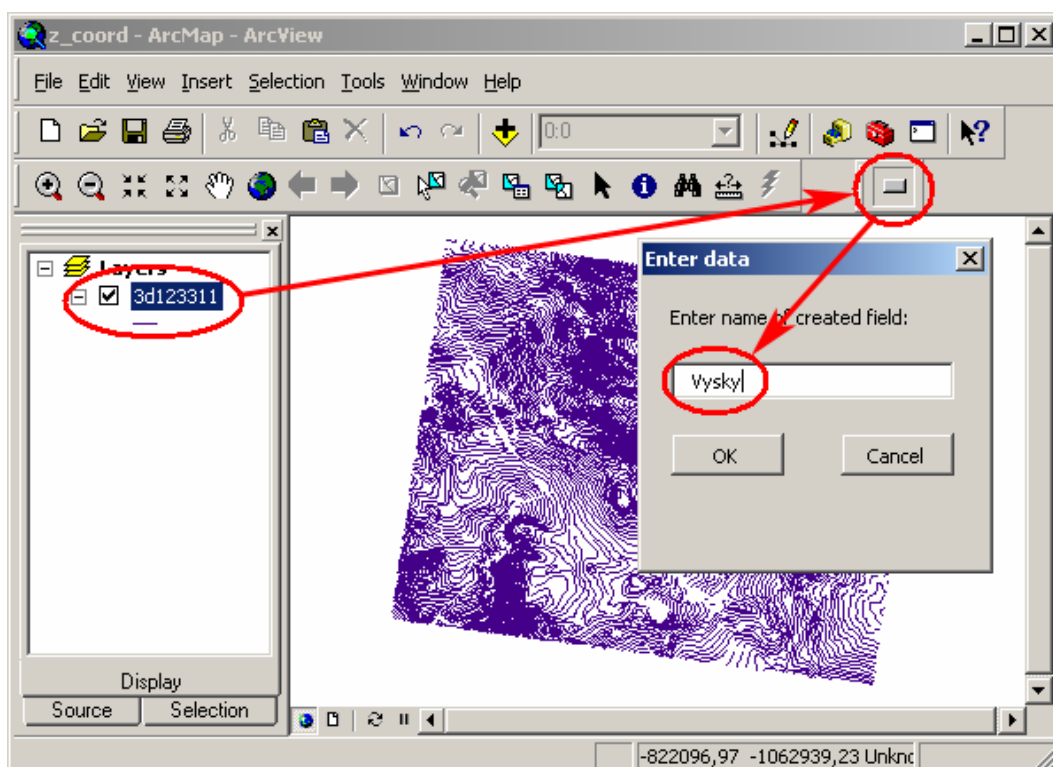
Soubor kartografických vrstevnic ZABAGED pokrývá plochu celé České republiky a je distribuován ve vektorové digitální formě v kladu jednotlivých mapových listů Základní mapy 1:10 000. K vytvoření digitálního modelu terénu oblasti Plzně a jejího blízkého okolí byly využity mapové listy 12-33-22, 12-33-21, 12-33-17, 12-33-16, 12-33-12 a 12-33-11 s rozstupem vrstevnic 2m. Z těchto dat byl vytvořen rastrový digitální model terénu (DMT) s velikostí buňky 3x3 metry.

Postup vytvoření DMT:

Jako zdroj vrstevnic byly použity výškopisné vrstvy výše uvedených mapových listů. Tato data uložená ve formátu *.dgn platformy Microstation obsahují další mapové vrstvy, z nichž jedna je liniovou vrstvou vrstevnic. Ze všech výše uvedených mapových listů byly tyto liniové vrstvy vyexportovány v systému ArcGIS do formátu *.shp. Protože originální data nenesou informaci o souřadnicovém systému, byla vyexportovaným vrstvám tato informace doplněna.

1. Informace o poloze jednotlivých prvků mapové vrstvy jsou uloženy v jejich geometrii. Protože nástroj interpolace rastrů přebírá zpracovávané hodnoty interpolovaných prvků pouze v podobě prvků atributové tabulky, byly hodnoty nadmořských výšek vrstevnic vyexportovány do atributů pomocí skriptu `z_coord`. Tento skript vytvořený J. Pacinou v rámci jeho diplomové práce ukládá do atributové tabulky bodových a liniových prvků jejich výšku (viz[4], str. 26). U liniových prvků ukládá skript výšku prvního lomového bodu každé linie, a tak je využitelný především pro úpravu výškopisných mapových vrstev (kót a vrstevnic). Postup práce s tímto skriptem je následovný:

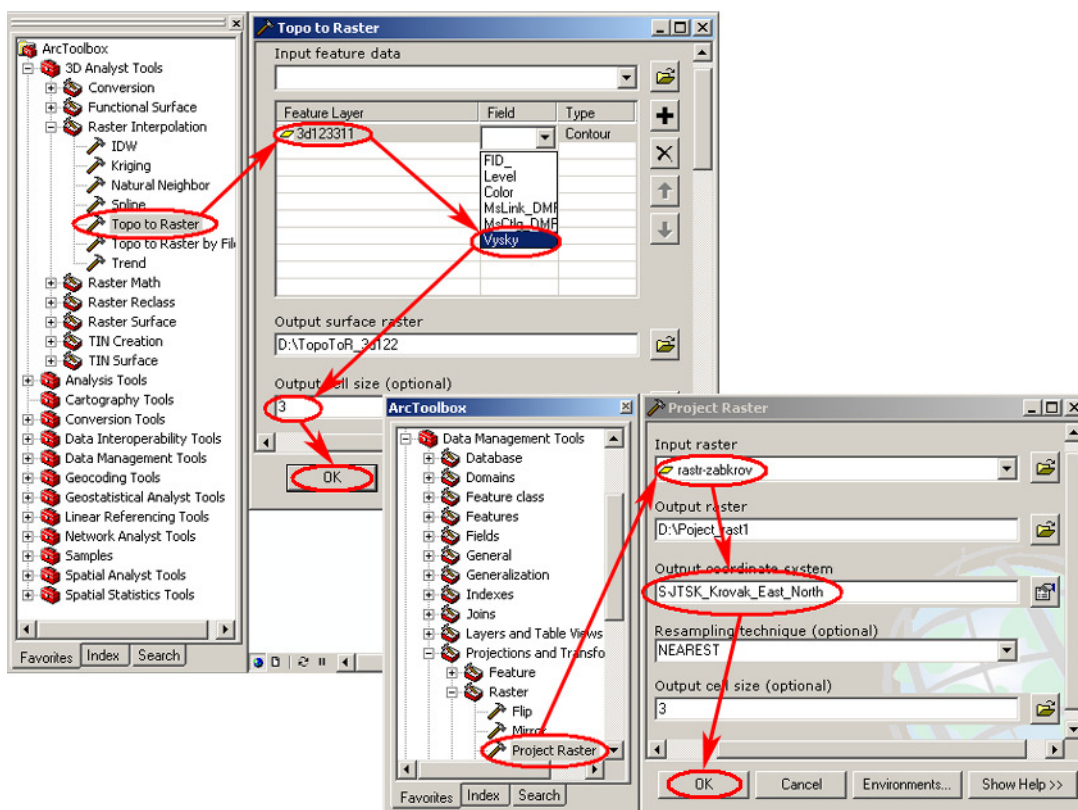
- Otevřeme mapový dokument `z_coord.mxd` – do ovládacích prvků ArcMap přibude nová ikona nástroje pro zobrazení hodnot výšek v atributové tabulce
- Načteme a označíme zpracovávané mapové vrstvy s vrstevnicemi, stiskneme ikonu skriptu `z_coord` a v okně tohoto skriptu zadáme požadovaný název atributu nadmořské výšky. Všem označeným vrstvám jsou automaticky rozšířeny atributové tabulky o hodnoty výšek jejich jednotlivých prvků. Veškeré změny probíhají přímo v načtených mapových vrstvách a nejsou generovány vrstvy nové, je proto vhodné původní vrstvy před započítím úprav zálohovat.



Obr. 3.1.1 Funkce `z_coord` – postup práce

2. V dalším kroku se již vytváří rastrový digitální model terénu. K tomu se využije nástroj *Topo to Raster* z ArcToolbox. (*3D Analyst Tools – Raster Interpolation – Topo to Raster*, popř. *Spatial Analyst Tools – Interpolation – Topo to Raster*):

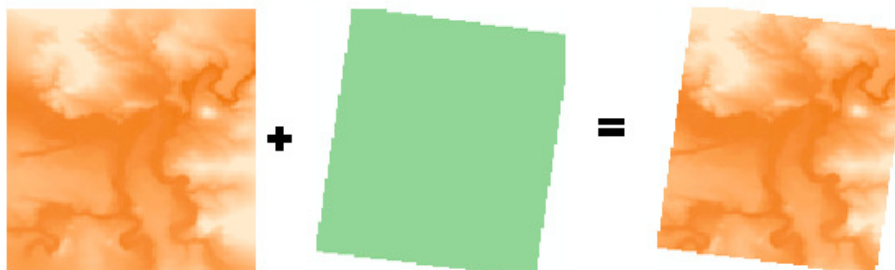
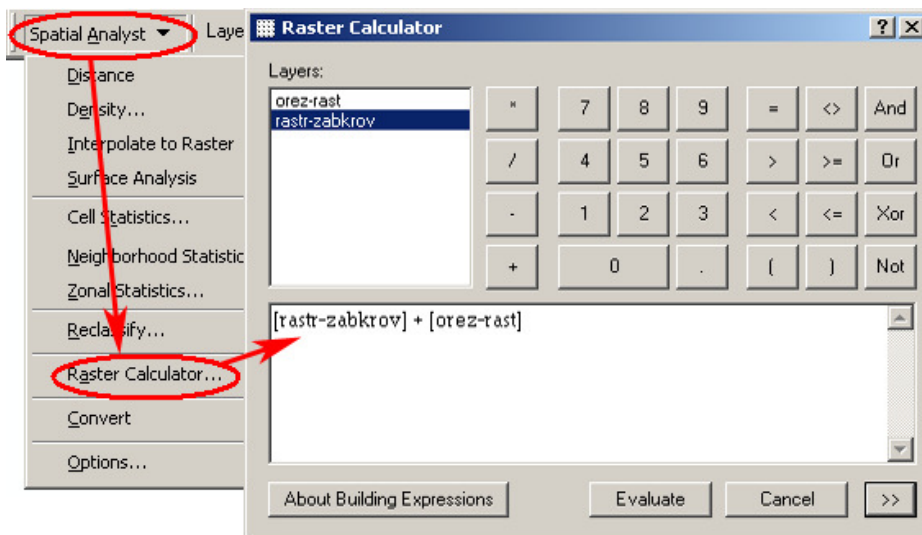
- Spustíme nástroj *Topo to Raster* a načteme do něj všechny zpracovávané vrstvy.
- V tabulce zpracovávaných vrstev vybereme atribut, který bude interpolován do rastrového zobrazení jevu – změníme názvy atributů ve sloupci *Field* (v tomto případě na “*Vysky*“)
- Hodnoty ve třetím sloupci *Type* necháme na přednastavené hodnotě *Contour*. Ta říká, že nejde o zlomové linie, ale ve výsledném rastru mají být hodnoty jejich výšek zachovány.
- Nakonec určíme název výstupního rastru a jeho umístění na disku a velikost rastrové buňky. Od velikosti buňky se odvíjí celkový počet buněk v rastru a tedy i jeho velikost na disku a doba potřebná k jeho zpracování. Pro dostatečnou podrobnost rastrového DMT byla zvolena velikost buňky 3x3 metry.
- Potvrdíme zadané údaje a po určité době (čas zpracovávání interpolace závisí na výkonu počítače, rozsahu zpracovávaných dat a velikosti rastrové buňky) je vytvořen nový rastr.
- Vytvořený rastr si nenese informaci o souřadnicovém systému, ve kterém byl vytvořen, proto mu ji doplníme pomocí nástroje ArcToolbox *Project Raster* (*Data Management Tools – Projections and Transformations - Raster*)



Obr. 3.1.2 Postup při vytváření DMT z mapové vrstevnic

3. Vytvořený rastr neodpovídá svou velikostí a tvarem plošnému rozsahu vstupních dat. Vždy je vytvořena obdélníková obálka vstupních dat rovnoběžná s kartézskými souřadnicovými osami X,Y. V místech mimo oblast vstupních dat jsou vyinterpolovány hodnoty z okraje těchto dat, a tak jsou informace mimo zkoumanou oblast nepoužitelné. K jejich odstranění se užívá Raster Calculator. Ten ořízne vstupní rastr podle tvaru rastru překrývajícího. Oříznuté buňky vstupního rastru ve skutečnosti nejsou odstraněny, jejich hodnota je pouze nastavena na hodnotu *No Data* a v systému ArcGIS nejsou dále zobrazovány. V této práci bylo postupováno následovně:

- Na základě mapové vrstvy KLZM10 převzaté z ArcČR (reprezentace kladu mapových listů Základní mapy 1:10 000) byla vytvořena polygonová vrstva pokrývající zájmovou oblast (šest výše uvedených mapových listů).
- Vytvořený polygon byl převeden do rastrové podoby pomocí nástroje *Feature To Raster (Conversion Tools - To Raster)*. Velikost rastrové buňky je shodná s velikostí buňky rastrového DMT, tedy 3x3 metry. Rastr má rozměry shodné s rastrem DMT, v zájmové oblasti je ale jeho hodnota rovna nule a ostatní buňky nesou hodnotu *No Data*.
- V *Raster Calculator (Spatial Analyst – Raster Calculator)* byl sestaven výpočet “rastr + ořez“. Při tomto lokálním výpočtu jsou sečteny hodnoty polohou si odpovídajících buněk, přičemž v případě, že jedna ze sčítaných buněk nese hodnotu *No Data*, je tato hodnota přebrána i do výsledného rastru.



Obr. 3.1.3 Raster Calculator - “ořez“ DMT rastru

Výsledkem tohoto postupu je tedy rastr, jehož každá buňka nese informaci o nadmořské výšce vyinterpolované z dvoumetrových vrstevnic v oblasti šesti mapových listů Základní mapy 1:10 000.

3.2 Fotogrammetrický DMT

Zdrojem pro vytvoření druhého rastrového modelu terénu byl textový soubor fotogrammetricky vyhodnocené čtvercové sítě výškových kót s rozestupy bodů 10x10m. Tento soubor, vytvořený společností Georeal v roce 2002, byl z formátu *.asc postupně přetransformován do formátu *.shp a na rastrový model terénu.

1. Původní soubor DMTplzen10x10.asc je textový soubor obsahující trojice souřadnic X,Y,Z v S-JTSK. Takto upravený soubor není kompatibilní se systémem ArcGIS a musí být převeden do podoby tabulky *.dbf, s třemi atributovými sloupci odpovídajícími jednotlivým souřadnicím. Tato konverze byla provedena v tabulkovém editoru Microsoft Excel 2002. Z důvodu vysokého počtu vyhodnocených bodů bylo nutné rozdělit původní soubor do osmi atributových tabulek.

```
# The DTM grid had lower left (southwest) corner coords:
#   X or easting = -829590.0000 meters
#   Y or northing = -1075480.0000 meters
# and grid intervals:
#   X (east) grid interval = 10.0000 meters
#   Y (north) grid interval = 10.0000 meters
# For a total of 1208 x 995 = 1201960 points.
#
# There may be less points in this file because those
# grid points that were outside of the polygon that
# defined the DTM boundary are not included in this file.
#
-819830.0000 -1075470.0000 366.4315
-819820.0000 -1075470.0000 366.4458
-819810.0000 -1075470.0000 366.5405
-819800.0000 -1075470.0000 366.3712
-819790.0000 -1075470.0000 366.2652
-819780.0000 -1075470.0000 366.1654
-819770.0000 -1075470.0000 365.9934
-819760.0000 -1075470.0000 365.8605
-819750.0000 -1075470.0000 365.7065
-819740.0000 -1075470.0000 365.6688
-819830.0000 -1075460.0000 366.5182
-819820.0000 -1075460.0000 366.4888
```

Obr. 3.2.1 DMTplzen10x10.asc – textový formát fotogrammetricky vyhodnoceného výškopisu

2. V systému ArcGIS byla získaná data převedena pomocí nástroje *Add XY Data* z položky *Tools* ovládací lišty programu na mapovou vrstvu a uložena ve formátu *.shp:
 - Zadáme umístění zdrojové tabulky (*.dbf) na disku.
 - Určíme, které atributové sloupce určují souřadnice X a Y. (Pozor! Systém ArcGIS pracuje s matematickou orientací souřadnicových os kartézského souřadnicového systému – data určená v systému S-JTSK musí mít souřadnice

uvedené se zápornou hodnotou a především se do systému musí zadat v opačném pořadí – osa X v ArcGIS odpovídá ose –Y Křovákova souřadnicového systému)

- Určíme ve kterém souřadnicovém systému jsou vstupní hodnoty měřeny (*S-JTSK Krovak EastNorth.prj*) a necháme zpracovat výsledek.
 - Výslednou mapovou vrstvu vyexportujeme do formátu *.shp.
3. Vzniklo osm mapových vrstev. Každá z nich uchovává čtvercovou síť výškových kót, jejichž nadmořská výška je uvedena pouze jako jeden z jejich atributů. Pro další zpracování dat toto vyhovuje – při generování rastru jsou interpolované hodnoty přebírány právě z atributové tabulky. Postup vytvoření rastrového modelu terénu byl obdobný jako v předchozím případě, jen v nastavení tabulky vstupních mapových vrstev došlo ke změně v položce *Type*, kde bylo původní nastavení *Contour* nahrazeno pojmem *Pointelevation*, který reprezentuje výškový bod (kótu). Velikost buňky rastru byla stejně jako v předchozím případě nastavena na 3x3 metry.
4. Následné “oříznutí“ rastru v *Raster Calculator* proběhlo též stejným postupem jako při vytváření výše uvedeného rastru. Protože zobrazovaná oblast není shodná s žádným kladem mapových listů (zájmovým územím tohoto modelu jsou řeky protékající Plzní a jejich nejbližší okolí – záplavová území), byl překrývací rastr vygenerován z polygonu vzniklého na základě obtažení vnějších hranic všech zdrojových mapových vrstev *.shp.



Obr 3.2.2 DMT rastr vytvořený na základě FGM měření

4. Hodnocení přesnosti navigační GPS

Všechny metody určování polohy jsou zatíženy chybami, které závisí na specifických podmínkách daného stanoviska. Stejně tak je tomu i v případě systému GPS. Jak již bylo uvedeno, přesnost tohoto systému ovlivňuje především rozsah zakrytí oblohy na daném stanovisku. Ovlivněno je jak určení polohy, tak určení nadmořské výšky stanoviska. Chyba způsobená zhoršeným příjmem signálu vysílaného družicemi není na daném stanovisku konstantní – určovaná poloha a výška se s časem mění.

Pokud tedy chceme zjistit přesnost navigační GPS v určování výšek, je nutné předem určit i její relativní přesnost – rozptyl naměřených dat, který můžeme při měření hodnot výšky za určitých podmínek předpokládat. Výsledná hodnota rozptylu měřených dat musí být brána v potaz při konečném hodnocení přesnosti určení absolutní nadmořské výšky.

Většina dostupných zdrojů uvádí výškovou přesnost navigačních GPS jako 1,5-násobek přesnosti polohové. Internetová encyklopedie Wikipedia definuje výškovou přesnost těchto systémů 19 m (viz Úvod). Účelem této práce je podrobnější popsání výškové přesnosti navigační GPS a potvrzení nebo vyvrácení výše uvedených údajů.

4.1 Zhodnocení relativní přesnosti navigační GPS

Pro určení relativní přesnosti navigační GPS, přesněji rozptylu naměřených výškových dat, by bylo z technologického hlediska nejlepší vybrat stanoviska s přesně definovanými podmínkami, provádět na nich dlouhodobá pozorování a výsledky určovat z velkého objemu získaných dat. Získali bychom přesné údaje, které by ale platily pouze za předem vymezených podmínek, kterých při praktickém užívání GPS nelze dosáhnout. Protože je tato práce zaměřena především na užití navigační GPS v turistice, byla zvolena metoda, která se více přibližuje podmínkám jejího praktického využití.

Při pohybu v přírodě není nikdy zakrytí oblohy konstantní a přesně určenou záležitostí. Zakrytí oblohy se s pohybem v terénu stále mění a pokud chceme následně vytvořit například výškový profil projeté trasy, již přesně nezrekonstruujeme podmínky měření v každém bodě. Každý naopak dokáže z mapy vyčíst, zda v daném úseku vedla trasa lesem nebo po otevřené krajině v polích, popřípadě zda se v blízkosti trasy nevyskytly budovy, které by mohly odstínit signál ze satelitů.

K určení relativní přesnosti GPS byla proto využita data naměřená během jízdy po vzorové trase. Celá trasa byla projeta dvakrát (úsek Hradiště – Americká třikrát) a velké množství dat určených na jednom stanovisku nahradily pro účely statistického vyhodnocení hodnoty naměřené s časovým rozestupem jedné vteřiny na úsecích s podobnými okolními podmínkami.

4.1.1 Postup vyhodnocování relativní přesnosti GPS

Pro určení rozptylu měřených hodnot nadmořské výšky na území s podobnými podmínkami měření potřebujeme porovnávat hodnoty rozdílu minimálně dvou nadmořských výšek naměřených na jednom místě. V případě neustálého pohybu měřicí aparatury není možné získat při jednom průjezdu danou trasou více jak jednu hodnotu nadmořské výšky v jednom bodě. Proto byla vzorová trasa Hradiště - Krkavec naměřena dvakrát a následně byly vzájemně porovnávány hodnoty nadmořské výšky naměřené při prvním a druhém průjezdu.

Při dvou průjezdech stejné trasy nelze nikdy docílit dvou měření na přesně shodném místě, ale pokud vezmeme v potaz přesnost polohového určení navigační GPS a krátkého časového intervalu mezi dvěma měřeními, jeví se tato metoda jako dostačující. Budeme-li předpokládat průměrnou rychlost cyklisty na dané trase 15 km/h (skutečná hodnota je ještě nižší, trasa byla projeta tak, aby okamžitá rychlost pokud možno nepřesáhla 19 km/h), získáme při časovém intervalu měření 1s rozstup dvou stanovisek v rámci jednoho průjezdu průměrně 4,17m. Budeme-li tedy vzájemně porovnávat hodnoty nadmořské výšky naměřené při prvním a druhém průjezdu na nejbližších bodech, průměrná vzdálenost těchto stanovisek by neměla v ose pohybu přesáhnout 2,1m. Odchylka dvou takto porovnávaných stanovisek v příčném směru odpovídá v maximálním případě šířce běžné komunikace, ve většině případů je však nižší. Protože je většina komunikací budována bez přílišného příčného sklonu, neměla by tato vzdálenost mít na nadmořskou výšku stanovisek vliv a lze ji tedy zanedbat.

Vezmeme-li dále v úvahu, že odchylka navigační GPS v určení polohy je až 25m (viz Úvod) a její odchylky v určování výšky by měly být dle předpokladů ještě větší, lze na výše uvedené odchylky polohy porovnávaných stanovisek přistoupit.

V předešlých odstavcích je záměrně uváděn pojem stanovisko, protože polohová vzdálenost porovnávaných bodů vypočtená ze souřadnic určených pomocí GPS se pohybuje v rozmezí 0 – 35m. Extrémní vzdálenosti nejsou dány chybným přiřazením porovnávaných bodů, ale výše uvedenými odchylkami systému GPS v určování polohy. Protože nejsou vysoké hodnoty vzdálenosti bodů příliš časté (průměrná hodnota vzdálenosti se na jednotlivých úsecích pohybuje v předpokládaném rozpětí 4 – 9 m) a odpovídají problémovým úsekům (hustý les, popřípadě výšková panelová zástavba) lze je považovat za předpokládatelnou odchylku polohového určení, popřípadě je lze vyloučit jako hrubé chyby měření (v případě krátkodobé bezdůvodné výchylky).

Prostorové propojení dat dvou nezávislých mapových vrstev je v programu ArcMap možné pomocí nástroje *Join*. Tento nástroj propojí atributové tabulky vstupních mapových vrstev (v tomto případě souborů bodových prvků) tak, že prvku z první vrstvy připojí atributy

nejbližšího prvku z druhé vrstvy a z takto propojených dat vytvoří nový soubor. Zároveň do atributové tabulky nově vzniklého souboru uloží informaci o vzdálenosti propojených prvků.

Uložíme-li tedy informace o poloze lomových bodů naměřené linie do jejich atributové tabulky (informace o souřadnicích prvků nejsou v systému ArcGIS standardně do atributové tabulky vypisovány), bude možné tyto informace následně propojit a vzájemně porovnat.

Pro výpis souřadnic lomových bodů naměřených linií do atributové tabulky byl použit nástroj *Add XY Coordinates*. Tato součást ArcToolbox (*Data Management Tools - Features*), připojuje do atributové tabulky bodových prvků informace o jejich poloze – na rozdíl od výše zmíněného nástroje *z_coord* nejen výšku, ale i souřadnice X a Y. Zobrazené souřadnice lze pak s celou atributovou tabulkou připojit pomocí nástroje *Join* do atributové tabulky jiných prvků.

Propojení atributů ze srovnávaných úseků na základě polohy:

1. V programu ArcMap zobrazíme dříve vygenerované soubory lomových bodů linií naměřených pomocí GPS.
2. Zvolíme dva soubory reprezentující stejný úsek naměřené trasy (např. *Americka-nemocnice1_z* a *Nemocnice-Americka1_z*) a u jednoho z nich volíme pravým tlačítkem myši *Joins and Relates – Join* nástroj pro propojování dat z atributových tabulek.
 - Ve vyvolaném okně *Join Data* zvolíme možnost *Join data from another layer...*, tedy propojení atributových dat na základě polohy.
 - V dalším řádku zvolíme název připojovaného souboru prvků (připojované atributy).
 - Dále zatrhneme druhou z nabízených možností, tedy připojení dat nejbližšího souseda (první možností je připojení váženého průměru atributů okolních bodů) a zvolíme umístění a název cílového souboru.

Potvrdíme-li toto nastavení, program vytvoří nový soubor lomových bodů. Poloha vykreslených bodů odpovídá poloze bodů prvního z původních souborů (na němž bylo propojení provedeno). Tyto body si nesou ve svých atributech souřadnice své i souřadnice lomových bodů, které jim byly na základě vzájemné polohy přiřazeny ze druhého vstupního souboru. Tento postup aplikujeme postupně i na všechny soubory bodů získaných z ostatních úseků vzorové trasy.

Pro další statistické zpracování získaných dat byl použit Microsoft Excel. Za tímto účelem byly atributové tabulky propojených souborů vyexportovány do formátu *.dbf a následně převedeny do formátu Microsoft Excel *.xls.

Protože původní atributové tabulky obsahovaly naměřené souřadnice (Y,X) a výšky bodů, je vyhodnocení naměřených dat z propojených atributových tabulek jen otázkou aplikace matematických a statistických vzorců.

Statistické zpracování získaných dat:

Protože byla anténa systému GPS umístěna po celou dobu měření na cyklistické helmě, získané výšky neodpovídají úrovni terénu. Všechny naměřené výšky byly proto před započítáním statistického vyhodnocování zredukovány do úrovně terénu plošným odečtením 1,8m. S výslednými hodnotami pak bylo provedeno samotné statistické hodnocení:

1. Ze získaných souřadnic bodů v systému S-JTSK (Y_i, X_i – souřadnice i-tého lomového bodu linie) byly pomocí vzorce:

$$l_i = \sqrt{(Y_i - Y_{i-1})^2 + (X_i - X_{i-1})^2} \quad (1)$$

vypočteny v rámci každého z naměřených úseků vzdálenosti sousedních bodů (l_i) a z nich pak určena staničení všech měřených úseků, na jejichž základě byly následně sestavovány grafy porovnávaných veličin. Pro větší přehlednost a vzájemnou porovnatelnost jsou všechny grafy zobrazeny ve směru staničení Hradiště – Krkavec.

2. Dále byly vypočteny absolutní hodnoty (ΔH) rozdílů naměřených výšek vzájemně propojených bodů:

$$\Delta H = |H_i^A - H_i^B| \quad (2)$$

(H^A - body linie 1, H^B – body linie 2) a jejich průměrná hodnota $\overline{\Delta H}$.

3. Vypočtená průměrná hodnota výškových rozdílů posloužila při výpočtu výběrového rozptylu (s^2):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta H_i - \overline{\Delta H})^2 \quad (3)$$

a směrodatné odchytky ($s = \sqrt{s^2}$) rozdílů naměřených výšek na zvolených úsecích vzorové trasy.

Tímto statistickým postupem byly vyhodnoceny jednotlivé měřené úseky vzorové trasy, vzorová trasa celá a její vybrané části rozdělené do skupin dle rozsahu zakrytí oblohy. Zároveň byly na základě vypočtených staničení vytvořeny grafy naměřených výšek a z nich vypočtených rozdílů.

4.1.2 Výsledky statistického hodnocení relativní přesnosti GPS

Relativní výšková přesnost navigační GPS (rozptyl naměřených dat) byla určena pro celou naměřenou trasu, pro každý z jejích úseků (Hradiště – Americká, Americká – F. n. Lochotín, F. n. Lochotín – Košutka a Košutka - Krkavec) a dále pro vybrané úseky rozdělené dle rozsahu zakrytí oblohy do následujících tříd:

- Odkrytý terén s podskupinami:
 - Odkrytý terén – rovina (sklon do 5%)
 - Odkrytý terén – svah (sklon 5% až 17%)
- Zakrytý terén – lesní porost
- Zakrytý terén – městská zástavba
- Ostatní stínění (běžná úroveň zakrytí oblohy – viz níže)

Za účelem dělení naměřených dat do uvedených tříd byla svažitost terénu hodnocena pomocí rastru sklonů povrchu. Ten byl vytvořen z vrstevnicového DMT (ZABAGED) pomocí nástroje *Slope (Spatial Analyst – Surface Analysis)*. Tento nástroj přiřadí každé buňce nového rastru hodnotu sklonu terénu vypočtenou z hodnot nadmořských výšek DMT rastru.

Rovina byla pro účely statistického hodnocení definována jako terén se sklonem do 5% (2,25°), svah jako terén se sklonem 5 až 17% (2,25° až 7,65°). Sklon terénu větší než 17% se na zvolené trase vyskytuje jen výjimečně na velmi krátkých segmentech měřených úseků (maximálně několik metrů), které nemohou výsledky hodnocení celých úseků ovlivnit. Z toho důvodu nebyly pro tyto krátké segmenty zaváděny zvláštní hodnotící třídy.

Hodnocené úseky lesních porostů vedou nestejnorodým terénem s proměnlivou svažitostí (většina úseků v rozmezí 0% - 17%), jehož dělení dle sklonu by bylo obtížné. Třída Zakrytý terén, lesní porost proto nebyla dále dělena. Dělena nebyla ani třída Zakrytý terén – městská zástavba, jejíž úseky vedou většinou po rovinném terénu (do 5% sklonu).

Po vyčlenění specifických druhů terénu byly zbylé úseky naměřených linií sjednoceny do třídy Ostatní stínění. Tato třída reprezentuje úseky, jejichž terén nelze zařadit do žádné z výše uvedených kategorií. Jedná se většinou o úseky komunikací na březích řek s proměnlivým stíněním oblohy (osamělé stromy apod.). Nejedná se o přesně specifikovatelnou kategorii. Tento typ terénu se však vyskytuje poměrně často, a tak byl do hodnocení též zahrnut.

GPS měření se neobešlo bez vzniku extrémních odchylek. První z nich, i bez srovnávací linie DMT v grafu výškového profilu dobře rozpoznatelná, vznikla při prvním průjezdu úsekem Americká – F. n. Lochotín na opravovaném mostu v Pražské ulici (staničení 423 – 480m, viz Obr. 4.1.1). Důvodem jejího vzniku může být vliv elektromagnetického pole nízko umístěného provizorního trolejového vedení tramvajové trati. Protože jde o výjimečnou odchylku, která by mohla nepříznivě ovlivnit výsledky hodnocení celého úseku, byla z dalšího hodnocení vyloučena.

Druhá extrémní odchylka byla naměřena na témže úseku při druhém průjezdu. Jedním z důvodů jejího vzniku může být též výše zmíněné trolejové vedení. Vzhledem k delšímu trvání této odchylky je pravděpodobnějším důvodem stínění signálu satelitů budovou polikliniky na Denisově nábřeží, nebo kombinace obou zdrojů rušení. Bez srovnávací linie je tato odchylka hůře rozpoznatelná, a tak nebyla z vyhodnocení vypuštěna (viz též kapitola 4.2.4).

Výsledky hodnocení jednotlivých úseků jsou uvedeny v následujících tabulkách, vytvořené grafy a mapy úseků jsou součástí příloh.

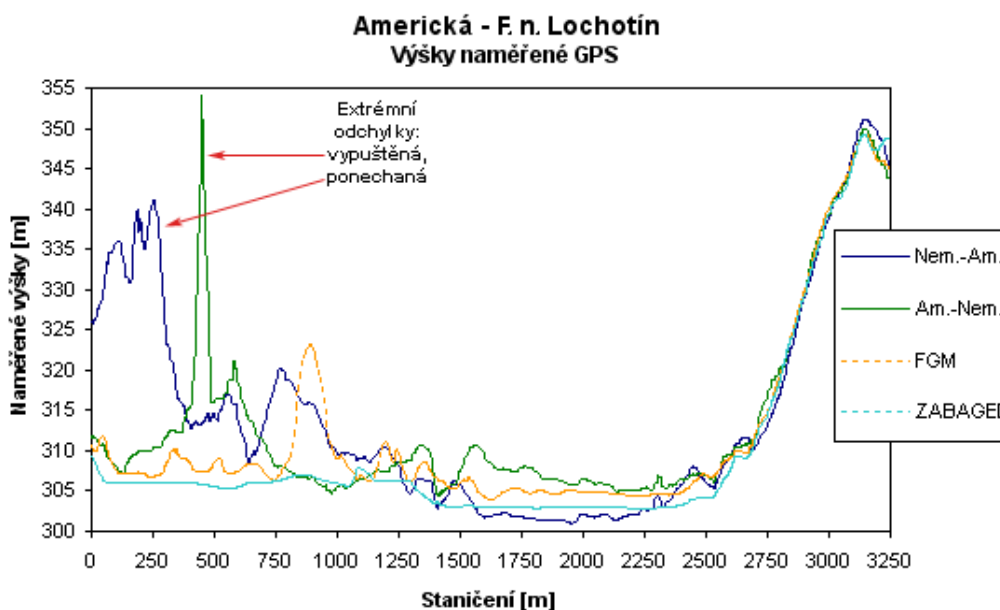
Celá trasa a její úseky:

Tab. 4.1.1 Výsledky hodnocení relativní výškové přesnosti navigační GPS

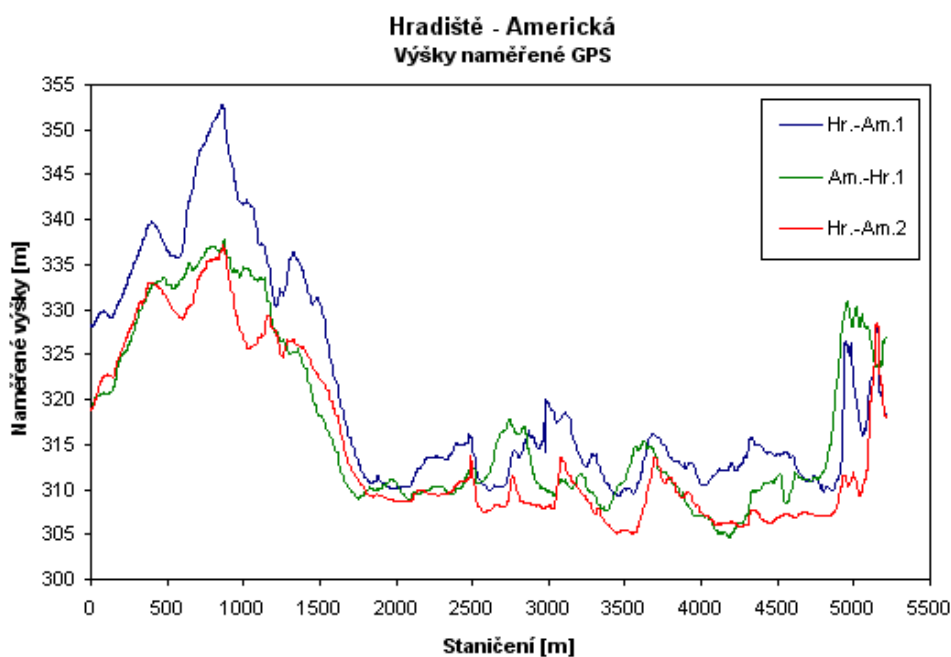
Úsek	Průměrný výškový rozdíl [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylka [m]	Extrémní výškový rozdíl [m]
Celá trasa	7,63	48,28	6,95	30,80
Hradiště - Americká	4,94	7,27	2,70	13,53
Americká - F. n. Lochotín	5,88	57,91	7,61	30,80
F. n. Lochotín - Košutka	9,90	59,47	7,71	26,70
Košutka - Krkavec	10,67	51,98	7,21	28,80
Hradiště - Americká (1 - 2)	5,43	11,95	3,46	15,90
Hradiště - Americká (1 - 3)	6,05	13,15	3,63	16,40
Hradiště - Americká (2 - 3)	3,34	16,41	4,05	20,30

Vysoké hodnoty výběrového rozptylu přesahující 50 m jsou u tří výše uvedených úseků způsobeny lokálním stíněním oblohy na krátkých částech sledovaných úseků. (Závislost velikosti rozptylu měřených výšek na zastínění oblohy prokáže lépe tabulka 4.1.2.) Lokálnost extrémních úseků dokazují i hodnoty směrodatných odchylek v daných úsecích, které uvádějí rozptyl, do něhož padne přibližně 68,3% naměřených výškových rozdílů, případně dvojnásobek těchto hodnot, do něhož padne 95,4% hodnocených výškových rozdílů. (viz [6], str. 15)

Vysoký rozptyl hodnot na úseku Americká – F. n. Lochotín je způsoben vlivem stínění oblohy budovou polikliniky na Denisově nábřeží a alejí ve Štruncových sadech při druhém průjezdu (viz Obr. 4.1.1, linie Nem.-Am.). Na úseku F. n. Lochotín – Košutka, konečná jsou vysoké rozdíly naměřených výšek způsobeny stíněním a odrazy signálu v zástavbě panelového sídliště. Úsek Košutka – Krkavec vede celý lesním porostem a kvalita přijímaného signálu, tedy i určených výšek, je zde celkově nízká.



Úsek Hradiště – Americká byl naměřen třikrát, proto je ve výsledcích uvedeno srovnání jednotlivých dvojic měření (1 - 2, 1 - 3, 2 - 3) i vyhodnocení vzniklé na základě průměrů výškových rozdílů získaných z dílčích výpočtů. Ze třech záznamů dílčích hodnocení úseku Hradiště - Americká je patrný vliv postavení satelitů na přesnost určení polohy. Mezi prvním průjezdem a druhými dvěma je časová prodleva přibližně 1,5 hodiny. Za tuto dobu došlo ke změně postavení satelitů a z grafu naměřených výšek je dobře patrné, že hodnoty naměřené při prvním průjezdu jsou méně přesné než hodnoty z ostatních dvou průjezdů. (viz Obr. 4.1.2, linie Hr.-Am.1) Stejný závěr můžeme určit také z tabulky 4.1.1. - průměrný výškový rozdíl je zde nejnižší v případě porovnání druhých dvou průjezdů.



Dělení dle úrovně zakrytí oblohy:

Pro vyhodnocení relativní přesnosti navigační GPS za různých podmínek měření byla vzorová trasa rozdělena následovně (mapa rozvržení jednotlivých úseků je uvedena v příloze):

- Odkrytý terén - svah pod Fakultní nemocnicí Lochotín (zároveň úsek Odkrytý terén - svah), část trasy u vodárny a zahradnické závody (oba Odkrytý terén - rovina)
- Zakrytý terén – lesy – celý úsek Košutka – Krkavec a část trasy mezi Hradištěm a vodárnou
- Zakrytý terén – městská zástavba – celý úsek F. n. Lochotín – Košutka, konečná. Dále centrum města od mostu Milénia po Štruncovy sady a část trasy mezi Hradištěm a vodárnou
- Ostatní zakrytí – ostatní úseky (s výjimkou mostu v Pražské ulici – z měření byla vypuštěna extrémní odchylka). Reprezentuje obvyklý terén, úroveň zakrytí oblohy na daných úsecích nelze zařadit do žádné z výše uvedených kategorií.(Stínění osamocenými stromy apod. – viz výše)

Tab. 4.1.2 Hodnocení relativní výškové přesnosti navigační GPS dle úrovně zakrytí oblohy

Rozsah zakrytí oblohy	Průměrný výškový rozdíl [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylka [m]	Extrémní výškový rozdíl [m]
Odkrytý terén	2,55	3,20	1,79	6,40
Odkrytý terén - rovina	3,06	3,65	1,91	6,40
Odkrytý terén - svah	1,71	1,35	1,16	4,20
Zakrytý terén - lesy	9,90	47,12	6,86	28,80
Zakrytý terén - městská zástavba	10,26	64,37	8,02	30,79
Ostatní zakrytí	3,75	3,25	1,80	9,00

Z tabulky 4.1.2 je patrná závislost přesnosti měření navigační GPS na přímé viditelnosti satelitů. Rozptyl měřených výšek je tím větší, čím rozsáhlejší je zakrytí oblohy.

Úsek pod Fakultní nemocnicí Lochotín (Odkrytý terén - svah) je ideálním stanovištěm pro měření GPS. Oblast je prostá vegetace a jižní orientace svahu zajišťuje ničím nerušený příjem signálu z mnoha satelitů. Naopak na úseku F. n. Lochotín – Košutka, konečná (Zakrytý terén – městská zástavba) je jižní stínění výhledu doplněno četnými odrazy signálu o panelovou zástavbu a hodnoty rozdílů naměřených výšek jsou ve výsledku horší než v případě lesního porostu.

4.2 Zhodnocení absolutní přesnosti navigační GPS

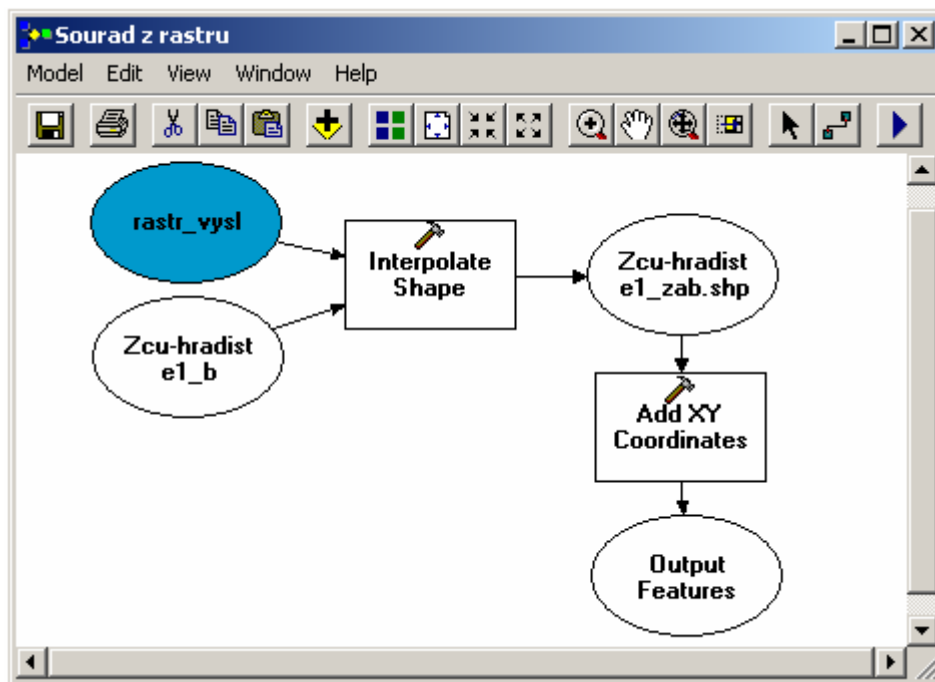
Bereme-li relativní přesnost navigační GPS jako vzájemnou odlehlost dvou a více naměřených linií (souborů lomových bodů), absolutní přesností navigační GPS je odlehlost naměřené linie od skutečného zemského povrchu. Zanedbání polohových rozdílů propojených lomových bodů linií naměřených v jednotlivých úsecích trasy, které bylo aplikováno při hodnocení relativní přesnosti, není v případě porovnávání měřených hodnot s terénem vhodné. Každé naměřené linii musí být přiřazeny jí polohově odpovídající hodnoty nadmořské výšky skutečného terénu, a tak se statistické hodnocení rozšiřuje ze čtyř úseků vzorové trasy na deset samostatně naměřených linií (souborů jejich lomových bodů). Pro určení odlehlosti linií od skutečného zemského povrchu byly užity dva dříve připravené digitální modely terénu.

4.2.1 Příprava prostorových dat pro vyhodnocování

Nejsnadnějším postupem, jak porovnat hodnoty výšek naměřených pomocí GPS s výškami z digitálních modelů terénu, je stejně jako v předchozím statistickém hodnocení, přebrat hodnoty výšky z rastrových DMT přímo jednotlivými lomovými body naměřených linií. Znovu tak získáme všechna pro statistické vyhodnocení potřebná data v jedné tabulce a zároveň se tímto postupem sníží zátěž při uchovávání a zpracovávání velkého objemu dat, který představuje rastrová reprezentace povrchu.

Pro každý z deseti souborů dat naměřených pomocí GPS je nutné vytvořit dvě různé "kopie". V každé z nich budou výšky lomových bodů určené pomocí GPS nahrazeny polohově odpovídajícími hodnotami výšek určenými z DMT. Za účelem následného propojení a porovnání získaných dat bude třeba vypsát do atributů nově vzniklých souborů hodnoty souřadnic (X,Y,Z) všech jejich bodů.

Tento postup v praxi znamená použití dvou různých nástrojů ArcToolbox. Pro zjednodušení postupu byl pomocí *Model Builder*, součásti ArcToolbox, vytvořen nový nástrojový model, který propojil nástroje *Interpolate Shape (3D Analyst Tools - Functional Surface)* a *Add XY Coordinates (Data Management Tools - Features)*.



Obr. 4.2.1 ArcToolbox – nástrojový model pro vytváření 3D linie z DMT rastru

Nástroj *Interpolate Shape* vytvoří na základě vstupního souboru *.shp a DMT rastru nový bodový soubor *.shp, jehož prvky mají polohu shodnou s prvky vstupního souboru a výšky přebírají z DMT. Pokud je rozsah vstupního souboru *.shp větší než rozsah rastru, výsledný soubor obsahuje pouze body z průniku vstupních vrstev.

Nástroj *Add XY Coordinates* vyexportuje do atributové tabulky vzniklého souboru souřadnice X,Y,Z jeho bodových prvků (popis nástroje viz kap. 4.1.1).

Vytvořený model byl postupně aplikován na všechny soubory dat získané GPS měřením (soubory lomových bodů) v kombinaci s oběma DMT rastry. Tím vznikly trojice polohově si odpovídajících linií, které reprezentovaly rozdílné hodnoty nadmořské výšky - výsledky GPS měření a výšky převzaté ze dvou různých DMT.

Pro potřeby statistického hodnocení bylo dále třeba převést získané hodnoty výšek do jedné tabulky. Toho bylo stejně jako v předešlé kapitole dosaženo pomocí nástroje *Join* (propojení atributů na základě polohy).

4.2.2 Problematika přesnosti porovnávaných dat

Výšky získané měřením systémem GPS jsou určeny v odlišném výškovém systému než výšky reprezentované digitálními modely terénu. V Evropě je dnes běžně užíván Baltský systém normálních výšek (Bpv). Nadmořské výšky jsou určovány jako vertikální vzdálenosti stanoviště od úrovně geoidu (střední hladiny referenčního moře) ve směru místní normály referenčního elipsoidu. V případě normálního výškového systému Bpv je za referenční

hladinu zvolena střední hladina Baltského moře. Oproti tomu aparatury GPS měří výšky v elipsoidickém výškovém systému. Tento systém definuje výšky jako vertikální vzdálenosti stanoviska od elipsoidu, jehož odlehlost od geoidu může být až 150m. Na našem území se odlehlost těchto základních ploch (geoidu a elipsoidu) projevuje výškovým rozdílem elipsoidických výšek GPS a nanivelovaných výšek Bpv v rozmezí 41 až 47m. Z tohoto důvodu musí být pro výšky naměřené pomocí GPS zavedeny pomocí modelů geoidu opravy pro redukci do výškového systému Bpv.

Moderní GPS aparatury mají dnes model geoidu přímo zabudovaný a určené výšky jsou převedené do baltského výškového systému již v rámci výpočtu souřadnic. Přesnost transformovaných výšek ale závisí na podrobnosti vestavěného modelu geoidu. Odchytky určených nadmořských výšek se mohou u navigačních GPS systémů pohybovat jen vlivem nepřesnosti modelu geoidu v rozmezí 40cm až 2m [10]. Tato nepřesnost nemá vliv na hodnocení relativní výškové přesnosti GPS. V jednom místě je velikost opravy konstantní a při výpočtu rozdílů naměřených výšek se tato oprava vyruší. Do hodnocení absolutní výškové přesnosti se ale tato odchylka zapojuje a má přímý vliv na získané výsledky statistického hodnocení. Pokud budou hodnoty odchylek naměřených výšek a výšek určených z digitálních modelů terénu odpovídat normálnímu rozdělení, je možné hodnotu chyby v redukci naměřených elipsoidických výšek odhadnout na základě posunu vrcholu grafu tohoto rozdělení. V opačném případě je nutné při aplikaci výsledků hodnocení tuto blíže neurčenou chybu zohlednit.

Jak již bylo uvedeno dříve, rozsah FGM modelu terénu neodpovídá svým rozsahem celé vzorové trase (zobrazuje pouze plzeňské řeky a jejich okolí). Po aplikaci nástroje *Interpolate Shape* na tento rastr neodpovídaly výsledné soubory bodů celkové délce vzorové trasy (body mimo oblast rastru byly nástrojem automaticky vypuštěny). Chybí většina úseku F. n. Lochotín – Košutka (od staničení 441 m dále) a část úseku ZČU – Hradiště, který byl naměřen pouze jedenkrát, a nevyskytuje se v hodnocení relativní přesnosti (fotogrammetrický DMT na tomto úseku začíná až od staničení 1192 m). Úsek Košutka – Krkavec nebyl z důvodu absence fotogrammetrického DMT zobrazen vůbec.

Z omezeného počtu lomových bodů získaných na výše uvedených úsecích vyplývají omezení pro výsledky statistického hodnocení postižených úseků. V případě úseku Košutka – Krkavec je statistické hodnocení možné jen porovnáním s hodnotami ze ZABAGED. V případě zbylých dvou postižených úseků získáme ze statistického hodnocení pomocí FGM modelu pouze výsledky z jejich dílčích částí, které nelze srovnávat s výsledky z modelu ZABAGED. Pro úseky Hradiště – Americká a Americká – F. n. Lochotín tato omezení neplatí.

Při vyhodnocování výškových rozdílů mezi daty získanými z GPS a digitálními modely terénu musí být pamatováno na další omezení. DMT reprezentují pouze zemský

povrch. Různé stavby, jako např. mosty by v nich neměly být zobrazeny. Z uvedených důvodů dochází v místech mostů k rozdílu v určení nadmořských výšek, které nejsou způsobeny nepřesností aparatury GPS. Pro eliminaci těchto nežádoucích vlivů na soubor hodnocených výškových rozdílů musí být mostní úseky naměřených linií ze statistického hodnocení vypuštěny.

Ze statistického hodnocení byly vyloučeny úseky měřených linií ZČU – Hradiště (Tyršův most na staničení 3020 – 3226m a lávka přes řeku Úhlu ve staničení 4600 – 4720m), Americká – F. n. Lochotín (most v Pražské ul., 380 - 497m; tím byla odstraněna i naměřená extrémní odchylka – viz Obr 4.1.1; lávka ve Štruncových sadech, 1295 – 1400m) a F. n. Lochotín – Americká (stejně mosty, staničení 421 - 509m a 1291 – 1393m).

Přesnost digitálních modelů terénu:

Při hodnocení statistických výsledků absolutní výškové přesnosti navigační GPS je třeba brát v úvahu nejen relativní přesnost GPS aparatury (rozptyl naměřených hodnot), ale i přesnost DMT, se kterými byly naměřené výšky porovnávány.

Digitální model terénu vytvořený na základě vrstevnic ZABAGED si mimo chyby z interpolace vrstevnic nese chybu vrstevnic samotných. Dle Instrukce pro tvorbu, obnovu a vydávání Základní mapy ČR 1:10 000 byly mezní odchylky výškopisu dvou- a pětimetrových vrstevnic ZM ČR 1:10 000, ze které je výškopis ZABAGED odvozen, určeny následně:

Tab. 4.2.1 Mezní odchylky výškopisu ZM ČR 1:10 000
(zdroj: [5], str.18)

Sklon terénu [%]	Mezní odchylky výškopisu [m]	
	Přehledný terén	Nepřehledný terén
< 5	1,5	2,0
5 - 10	2,0	3,0
10 - 20	2,5	4,0
20 - 40	3,0	5,0
40 - 60	4,0	6,0
> 60	5,0	7,0

Protože většina měření byla provedena v terénu o sklonu do 10% a v tabulce uvedené hodnoty jsou mezními odchylkami, lze na vzorové trase očekávat odchylku vrstevnic ZABAGED do 2 - 2,5m.

Problémem digitálního modelu terénu vytvořeného na základě fotogrammetricky vyhodnocených dat je automatické zpracování jeho podkladů. Digitální model je vytvořen na základě čtvercové sítě bodů s rozstupem 10m. Při automatickém vyhodnocení leteckých snímků není kladen důraz na umístění měřicí značky na terén, a tak nesou některé

vyhodnocené body hodnoty nadmořské výšky odpovídající úrovni střechy budovy nebo korun stromů. Při následné interpolaci terénu mezi takovými body byly do výsledného DMT zaneseny chyby, které omezují možnost jeho využití jako srovnávací hladiny pro GPS data pouze do otevřeného terénu. (Statistické hodnocení naměřených výšek pomocí tohoto modelu proběhlo po celém rozsahu fotogrammetrického DMT a výsledky z chybami zatížených úseků jsou uvedeny v příloze.)

4.2.3 Statistické hodnocení

Statistické hodnocení absolutní výškové přesnosti navigačního systému GPS proběhlo stejně jako v případě hodnocení relativní přesnosti v Microsoft Excel. Stejně jako v předchozím případě byly určeny vzdálenosti bodů pro výpočet staničení (1) a absolutní hodnoty odchylek odpovídajících si bodů (rozdíly výšek ZABAGED x GPS a FGM x GPS) (2). Z nich pak byly vypočteny výběrové rozptyly (3) a směrodatné odchylky získaných hodnot. Na základě vypočteného staničení byly interpolací vykreslovaných lomových bodů vytvořeny liniové grafy nadmořských výšek a velikostí odchylek mezi daty GPS a DMT.

Pro zhodnocení absolutní přesnosti určení výšek je důležité i rozložení naměřených hodnot vůči srovnávací hladině. Zajímá nás, zda naměřené hodnoty odpovídají normálnímu rozdělení, tedy zda jsou rozloženy rovnoměrně kolem hodnot nadmořských výšek DMT, nebo zda jsou vychýlené jedním směrem. Z toho důvodu byly vypočteny výškové rozdíly GPS a modelů terénu:

$$\Delta H_i^{ZAB} = H_i^{ZAB} - H_i^{GPS} \quad (4),$$

$$\Delta H_i^{FGM} = H_i^{FGM} - H_i^{GPS} \quad (5)$$

a z nich sestaveny grafy četností hodnot těchto odchylek, které prokážou nebo vyvrátí normalitu souboru dat hodnocených na daném úseku. (Zkoumáme rozložení GPS dat okolo DMT, tedy kladné i záporné odchylky – proto není na rozdíl od vzorce (2) ve vzorcích (4) a (5) užitá absolutní hodnota.)

4.2.4 Výsledky statistického hodnocení absolutní přesnosti GPS

Statistické hodnocení absolutní přesnosti navigační GPS proběhlo pro celou zvolenou trasu (všechny naměřené soubory obou průjezdů), pro její čtyři úseky (dva až tři soubory lomových bodů na úsek - viz dříve) a deset jednotlivě naměřených souborů lomových bodů. Dále bylo provedeno statistické hodnocení naměřených dat dělených dle úrovně zakrytí terénu v rozsahu shodném s dělením provedeným při hodnocení relativní přesnosti. Mezi hodnocená data přibyl oproti relativnímu hodnocení úsek ZČU – Hradiště, který byl naměřen pouze jednou a není u něj možné provést hodnocení odlehlosti dat měřených pomocí GPS. Pro možnost vzájemného porovnání výsledků relativního a absolutního hodnocení nebyl tento úsek použit ani při vyhodnocování dat dělených dle úrovně zakrytí oblohy.

Pro každý hodnocený úsek byl proveden grafický test normality naměřených dat, který určil rozložení naměřených hodnot vůči hodnotám digitálních modelů terénu. Liniové grafy porovnávající výšky a zobrazující velikosti odchylek naměřených hodnot od DMT mohly být vytvořeny pouze pro jednotlivé linie, protože v tomto případě nebylo možné provést propojení všech dat naměřených v jednom úseku na společné staničení.

Celá trasa a její úseky:

Nejprve bylo provedeno hodnocení vzorové trasy po jejích jednotlivých úsecích. Protože žádný z úseků (ZČU - Hradiště, Hradiště - Americká, Americká - F. n. Lochotín, F. n. Lochotín - Košutka, Košutka - Krkavec) neprobíhá celý otevřeným terénem, je hodnocení těchto úseků pomocí fotogrammetrického modelu terénu příliš zatíženo výše zmíněnými chybami jeho automatického vyhodnocení. Z toho důvodu jsou v následující tabulce uvedeny pouze výsledky hodnocení výšek pomocí vrstevnicového digitálního modelu a výsledky z fotogrammetrického modelu jsou pro úplnost výsledků uvedeny v příloze.

Tab. 4.2.1 Výsledky hodnocení absolutní přesnosti – DMT ZABAGED

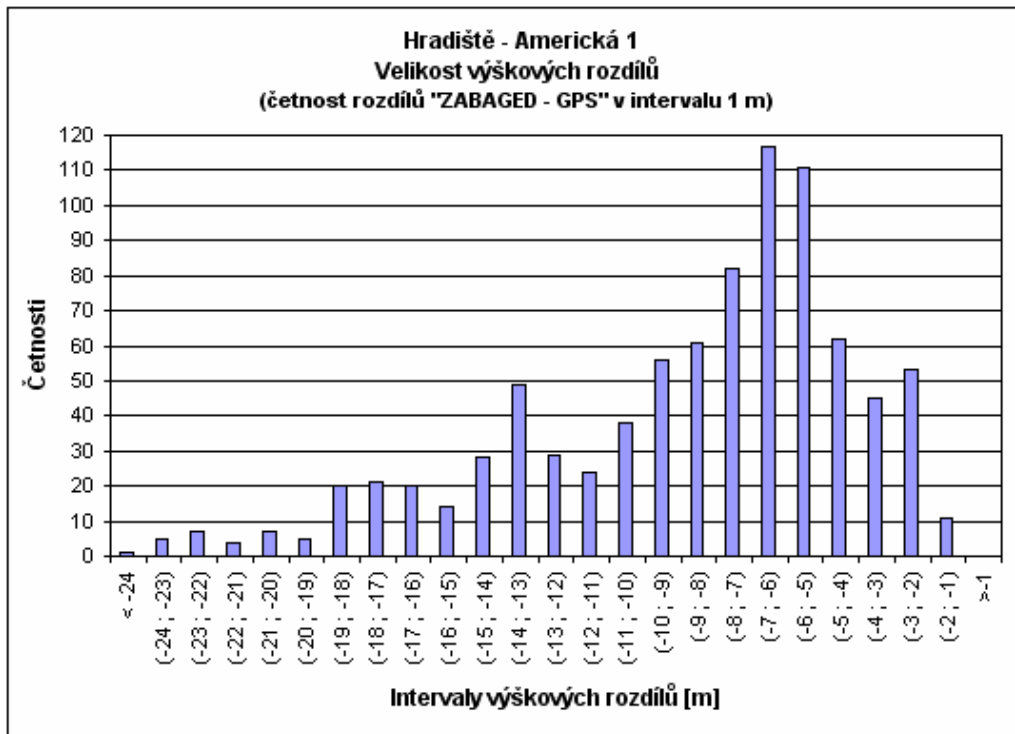
Úsek	DMT ZABAGED			
	Průměrná odchylka od modelu [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylka [m]	Extrémní odchylka od modelu [m]
Celá trasa	5,70	38,76	6,23	35,10
Hradiště - Americká	5,80	26,69	5,17	24,17
Americká - F.n. Lochotín	4,65	48,66	6,98	35,10
F. n. Lochotín - Košutka	8,80	69,36	8,33	31,78
Košutka - Krkavec	16,20	68,65	8,29	34,54
ZČU - Hradiště	5,43	22,01	4,69	21,64
Hradiště -Americká 1	8,78	22,72	4,77	24,07
Americká - F. n. Lochotín	2,79	8,61	2,93	15,99
F. n. Lochotín - Košutka	10,48	79,96	8,94	31,78
Košutka - Krkavec	20,08	40,48	6,36	34,54
Krkavec - Košutka	10,14	52,09	7,22	30,58
Košutka - F. n. Lochotín	7,17	53,67	7,33	29,56
F. n. Lochotín - Americká	6,38	79,69	8,93	35,10
Americká - Hradiště	5,63	31,49	5,61	24,17
Hradiště -Americká 2	3,17	10,56	3,25	18,96

Hodnocení naměřených hodnot dle úrovně zakrytí stanovisek (Tab. 4.2.2) je z hlediska výsledného hodnocení výškové přesnosti důležitější, ale i z tohoto hodnocení lze vyčíst zajímavé informace. Ve spodní části tabulky (hodnocení prvků jednotlivých souborů) si lze povšimnout, že hodnoty výšky získané při druhém průjezdu byly obecně přesnější než

hodnoty z průjezdu prvního. Jen v případě úseku Americká – F. n. Lochotín je tomu naopak. Vysoké hodnoty všech sledovaných veličin na daném úseku při druhém průjezdu jsou způsobeny výkyvem měřených výšek, který byl způsoben stíněním signálu budovou polikliniky na Denisově nábřeží (viz Obr. 4.1.1). (Extrémní odchylka z prvního průjezdu byla odstraněna zároveň s vypouštěnými úseky mostů.)

Všechny výše popsané jevy ukazují na vliv pozice satelitů na přesnost měření. V případě druhého průjezdu bylo zřejmě k dispozici více satelitů. Oproti prvnímu průjezdu ale satelity změnila svou polohu tak, že se z budovy polikliniky, která při prvním průjezdu nepředstavovala pro signál ze satelitů téměř žádnou překážku, stala překážka, která do měření vnesla extrémní odchylky, které by již mohly být z měření vypuštěny. Protože ale k takovéto situaci může dojít i při praktickém užívání navigační GPS, kdy nejsou k dispozici žádné údaje pro porovnání získaných dat a naměřená extrémní výchylka není v grafu na první pohled rozpoznatelná, byly uvedené hodnoty v souboru naměřených dat ponechány. (V tomto případě jde v daném místě o dvě nezávislá pozorování, která vypovídají o možném rozptylu dat změřených v těsné blízkosti vysoké budovy. Při praktickém užívání GPS, kdy je většinou provedeno pouze jedno měření, by nebylo možné zmíněnou chybu jednoduše rozeznat a vypustit nebo opravit.)

Na základě rozdílů výšek (viz vzorce (4) a (5)) byly sestaveny grafy četností odchylek výšek naměřených pomocí GPS od výšek DMT ZABAGED. Tyto grafy (viz Obr.4.2.2 a přílohy) zobrazují počty výškových odchylek rozdělených do jednometrových intervalů. V případě dlouhodobého měření za pevně stanovených okolních podmínek by výsledné grafy měly mít tvar grafu normálního rozdělení. Z jejich posunu vůči nule by poté bylo možné odhadnout systematické chyby měření, jako například výše zmiňovanou nepřesnost modelu geoidu pro opravy elipsoidických výšek do baltského výškového systému.



Obr. 4.2.2 Hradiště - Americká 1, graf četnosti výškových odchylek GPS od DMT ZABAGED

V případě hodnocení jednotlivých bodových souborů a úseků vzorové trati bylo měřeno za proměnlivých podmínek. Výsledné grafy proto tvar normálního rozdělení nemají, nebo se mu blíží jen velmi vzdáleně a z jejich tvaru nelze určit žádnou systematickou chybu měřených dat. (Tvaru normálního rozdělení se nejvíce blíží graf úseku Americká – F. n. Lochotín. Ten byl měřený převážně v odkrytém terénu a z průměru se vymyká i svou vysokou přesností měření.) Velikost odchylky způsobené transformací elipsoidických výšek do baltského výškového systému proto nelze přesně určit, ale vzhledem k velkým výškovým rozdílům (i desítky metrů) a velikostem posunů četnostních maxim výškových rozdílů oproti nule lze konstatovat, že vliv těchto transformačních odchylek, které mohou dosáhnout v nejhorším případě 2m, je celkově malý. Stejně tak tomu je v případě proměnných odchylek vrstevnic ZABAGED, jejichž průměrná hodnota z celé měřené trasy by se měla pohybovat maximálně v oblasti 2 až 2,5m (viz kapitola 4.2.2, Tab. 4.2.1).

Získané grafy četností výškových rozdílů též ukazují, že většina naměřených výšek je v porovnání s výškami vrstevnicového DMT nadhodnocena, přičemž odchylka měřených hodnot výšky s úbytkem přímé viditelnosti satelitů stoupá. Tento jev potvrzují i obecně nižší odchylky zjištěné při porovnání naměřených výšek s fotogrammetrickým modelem terénu, jehož hodnoty nadmořských výšek jsou na mnoha místech vyšší než skutečné hodnoty nadmořských výšek terénu. Fotogrammetrický DMT zobrazuje i budovy a další prvky, které se potenciálně mohou stát rušiči signálu vysílaného ze satelitů. Při zpracování fotogrammetricky vyhodnocené sítě výškových bodů v ArcGIS jsou svislé stěny budov

nahrazeny hladkými plochami (hranatá budova je reprezentována jako kupa, jejíž svahy přesahují půdorys budovy), které vnášejí chyby do srovnávacího výškového profilu hodnocené trasy. Čím blíže projížděné trasy se objekt nachází, tím větší je pravděpodobnost, že ovlivní měření GPS aparatury. Zároveň však na něm ležící fotogrammetricky vyhodnocený bod v daném místě trasy sníží přesnost vyinterpolovaného DMT, čímž se porovnávané dvojice bodů k sobě přiblíží a sníží se tak průměrný výškový rozdíl FGM x GPS. Proto je ve výsledku odchylka GPS dat od hodnot převzatých ze ZABAGED větší než při porovnání s FGM, což vede ke zdánlivě přesnějším výsledkům v případě porovnání GPS dat s FGM modelem. (Výsledky hodnocení výškové přesnosti pomocí fotogrammetrického DMT jsou uvedeny v příloze práce.)

Dělení dle úrovně zakrytí oblohy:

Získané hodnoty odchylek GPS měření od digitálních modelů terénu byly rozděleny dle druhu terénu, ve kterém bylo měření provedeno. Aby bylo možné porovnat výsledky hodnocení absolutní a relativní přesnosti navigační GPS, byly pro reprezentaci vzorových úrovní zakrytí terénu zvoleny shodné úseky jako v případě hodnocení relativní přesnosti. Na daných úsecích byla vyhodnocována data získaná ze všech odpovídajících souborů zároveň.

Z důvodu omezeného rozsahu dat získaných z fotogrammetrického DMT mohly být s tímto modelem porovnány jen úseky Otevřený terén a Ostatní zakrytí. Ve výsledkové tabulce jsou uvedeny pouze hodnoty týkající se otevřeného terénu. V ostatních případech ovlivňuje výsledky hodnocení vnitřní nepřesnost fotogrammetrického modelu, a tak zde nejsou brány v úvahu (pro úplnost jsou uvedeny pouze v příloze této práce).

Tab. 4.2.2 Hodnocení absolutní výškové přesnosti navigační GPS dle úrovně zakrytí oblohy

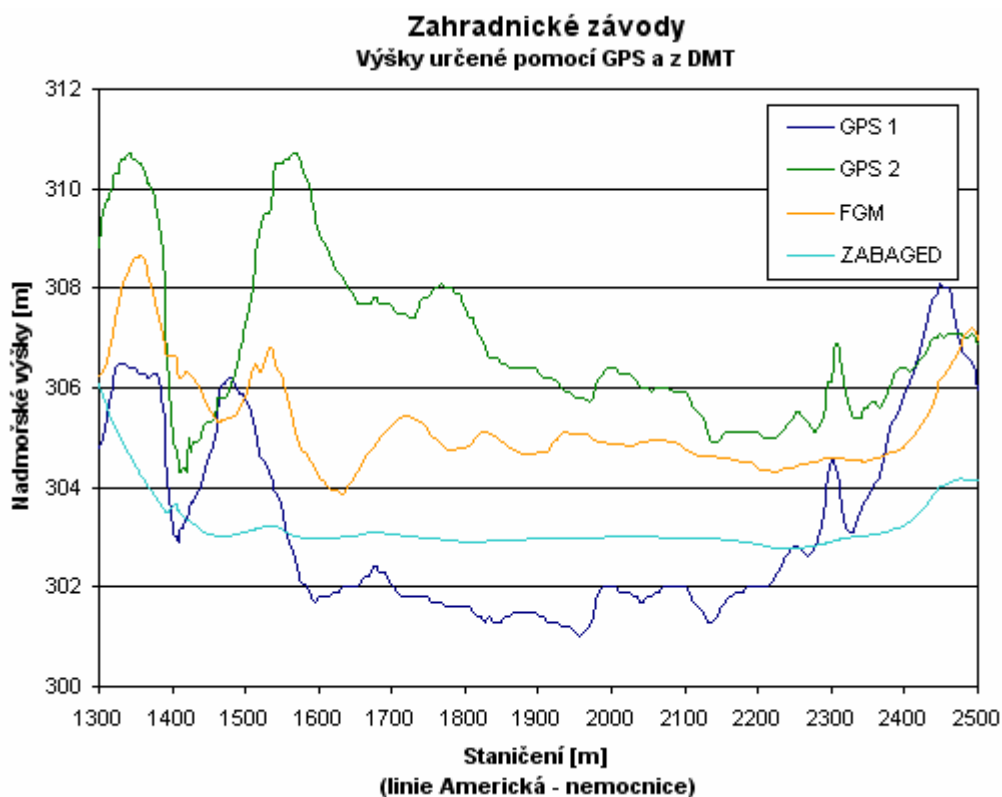
Původ DMT	Rozsah zakrytí oblohy	Průměrná odchylka od modelu [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylka [m]	Extrémní odchylka od modelu [m]
ZABAGED	Odkrytý terén	1,78	1,67	1,29	5,14
	Odkrytý terén - rovina	2,45	1,38	1,17	5,14
	Odkrytý terén - svah	0,8	0,49	0,7	2,62
	Zakrytý terén - lesy	14,43	71,25	8,44	34,54
	Zakrytý terén - městská zástavba	8,47	66,53	8,16	31,78
	Ostatní zakrytí	3,78	9,13	3,02	14,62
FGM	Odkrytý terén	1,3	0,98	0,99	4,07
	Odkrytý terén - rovina	1,57	1,2	1,09	4,07
	Odkrytý terén - svah	0,91	0,41	0,64	2,33

Ze získaných výsledků je jasně patrná závislost velikosti odchylky naměřených výšek na rozsahu zakrytí oblohy na stanovisku. Stejně jako u hodnocení relativní přesnosti dosahuje nejpresnějších výsledků měření provedené na odkrytém svažitém terénu s jižní orientací.

Zajímavé výsledky vyplývají z porovnání hodnot lesního terénu a městské zástavby. V případě hodnocení relativní přesnosti GPS se tyto dva reprezentanti terénu umístili opačném pořadí (průměrný výškový rozdíl hodnot naměřených v lese 9,9m, v případě města 10,26m).

Všimněme si též dolní části tabulky. Pouze v případě plně otevřeného terénu si fotogrammetrický digitální model terénu nenese žádné vnitřní chyby vzniklé výškovým vyhodnocením budovy nebo vrcholků vegetace a při reprezentování takového povrchu je minimálně srovnatelný s interpolovanými vrstevnicemi. V případě rovinatého terénu je pak bodová reprezentace výškopisu přesnější než reprezentace dvoumetrovými vrstevnicemi, které jsou zde pro vytvoření přesného modelu terénu příliš řídké. Podíváme-li se na výškový graf z oblasti zahradnických závodů (Obr. 4.2.3), je nedokonalá reprezentace rovinaté oblasti vrstevnicemi patrná. Celý úsek vedoucí mírně zvlněným terénem je v případě linie ZABAGED reprezentován téměř rovnou čarou, zatímco linie reprezentující GPS měření a fotogrammetrický DMT jsou více tvarované (kopírují terén přesněji).

Z těchto důvodů je vhodné brát hodnocení otevřeného terénu pomocí fotogrammetrického DMT jako přesnější.

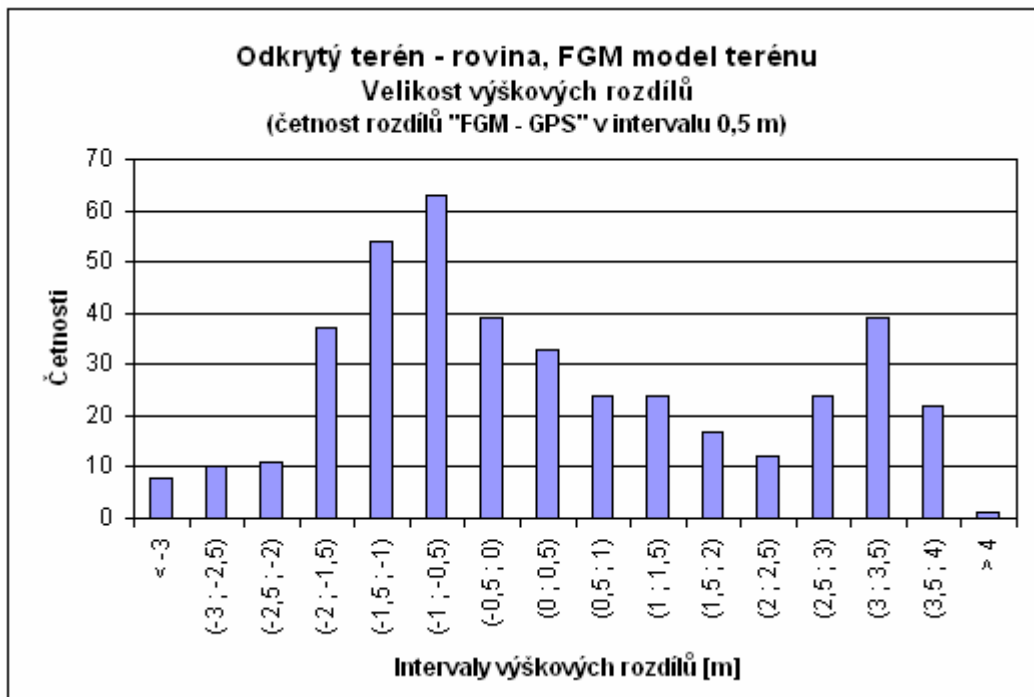


Obr. 4.2.3 Zahradnické závody – nedokonalá reprezentace rovinatého terénu vrstevnicemi (linie ZABAGED)

Stejně jako při hodnocení jednotlivých úseků vzorové trasy byly i pro hodnocení dle úrovně zakrytí oblohy vytvořeny grafy četností výškových odchylek GPS dat od digitálních modelů terénu. Grafy byly vytvořeny pro všechna porovnání s modelem ZABAGED. U modelu FGM byly grafy vytvořeny pouze v případě rovinného terénu, výsledky z ostatních úseků nejsou pro vnitřní chyby FGM modelu hodnoceny. Grafy byly vytvořeny s jednometrovým intervalem zobrazovaných hodnot, pouze v případě odkrytého terénu byly intervaly pro celkově malé výškové odchylky zjemněny na půlmetrové. (Odchylky se v odkrytém terénu pohybují pouze v intervalu -2,5 až 2 m.)

Protože byly hodnoceny úseky s podobnými podmínkami měření, lze u grafů předpokládat tvar blížící se tvaru normálního rozdělení více než tomu u hodnocení po jednotlivých liniích. Tento předpoklad výsledky hodnocení opravdu potvrdily. Ve všech případech je tvar normálního rozdělení patrný, pouze u kategorie Odkrytý terén je interpretace výsledných grafů složitější:

V oblasti rovinného terénu se na výsledném grafickém hodnocení projevil poměrně velký rozptyl dat naměřených v oblasti zahradnických závodů, způsobený pravděpodobně různým postavením satelitů při prvním a druhém průjezdu (viz průměrná odchylka 3,06m relativního hodnocení – Tab.4.1.2 a Obr.4.2.3). Druhý úsek včleněný do odkrytého rovinného terénu - úsek u vodárny, je vyrovnaný a svou malou délkou do výsledků příliš nezasahuje. Prvky každého ze souborů naměřených v zahradnických závodech převažují na opačných stranách srovnávacích rovin (nad a pod DMT). Zároveň však naměřené hodnoty každého z průjezdů odpovídají normálnímu rozdělení s určitým posunem vůči nule daným výchylnou naměřených dat. Proto po společném vyhodnocení obou souborů vznikl graf s vrcholy v intervalech (-1,5 ; -1) a (3 ; 3,5), který svým tvarem normálnímu rozdělení neodpovídá (viz Obr. 4.2.4). (V případě modelu ZABAGED jsou maxima umístěna v intervalech (-3,5 ; -3) a (1 ; 1,5). Tato odlišnost je dána výše uvedenou nepřesnou interpretací rovinných oblastí vrstevnicemi.) Normalita dat naměřených při jednotlivých průjezdech vypovídá o přesnosti měření v odkrytém terénu. Protože nebyla naměřena jednotná jednosměrná výchylna dat GPS měření, rozdíl v poloze maxim a jejich výchylny od nuly lze vysvětlit pouze rozdílným postavením satelitů při jednotlivých průjezdech.



Obr 4.2.4 Graf četností výškových odchylek v odkrytém rovinném terénu – vliv úseku zahradnické závody

Ze vzájemného srovnání četnostních grafů otevřeného terénu vyplývá naopak shoda v oblasti jižního svahu. Ten je dobře popsán oběma modely terénu a zároveň potvrdil, že je nejlepším stanovištěm pro GPS měření. Všechny výškové odchylky padly u obou DMT do intervalu (-2,5 ; 2,5) m. Zároveň je nejvíce odchylek GPS měření a DMT menších než 0,5m. Oba grafy (hodnocení pomocí ZABAGED i FGM dat) odpovídají normálnímu rozdělení, na němž navíc není patrná žádná systematická chyba metody (vrchol grafu v oblasti nuly).

Podobný jev jako v případě otevřeného rovinného terénu můžeme sledovat na grafu lesních úseků. Na hodnocení lesních úseků má největší vliv úsek Košutka – Krkavec. Na něm, stejně jako v případě zahradnických závodů došlo k větším rozdílům měření při prvním a druhém průjezdu. Tato měření ale na rozdíl od zahradnických závodů spojuje jednosměrná odchylka od DMT. Proto není v tomto případě jev rozdvojení grafů normálního rozdělení tolik patrný. Poměrně velká odchylka maximálních četností od nuly je způsobena velkou mírou stínění oblohy na celém hodnoceném úseku. Posun téměř celého grafu do záporných hodnot dokazuje již dříve zmíněnou myšlenku neustálého nadhodnocování nadmořské výšky stanovištěk aparaturou GPS.

Záporný posun četnostních grafů nalezneme i v případě zbylých dvou kategorií (úseky městské zástavby a ostatní úseky). I grafy těchto úseků mají tvar normálního rozdělení. V obou případech jsou jejich maxima umístěna do intervalu (-2;-1)m. Tento jev by mohl ukazovat na vliv společné systematické chyby měření, ale vzhledem k rozdílným vrcholům maxim u ostatních hodnocených kategorií zakrytí oblohy (lesy cca -13,5m, odkrytý svah cca -0,25m a odkryté roviny cca +1m) jde spíše o náhodnou shodu. Případná systematická chyba

by se měla nejvíce projevit na otevřeném svažitém terénu, který je z hlediska měření nepřesnější, a tedy nejméně ovlivněný náhodnými chybami ze stínění oblohy.

Na základě hodnocených dat se nepodařilo přesně vyčíslit žádnou systematickou chybu měření. Zároveň je však nutné upozornit na neustálé nadhodnocování nadmořských výšek měřených aparaturou GPS. Tyto odchylky od nadmořských výšek skutečného terénu, reprezentovaného v této práci digitálními modely terénu, nejsou konstantní, ale mění se v závislosti na rozsahu zakrytí oblohy.

5. Závěr

Za účelem zhodnocení výškové přesnosti navigační GPS byla v Plzni a jejím okolí provedena dvě nezávislá měření na trase (ZČU, Bory -)Hradiště – centrum města, Americká – Fakultní nemocnice Lochotín – Košutka, konečná stanice tramvaje č. 4 – Krkavec. Naměřená data byla vyexportována z formátu *.shp do tabulek Microsoft Excel, v nichž bylo provedeno statistické vyhodnocení naměřených výšek.

Statistické hodnocení proběhlo ve dvou částech. Nejprve byla zhodnocena relativní přesnost měření - velikost rozptylu hodnot nadmořských výšek určených pomocí GPS v různých časech na stanoviskách s blíže určenými podmínkami měření. Druhá část statistického hodnocení již zkoumala přesnost vlastního určení nadmořských výšek pomocí GPS.

Protože je tato práce zaměřena na užití navigační GPS při turistice a podobných aktivitách, byla dlouhodobá měření na jednom stanovisku nahrazena měřeními velkých souborů dat za jízdy na kole. Získaná data pak byla pro účely hodnocení rozdělena dle rozsahu stínění oblohy do kategorií městské zástavby, lesních úseků a úseků otevřeného terénu. Data z úseků, které neodpovídaly žádné výše uvedené kategorii, byla sjednocena do kategorie Ostatní zakrytí.

Pro určení relativní přesnosti měřených výšek byla využita dvě nezávislá měření. V rámci výše zmíněných kategorií byly hodnoceny výškové odlehlosti párů polohově si nejvíce odpovídajících bodů prvního a druhého průjezdu. (GPS aparatura neměřila souvisle, ale určovala svou polohu v časovém intervalu jedné vteřiny.) Z nich pak byly určovány průměrné velikosti odchylek naměřených výšek, jejich výběrové rozptyly a směrodatné odchylky.

Stejně statistické výpočty byly použity i v případě hodnocení absolutní přesnosti. Při tomto hodnocení byly nadmořské výšky určené GPS aparaturou porovnávány se dvěma digitálními modely terénu. Protože je v případě určování absolutní výškové přesnosti potřebné znát mimo velikosti odchylek dat z GPS od terénu i jejich rozložení (zda GPS aparatura v daném místě “nadměřuje nebo podměřuje“), byly na závěr hodnocení vytvořeny grafy četností výškových odchylek. V případě vysoké přesnosti měření mají mít tyto grafy tvar normálního rozdělení. Jakákoliv jejich odchylka ve tvaru, případně jejich posun, ukáže míru nevyváženosti měřených dat, případně i systematické chyby v určování výšek.

V obou případech statistického hodnocení byla zpracována i hodnocení jednotlivě měřených úseků vzorové trasy. Výsledky těchto hodnocení vypovídají o přesnostech měření za proměnlivých vnějších podmínek a pro závěrečné zhodnocení výškové přesnosti navigační GPS nejsou dostatečně průkazné.

Již ve výsledcích hodnocení relativní přesnosti je patrná závislost přesnosti měření na úrovni zastínění oblohy. Rozdíly měřených výšek mezi daty prvního a druhého průjezdu jsou tím větší, čím více oblohy bylo v daném typu terénu stíněno. Jako nejpřesnější proto vyšla měření na úsecích s otevřeným terénem. Odchylna výšek naměřených v otevřeném terénu při dvou průjezdech dosahuje hodnot $2,55 \pm 1,79\text{m}$ (průměrná odlehlost dat a jejich směrodatná odchylna). Z podrobnějšího rozboru odkrytých úseků vyplývá nejvyšší přesnost měření na odkrytém svahu s jižní orientací, kde jsou hodnoty odlehlosti porovnávaných dat ještě nižší.

Na druhém konci pomyslného žebříčku přesnosti se umístily úseky vedoucí městskou zástavbou. Vlivem častého stínění a odrazů signálu satelitů dosahují vzájemné odchylny naměřených výšek $10,26 \pm 8,02\text{m}$.

Hodnocené kategorie lze dle přesnosti výsledků seřadit následovně: Odkrytý terén, svah (nejpřesnější) – Odkrytý terén, rovina – Ostatní stínění – Zakrytý terén, lesy - Zakrytý terén, městská zástavba (největší odlehlost porovnávaných dat). (Výsledky hodnocení relativní přesnosti a jejich podrobnější rozborů jsou uvedeny v kapitole 4.1.2.)

Při hodnocení absolutní přesnosti navigační GPS v určování výšek bylo nutné ve většině případů ustoupit od hodnocení pomocí fotogrammetrického modelu terénu. Kvůli jeho vnitřním nepřesnostem (blíže kapitola 4.2.2) lze za věrohodné považovat pouze výsledky z úseků otevřeného terénu. Hodnocení všech ostatních úseků (pro možnost srovnání byly rozděleny do stejných kategorií jako při hodnocení relativní přesnosti) proto proběhlo pouze pomocí DMT vytvořeného na základě vrstevnic ZABAGED.

I v případě výsledků hodnocení absolutní výškové přesnosti byla prokázána závislost přesnosti měření na úrovni zakrytí oblohy. Hodnoty odchylek naměřených dat od modelů terénu se pohybují od $0,80 \pm 0,70\text{m}$ v otevřeném svažitém terénu po $14,33 \pm 8,44\text{m}$ v lesních úsecích. Hodnocené kategorie terénu lze zde seřadit v pořadí: Odkrytý terén, svah – Odkrytý terén, rovina – Ostatní stínění – Zakrytý terén - Zakrytý terén, lesy. Hodnocené kategorie se tedy umístily s výjimkou zástupců zakrytého terénu na shodných příčkách (podrobněji viz kapitola 4.2.4).

Na výsledcích hodnocení jednotlivých samostatně měřených souborů dat si lze povšimnout závislosti přesnosti určených výšek na postavení referenčních satelitů. Měření prováděná při druhém průjezdu byla přesnější, než při průjezdu prvním. Tato skutečnost je patrná i na vytvořených grafech naměřených výšek. Vliv počtu a geometrického uspořádání satelitů na přesnost určených výšek se projevil především v úsecích městské zástavby. Při obou průjezdech panelovými sídlišti Lochotín a Košutka dosáhly extrémní odchylny měřených dat od modelu terénu hodnot až 30m. Při každém průjezdu však k těmto chybám měření došlo vlivem odlišného postavení satelitů v jiné části měřeného úseku (viz přílohy, graf F. n. Lochotín – Košutka, výšky naměřené GPS).

Další zajímavou skutečností se podařilo objevit pomocí četnostních grafů. Dle předpokladů by odchylny výšek naměřených za podobných vnějších podmínek měly

odpovídat normálnímu rozdělení. Měly by se tedy vyskytovat stejně často nad i pod výškovým profilem trasy určeným z DMT. Odchylky naměřených výšek rozdělených do kategorií dle úrovně zakrytí oblohy sice normálnímu hodnocení přibližně odpovídají, ale téměř všechny jejich četnostní grafy (mimo úseku odkrytého svažitého terénu, který vykazuje velmi vysokou přesnost měření) jsou posunuty oproti nule. Přesněji řečeno, použitá GPS aparatura neustále “nadměřovala“ (s její pomocí určené výšky byly téměř neustále vyšší než výšky odvozené z DMT). Jedním z možných důvodů této odchylky může být nepřesná transformace měřených elipsoidických výšek do baltského výškovému systému (viz kapitola 4.2.2). Ale protože celkové výchylky četnostních grafů jsou vyšší než odchylka, která může při transformaci nastat, nepodařilo se tuto teorii potvrdit ani vyvrátit. S největší pravděpodobností je výsledná výchylka určovaných výšek způsobena kombinací několika různých faktorů.

Nakonec zbývá zhodnotit údaj výškové přesnosti navigační GPS uvedený v úvodu práce. V encyklopedii Wikipedia je pod heslem GPS [9] uváděna orientační výšková přesnost navigační GPS 19m. Tuto hodnotu můžeme srovnat s výsledkem hodnocení absolutní přesnosti dat změřených na celé trase při obou průjezdech. Výsledná hodnota průměrné odchylky těchto dat $5,70 \pm 6,23\text{m}$ je nižší než hodnota uváděná v encyklopedii. Vezměme však zároveň v úvahu hodnotu odchylky $14,43 \pm 8,44\text{m}$ získanou při hodnocení lesních úseků. Pokud je uváděná hodnota výškové přesnosti 19m zamýšlená jako možná odchylka měřených výšek na libovolném stanovisku (tedy i za špatných podmínek měření), nelze ji prohlásit za chybnou.

Literatura

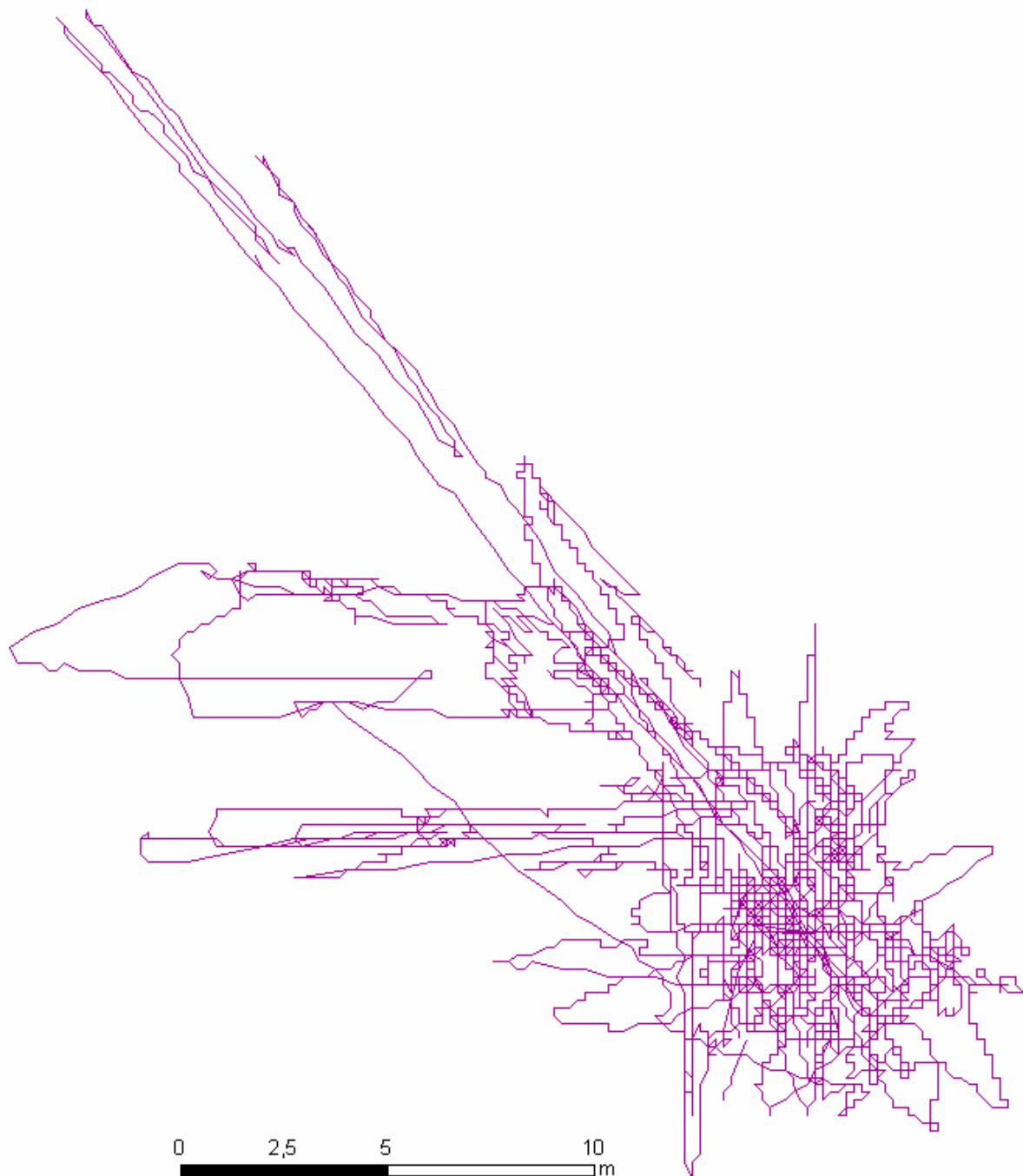
- [1] Fajt , Jaromír. Geometrické transformace v GIS [online]. [cit. 7.10.2005]. Dostupné z: < <http://gis.zcu.cz/studium/ugi/referaty/05/GeometrickeTransformace/index.html> >
- [2] Ježek, J. , Sklenička, R. Transformace souřadnicových systémů ve vybraných GIS aplikacích. In 16. kartografická konference Mapa v informační společnosti sborník referátů. Brno: Univerzita obrany, 2005, s.142-147. ISBN 80-7231-015-1.
- [3] ORMSBY, T., NAPOLEON, E., BURKE, R., GROESSL, C., FEASTER, L. Getting to know ArcGis Desktop: Basics of ArcView, ArcEditor, and ArcInfo. Redlands, California: ESRI Press, 2003. 546 s. ISBN 1-879102-89-7.
- [4] Pacina, Jan. Popis principů fungování vybraných prostorových analýz a jejich implementace v nekomerčním GIS GRASS pro názornou výuku [online]. [cit. 27.5.2006]. Dostupné z: <http://www.gis.zcu.cz/studium/dp/2005/Pacina__Popis_principu_fungovani_vybranych_prostorovych_analyz_a_jejich_implementation_v_nekomercnim_GIS_GRASS_pro_nazornou_vyuku__DP.pdf >
- [5] Šeblová, Václava. GIS řešení předpovědi rozsahu povodně vhodné pro menší a malé obce [online]. [cit. 18.5.2006]. Dostupné z: <http://www.gis.zcu.cz/studium/dp/2004/Seblova__GIS_reseni_predpovedi_rozsahu_povodne_vhodne_pro_mensi_a_male_obce__DP.pdf>
- [6] Tölg, Tomáš a kolektiv.Fyzikální praktikum. 5. vyd. ZČU, Plzeň, 2002. ISBN: 80 – 7082 – 851 – X.
- [7] Tuček, J. Geografické informační systémy – principy a praxe. Computer Press, 1998. ISBN: 80-7226-091-X
- [8] Urban, Petr. Nebojte se transformací. ArcRevue, 2003, roč. 12, č. 2, str. 22 – 23. ISSN: 1211 – 2135. Dostupné z: <http://www.arcdata.cz/download/arcrevue/02_2003.pdf >
- [9] Global Positioning Systém [online]. Wikipedie, Otevřená encyklopedie, 18.5.2006. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/GPS>>.
- [10] Konzultace, Pavel Novák, Plzeň 22.5.2006

Seznam příloh

Praktický test polohové přesnosti navigační GPS.....	A.
Průjezdni plán vzorových měření.....	B.
Výsledky hodnocení výškové přesnosti.....	C.
Grafické výstupy statistických hodnocení.....	D.

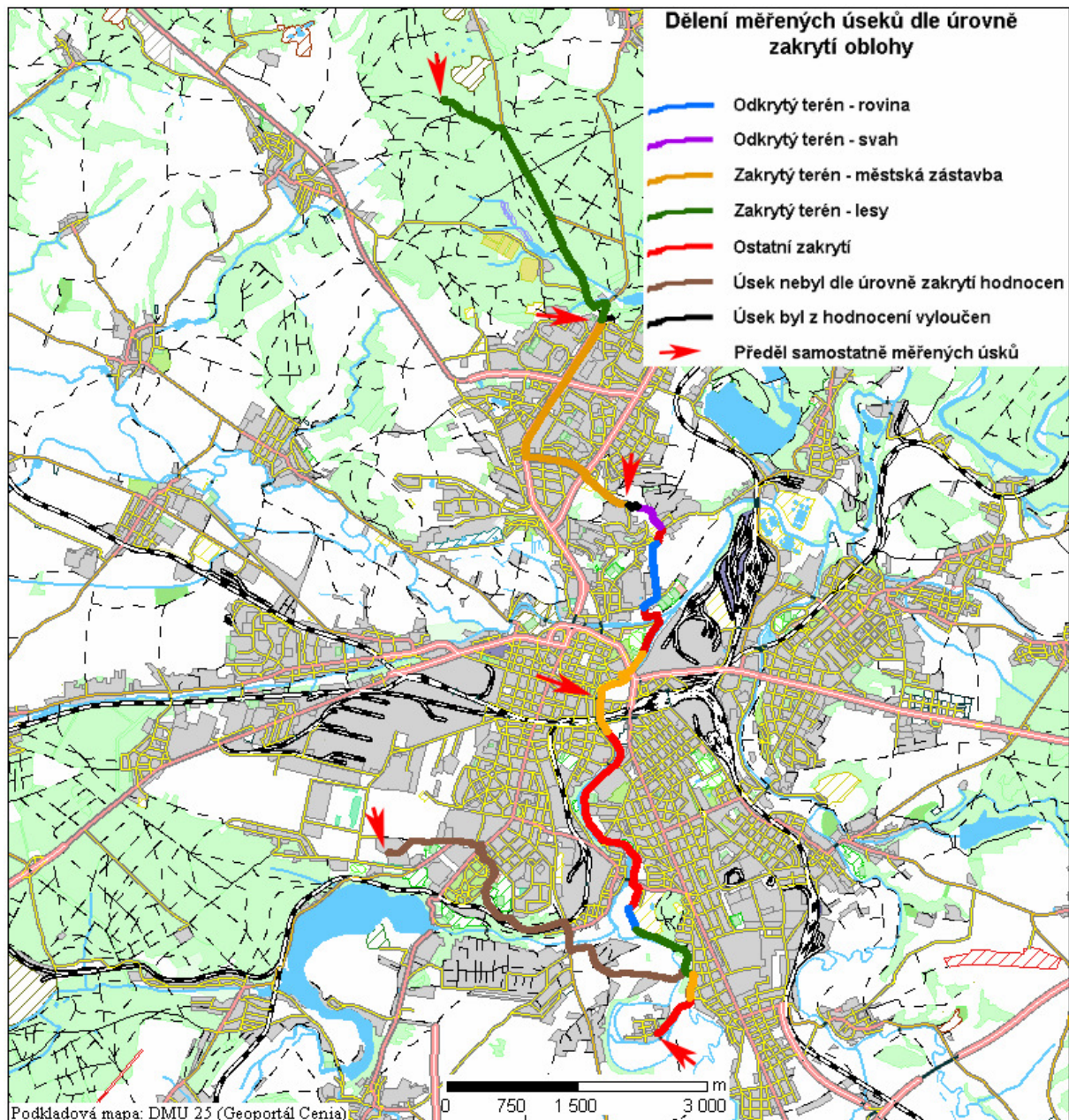
A. Praktický test polohové přesnosti navigační GPS

Tento test byl proveden v říjnu roku 2005 pomocí navigační GPS Navilock BT-338. Touto aparaturou byla měřena i zdrojová data pro tuto práci. Test spočíval v nepřetržitém (cca 4 hodiny) měření na jednom bodě. Z grafického znázornění výsledků měření je možné vyčíst odchylku měřené polohy až 25m.



B. Průjezdní plán vzorových měření

V práci byla hodnocena data naměřená v Plzni a okolí. Měření probíhalo na trase ZČU, Bory – Hradiště – centrum města, Americká – Fakultní nemocnice Lochotín – Košutka – Krkavec. Na přiloženém plánu je zakreslena celá měřená trasa. Konce jednotlivých úseků jsou označeny červenými šípkami, barevné dělení linie reprezentuje rozdělení naměřených dat do skupin dle úrovně zakrytí oblohy.



C. Výsledky hodnocení výškové přesnosti

Výsledky hodnocení výškové přesnosti navigační GPS jsou uvedeny také v textu práce (kapitoly 4.1.2 a 4.2.4). Zde uvedené výsledky jsou doplněny o v textu neuvedené výsledky hodnocení absolutní přesnosti pomocí fotogrammetrického digitálního modelu terénu. Tyto výsledky jsou zatíženy vnitřní chybou fotogrammetrického DMT (viz kapitola 4.2.2), což je třeba brát při práci s nimi na vědomí.

Výsledky hodnocení relativní přesnosti

Hodnocení jednotlivých úseků :

Úsek	Průměrný výškový rozdíl [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylka [m]	Extrémní výškový rozdíl [m]
Celá trasa	7,63	48,28	6,95	30,80
Hradiště - Americká	4,94	7,27	2,70	13,53
Americká - F. n. Lochotín	5,88	57,91	7,61	30,80
F. n. Lochotín - Košutka	9,90	59,47	7,71	26,70
Košutka - Krkavec	10,67	51,98	7,21	28,80
Hradiště - Americká (1 - 2)	5,43	11,95	3,46	15,90
Hradiště - Americká (1 - 3)	6,05	13,15	3,63	16,40
Hradiště - Americká (2 - 3)	3,34	16,41	4,05	20,30

Hodnocení úseků dělených dle úrovně zakrytí oblohy:

Rozsah zakrytí oblohy	Průměrný výškový rozdíl [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylka [m]	Extrémní výškový rozdíl [m]
Odkrytý terén	2,55	3,20	1,79	6,40
Odkrytý terén - rovina	3,06	3,65	1,91	6,40
Odkrytý terén - svah	1,71	1,35	1,16	4,20
Zakrytý terén - lesy	9,90	47,12	6,86	28,80
Zakrytý terén - městská zástavba	10,26	64,37	8,02	30,79
Ostatní zakrytí	3,75	3,25	1,80	9,00

Výsledky hodnocení absolutní přesnosti

Hodnocení jednotlivých úseků, DMT ZABAGED:

Úsek	DMT ZABAGED			
	Průměrná odchylna od modelu [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylna [m]	Extrémní odchylna od modelu [m]
Celá trasa	5,70	38,76	6,23	35,10
Hradiště - Americká	5,80	26,69	5,17	24,17
Americká - F.n. Lochotín	4,65	48,66	6,98	35,10
F. n. Lochotín - Košutka	8,80	69,36	8,33	31,78
Košutka - Krkavec	16,20	68,65	8,29	34,54
ZČU - Hradiště	5,43	22,01	4,69	21,64
Hradiště -Americká 1	8,78	22,72	4,77	24,07
Americká - F. n. Lochotín	2,79	8,61	2,93	15,99
F. n. Lochotín - Košutka	10,48	79,96	8,94	31,78
Košutka - Krkavec	20,08	40,48	6,36	34,54
Krkavec - Košutka	10,14	52,09	7,22	30,58
Košutka - F. n. Lochotín	7,17	53,67	7,33	29,56
F. n. Lochotín - Americká	6,38	79,69	8,93	35,10
Americká - Hradiště	5,63	31,49	5,61	24,17
Hradiště -Americká 2	3,17	10,56	3,25	18,96

Hodnocení jednotlivých úseků, DMT FGM:

Úsek	DMT FGM			
	Průměrná odchylna od modelu [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylna [m]	Extrémní odchylna od modelu [m]
Celá trasa *	4,34	4,25	2,06	34,38
Hradiště - Americká	4,12	15,47	3,93	22,37
Americká - F.n. Lochotín	4,01	43,15	6,57	34,38
F. n. Lochotín - Košutka *	9,25	67,52	8,22	24,13
Košutka - Krkavec *	-	-	-	-
ZČU - Hradiště *	3,36	13,33	3,65	19,62
Hradiště -Americká 1	4,67	11,13	3,34	17,56
Americká - F. n. Lochotín	1,98	8,13	2,85	14,76
F. n. Lochotín - Košutka *	15,66	36,54	6,05	24,14
Košutka - Krkavec *	-	-	-	-
Krkavec - Košutka *	-	-	-	-
Košutka - F. n. Lochotín *	1,90	0,46	0,68	3,41
F. n. Lochotín - Americká	5,90	38,32	8,27	34,38
Americká - Hradiště	4,45	23,95	4,89	22,37
Hradiště -Americká 2	3,30	10,40	3,23	17,92

* Úsek neodpovídá svou délkou délce u DMT ZABAGED - nelze srovnávat

Hodnocení úseků dělených dle úrovně zakrytí oblohy, DMT ZABAGED:

Rozsah zakrytí oblohy	DMT ZABAGED			
	Průměrná odchylna od modelu [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylna [m]	Extrémní odchylna od modelu [m]
Odkrytý terén	1,78	1,67	1,29	5,14
Odkrytý terén - rovina	2,45	1,38	1,17	5,14
Odkrytý terén - svah	0,80	0,49	0,70	2,62
Zakrytý terén - lesy	14,43	71,25	8,44	34,54
Zakrytý terén - městská zástavba	8,47	66,53	8,16	31,78
Ostatní zakrytí	3,78	9,13	3,02	14,62

Hodnocení úseků dělených dle úrovně zakrytí oblohy, DMT FGM:

Rozsah zakrytí oblohy	DMT FGM			
	Průměrná odchylna od modelu [m]	Výběrový rozptyl [m ²]	Směrodatná odchylna [m]	Extrémní odchylna od modelu [m]
Odkrytý terén	1,30	0,98	0,99	4,07
Odkrytý terén - rovina	1,57	1,20	1,09	4,07
Odkrytý terén - svah	0,91	0,41	0,64	2,33
Zakrytý terén - lesy * / **	-	-	-	-
Zakrytý terén - městská zástavba * / **	-	-	-	-
Ostatní zakrytí **	2,69	5,03	2,24	14,48

* Většina vybraných úseků leží mimo DMT - hodnocení neproběhlo

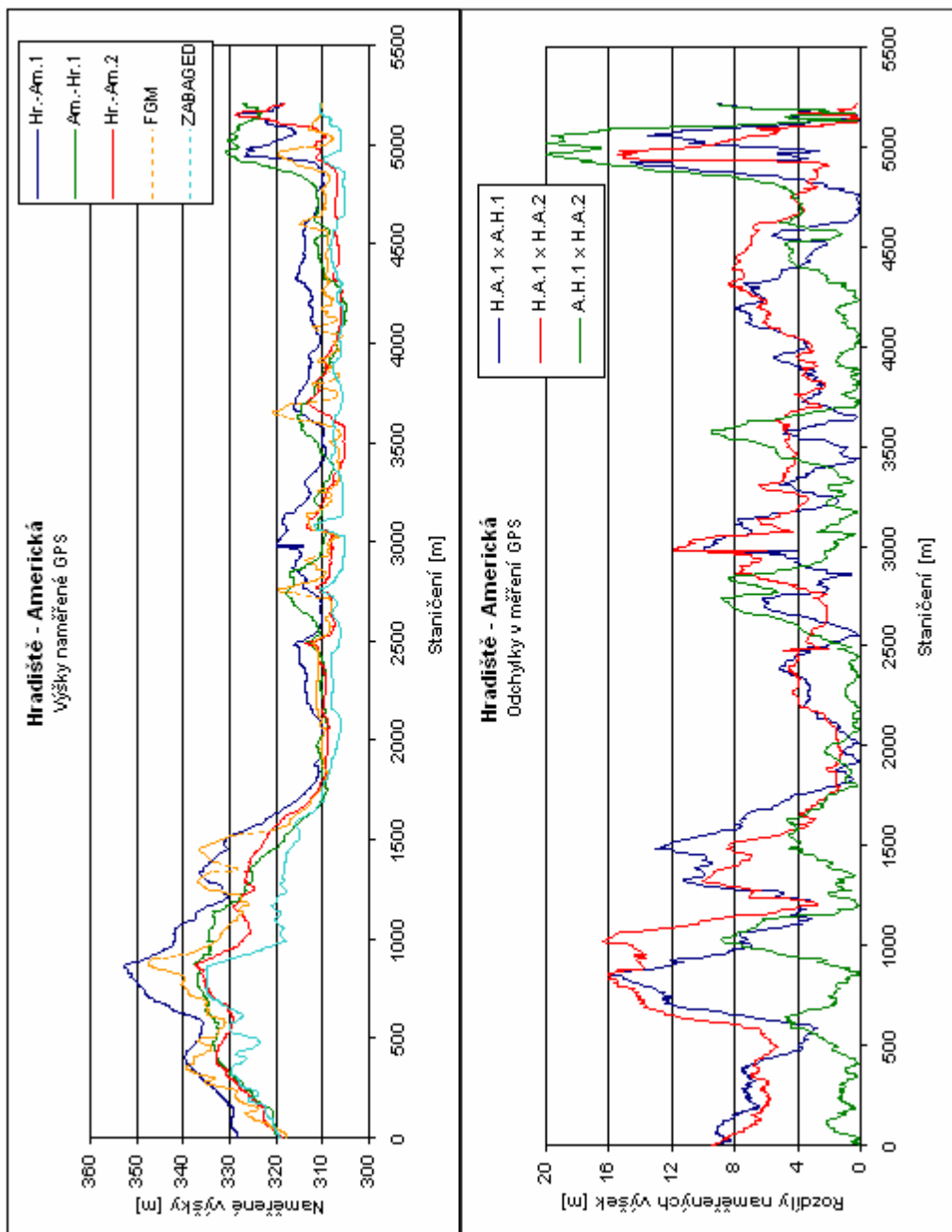
** Úsek může být zatížen chybou DMT - v textu práce není uveden

D. Grafické výstupy statistických hodnocení

Při statistickém hodnocení naměřených výšek byly vytvářeny grafy výšek a převýšení, při hodnocení absolutní přesnosti byly vytvořeny také četnostní grafy rozložení odchylek naměřených hodnot výšky od DMT. Staničení všech grafů je provedeno ve směru prvního průjezdu (jih - sever).

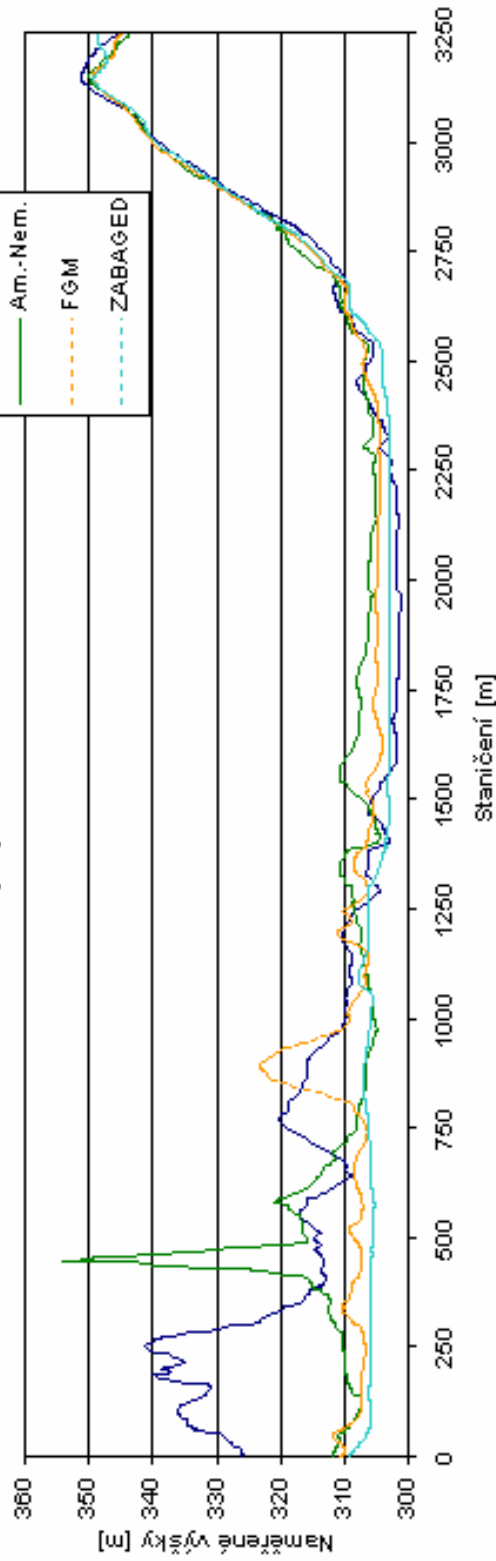
Pro kompletní uvedení v tištěné verzi bakalářské práce je vytvořených grafů příliš mnoho. Na následujících stranách jsou proto uvedeny pouze příklady grafických výstupů statistického hodnocení. Všechny vytvořené grafy jsou k dispozici v elektronické podobě na přiloženém CD.

D.1 Hodnocení relativní přesnosti, jednotlivé úseky trasy



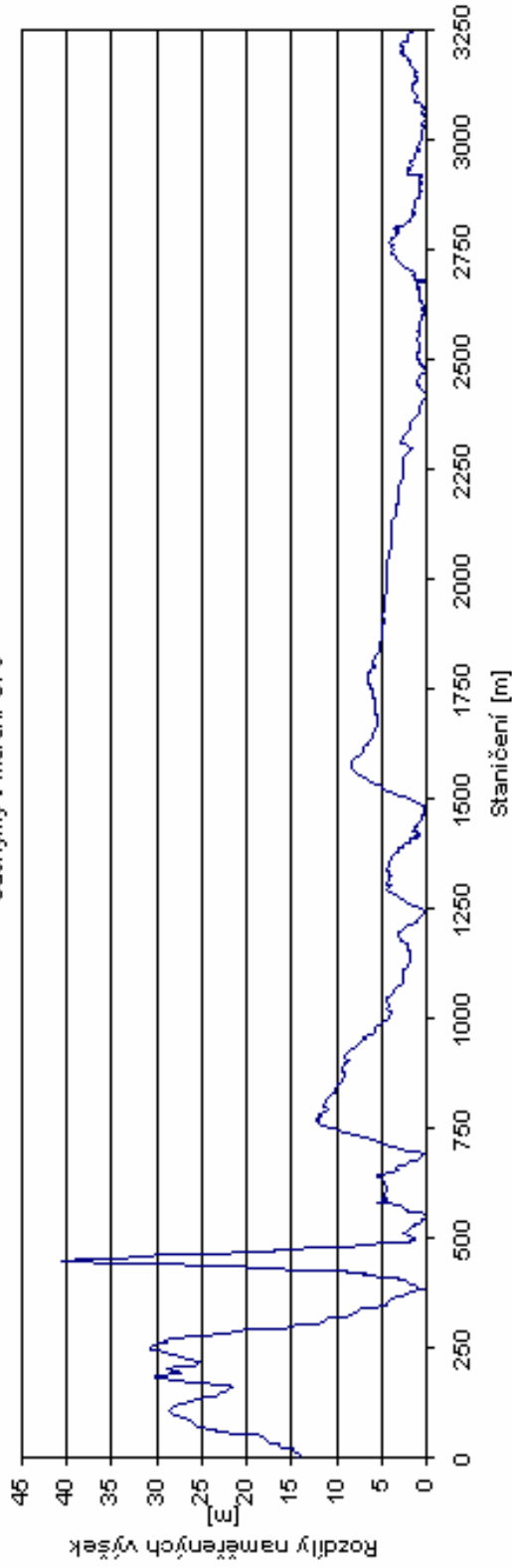
Americká - nemocnice Lochoťín

Výšky naměřené GPS



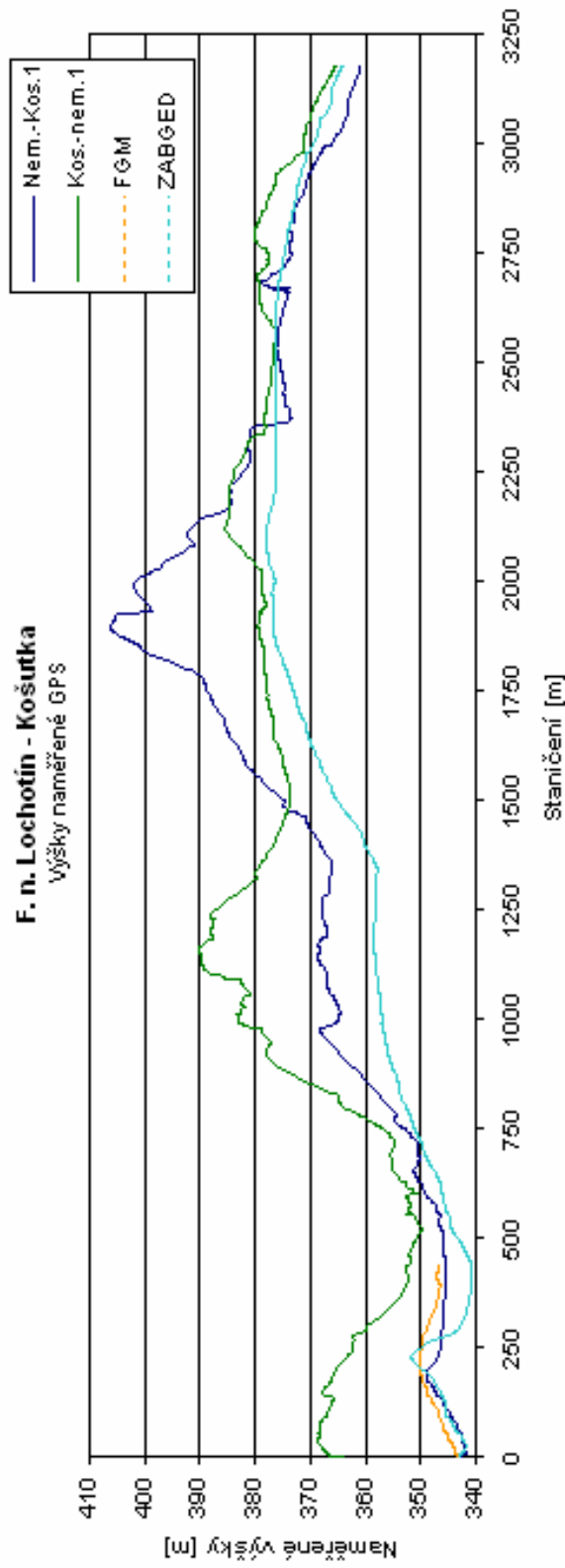
Americká - nemocnice Lochoťín

Odhledy v měření GPS



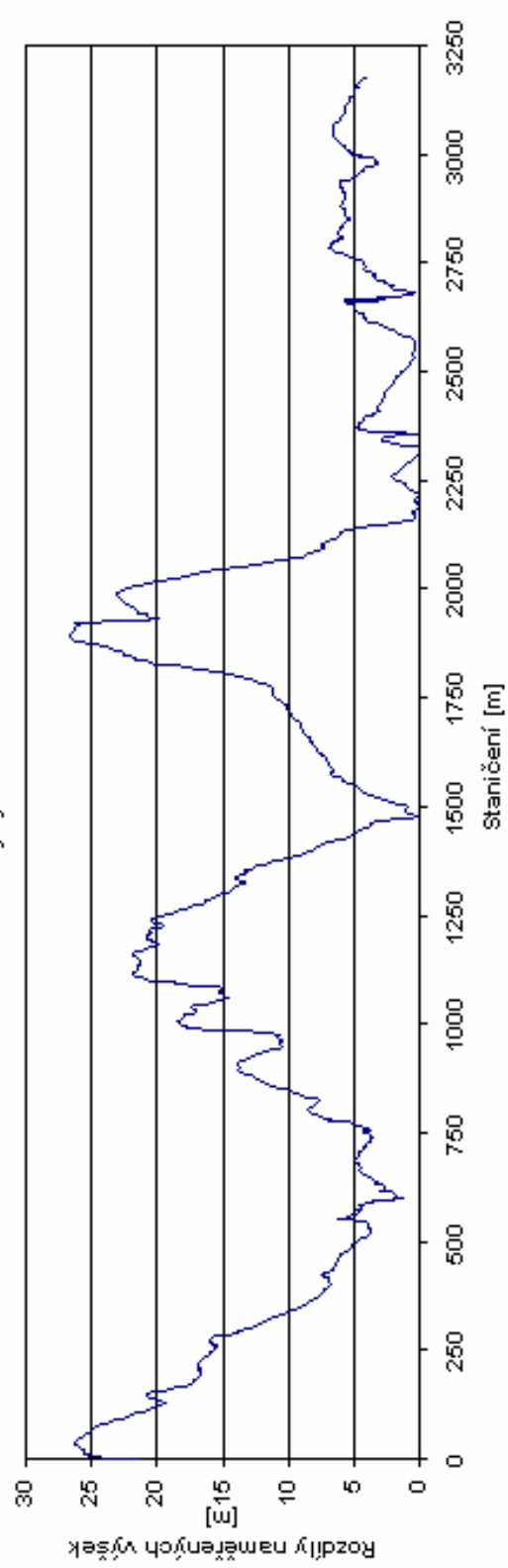
F. n. Lochotín - Košutka

Výšky naměřené GPS

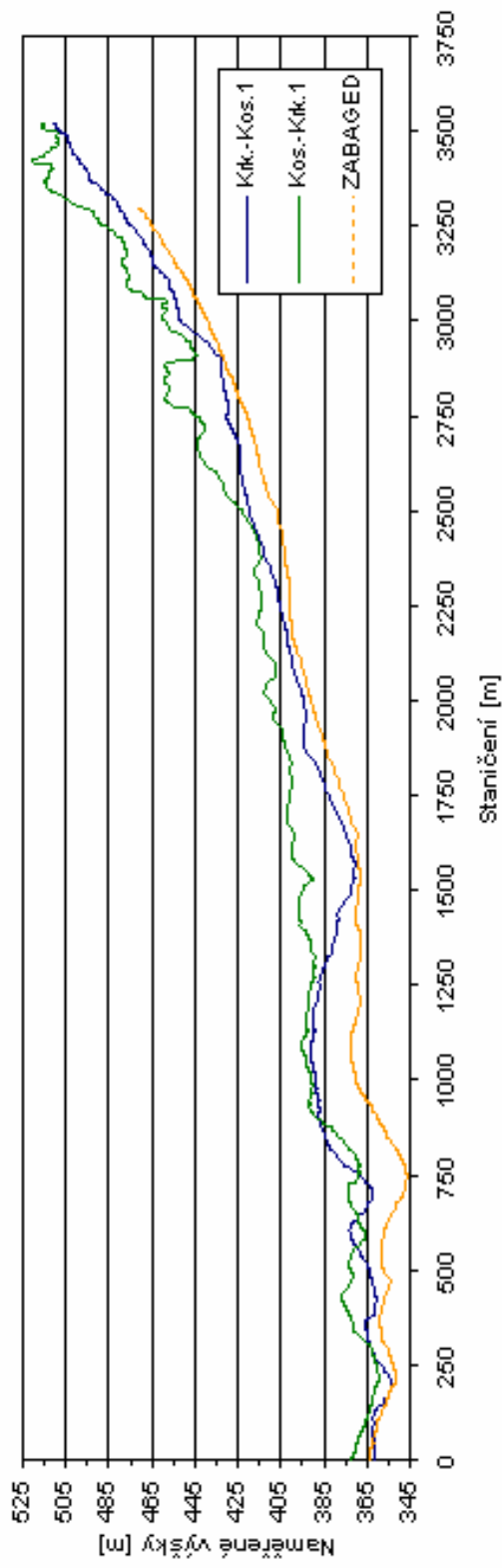


F. n. Lochotín - Košutka

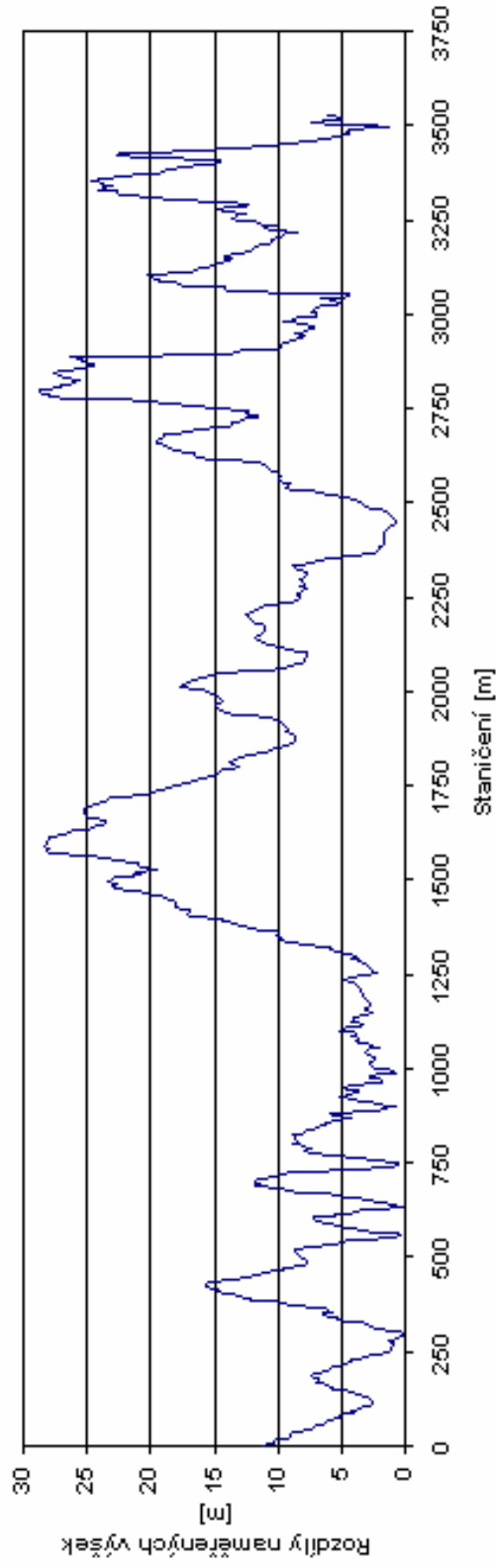
Odhychky v měření GPS



Košutka-Krkavec výšky naměřené GPS



Košutka - Krkavec Odchytky v měření GPS



D.2 Hodnocení absolutní přesnosti

Grafické výsledky úseku Americká – F. n. Lochotín:

