

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



**ZPŘESNĚNÍ PRŮBĚHU VODNÍCH TOKŮ
Z DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ**

**LOCATION ACCURACY IMPROVEMENT OF WATERCOURSES
BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING DATA**

Diplomová práce

Tereza Peterková

duben 2015

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Lukáš Brůha

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citovala.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 27. dubna 2015

.....

Tereza Peterková

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala především vedoucímu mé diplomové práce Mgr. Lukášovi Brůhovi za trpělivost, ochotu věnovat mi svůj čas a zodpovědět všechny otázky. Svým přístupem nesporně dopomohl k úspěšnému dokončení práce. Můj dík taktéž patří RNDr. Jakobovi Lysákovi za jeho rady při konzultacích. V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině a přátelům, kteří mne během celého studia neúnavně podporovali.

Zpřesnění průběhu vodních toků z dat leteckého laserového skenování

Abstrakt

Předmětem této práce je navrhnout postup zpřesnění polohy a podélného profilu vodních toků z dat leteckého laserového skenování. Na vodní toky je v rámci práce nahlíženo jako na údolnice, což umožňuje k určení jejich polohy využívat metody detekce terénních hran. Navrhovaná metoda zpracovává DMR ve formě filtrovaného bodového mračka a je založena na protínání se rovin aproximující svahy přilehlé k vodnímu toku. Primárně se práce zaměřuje na úzké toky v hluboce zaříznutých údolích, čemuž je celá metoda přizpůsobena. Zároveň se navrhaný postup úspěšně vyrovnává s rozdílnou přesností prvotního odhadu polohy zkoumaného toku. V závěru práce jsou představeny a zhodnoceny výsledky aplikace metody na data z pramenné oblasti Labe v Krkonoších.

Klíčová slova: letecké laserové skenování, vodní tok, údolnice

Location accuracy improvement of watercourses based on airborne laser scanning data

Abstract

The object of this thesis is to propose the method of location accuracy improvement and longitudinal profile of watercourses using the data of airborne laser scanning. In the thesis the watercourses are seen as valley lines where it is possible to use the method of terrain break-lines detection to determine their location. The proposed method processes DMR in the form of filter point swarm and it is based on the intersection of planes approximation the slopes adjoined to the watercourse. Primarily the thesis focuses on narrow watercourses in deeply placed valleys and the method is adapted to it. At the same time the proposed method successfully deals with the different accuracy of the primary estimation of the explored watercourse. The end of the work presents and evaluates the results of the used method and the obtained data of the Labe spring region in Krkonoše mountains.

Keywords: airborne laser scanning, watercourse, valley line

Obsah

Obsah	6
Přehled použitých zkratk	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
1.1 Cíle práce	14
2 Letecké laserové skenování	16
2.1 Obecný princip	17
2.2 Technika	18
2.2.1 Laserová skenovací jednotka	18
2.2.2 Navigační systém	19
2.3 Zpracování dat	20
2.3.1 Filtrace	20
2.4 Letecké laserové skenování v ČR	23
2.4.1 Úprava dat	24
2.4.2 DMR 5G	25
3 Publikované metody detekce zlomových hran	27
3.1 Bailly et al. (2008)	27
3.2 Kraus, Pfeifer (2001)	28
3.3 Briese (2004)	29
3.4 Briese, Mandlbürger, Ressler, Brockmann (2009)	31
3.5 Brzank, Lohmann, Heipke (2005)	31
4 Vlastní metoda	34
4.1 Vymezení základních pojmů a terminologie	34
4.2 Metodika	36
4.2.1 Aproximace terénu	37

4.2.2	Vytvoření linie z průsečnic	41
4.2.3	Ukončení algoritmu	42
4.2.4	Problémová místa	43
4.2.5	Spádování podélného profilu	48
4.2.6	Kontrola výsledků	49
4.3	Implementace a testování algoritmu	51
4.4	Výsledky	52
4.4.1	Testované území	52
4.4.2	Čertova strouha	53
4.4.3	Dvorský potok, Pudlava	58
4.4.4	Žlábský ručej	61
5	Diskuze	64
6	Závěr	68
7	Zdroje	69
	Seznam příloh	77

Přehled použitých zkratk

2D	2-Dimensional
2,5D	Dvourozměrný model s přidaným třetím rozměrem
3D	3-Dimensional
ALS	Airborne Laser Scanner
Bpv	Balt po vyrovnání
ČSN	Česká soustava norem
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DMR	Digitální model reliéfu
DMR 4G	Digitální model reliéfu 4. generace
DMR 5G	Digitální model reliéfu 5. generace
DMT	Digitální model terénu
DMT 1G	Digitální model terénu 1. generace
DSM	Digital surface model
DGPS	Differential global positioning system
GPS	Global positioning system
IMU	Inertial measurement unit
LADAR	Laser detection and ranging

LIDAR	L ight d etection and ranging
LLS	L etecké l aserové skenování
MO	M inisterstvo o brany
Mze	M inisterstvo z emědělství
POS	P osition and o rientation system
S-JTSK	souřadnicový S ystém jednotné trigonometrické sítě katastrální
TIN	T riangulated irregular n etwork
TXT	T extový soubor
UTM	U niversal t ransverse m ercator
VÚGTK	V ýzkumný ústav g eodetický, t opografický a k artografický
WGS 84	W orld g eodetic systém 1984
ZABAGED	Z ákladní b áze g eografických d at

Seznam obrázků

OBR. 1: VODNÍ TOK ZABAGED (MODRÁ LINIE) A ZPŘESNĚNÝ TOK (ČERVENÁ LINIE) NA STÍNOVANÉM MODELU POVRCHU VYTVOŘENÉM Z DAT LLS (ZDROJ: ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD, 2014)	15
OBR. 2: VÍCENÁSOBNÝ ODRAZ (ZDROJ: BERARDIN; BLAIS; LOHR, 2010)	18
OBR. 3: STOPY NASKENOVANÝCH BODŮ V ZÁVISLOSTI NA RŮZNÝCH KONSTRUKCÍCH SKENERU (ZDROJ: DOLANSKÝ, 2004) ...	19
OBR. 4: PRINCIP PŘEKRÝVAJÍCÍCH SE OBLASTÍ PRO APROXIMACI TERÉNU (ZDROJ: BRIES,E, 2004)	29
OBR. 5: TYPICKÉ HRANY V PŘÍBŘEŽNÍCH OBLASTECH (ZDROJ: BRZANK; LOHMANN; HEIPKE, 2005)	31
OBR. 6: 2D HYPERBOLICKÝ TANGENS (ZDROJ: BRZANK; LOHMANN; HEIPKE, 2005)	32
OBR. 7: SCHÉMA POUŽÍVANÉ METODY (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	36
OBR. 8: MALÉ ŠÍŘKY FASET VEDOUcí K APROXIMACI POUZE JEDNOHO ZE SVAHŮ (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	38
OBR. 9: POUŽÍVANÁ VÁHOVÁ FUNKCE (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	40
OBR. 10: 3D POHLED NA APROXIMAČNÍ ROVINY V PŘÍPADĚ VELKÉ NEPŘESNOSTI PRVOTNÍHO ODHADU LINIE PRO ŠÍŘKY FASET 10, RESPEKTIVE 50,6 M ZA VYUŽITÍ NEVÁŽENÉ (VLEVO) A VÁŽENÉ (VPRAVO) METODY NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	41
OBR. 11: 3D POHLED NA APROXIMAČNÍ ROVINY V PŘÍPADĚ VELKÉ NEPŘESNOSTI PRVOTNÍHO ODHADU LINIE PRO ŠÍŘKY FASET 10, RESPEKTIVE 75,9 M ZA VYUŽITÍ NEVÁŽENÉ (VLEVO) A VÁŽENÉ (VPRAVO) METODY NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	41
OBR. 12: ODEBRÁNÍ UZLOVÝCH BODŮ (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	42
OBR. 13: PŮVODNÍ A ZPŘESNĚNÁ LINIE PO PRŮBĚHU ALGORITMU (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	43
OBR. 14: ŠIROKÁ CESTA PŘECHÁZEJÍCÍ PŘES ZKOUMANÝ TOK (VLEVO) A VODOPÁD (VPRAVO) (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	44
OBR. 15: VELKÁ POZIČNÍ I SMĚROVÁ CHYBA PŮVODNÍ LINIE (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	45
OBR. 16: SEGMENT LINIE LEŽÍCÍ V BLÍZKOSTI HŘBETNICE (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	46
OBR. 17: 3D POHLED NA APROXIMAČNÍ ROVINY PRO SEGMENT BLÍZKÝ KE HŘBETNICI V PŘÍPADĚ INICIALIZAČNÍCH ŠÍŘEK FASET (NAHOŘE) A PO TŘETÍM ROZŠÍŘENÍ (DOLE) (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	47
OBR. 18: NEDOKONALÉ ŘEŠENÍ V OBLASTI SOUTOKU, KDY SE ZPŘESNĚNÉ LINIE (ZELENÉ) NESPOJÍ (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA) ..	48
OBR. 19: ČÁST VYSPÁDOVANÉHO PODÉLNÉHO PROFILU (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	49

OBR. 20: SITUACE, KDY UZLOVÉ BODY TOKU SPLŇUJÍ PODMÍNKU KLESAJÍCÍHO PODÉLNÉHO PROFILU, PŘESTOŽE TERÉN MEZI NIMI STOUPÁ (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	50
OBR. 21: SITUACE, KDY UZLOVÉ BODY TOKU SPLŇUJÍ PODMÍNKU KLESAJÍCÍHO PODÉLNÉHO PROFILU, PŘESTOŽE LINIE ZJEVNĚ LEŽÍ VE SVAHU (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	50
OBR. 22: OBLAST ČERTOVSÝ STROUHY (ZDROJ: ČÚZK, 2014)	54
OBR. 23: POROVNÁNÍ PRŮBĚHU LINIE ZABAGED A VÝLEDNÉ LINIE ALGORITMU V OBLASTI HORNÍ TOKU ČERTOVSÝ STROUHY (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	55
OBR. 24: ÚHLY SVÍRANÉ SVAHY ÚDOLÍ V JEDNOTLIVÝCH UZLOVÝCH BODECH ZPŘESNĚNÉ LINIE (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	56
OBR. 25: PODÉLNÝ PROFIL ČERTOVSÝ STROUHY (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	57
OBR. 26: VYPOČTENÉ PODÉLNÉ SKLONY V JEDNOTLIVÝCH UZLOVÝCH BODECH ZPŘESNĚNÉ LINIE (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	57
OBR. 27: VÝŠKOVÝ ROZDÍL MEZI UZLEM TOKU A NEJNIŽŠÍM BODEM LLS V OKOLÍ – ČERTOVA STROUHA (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	58
OBR. 28: OBLAST PUDLAVY A DVORSKÉHO POTOKA (ZDROJ: ČÚZK, 2014)	59
OBR. 29: VÝŠKOVÝ ROZDÍL MEZI UZLEM TOKU A NEJNIŽŠÍM BODEM LLS V OKOLÍ – PUDLAVA (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	60
OBR. 30: VÝŠKOVÝ ROZDÍL MEZI UZLEM TOKU A NEJNIŽŠÍM BODEM LLS V OKOLÍ – DVORSKÝ POTOK (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	61
OBR. 31: OBLAST ŽLÁBSKÉHO RUČEJE (ZDROJ: ČÚZK, 2014)	61
OBR. 32: SITUACE, KDY SE APROXIMACE ŽLÁBSKÉHO RUČEJE BLÍŽÍ K HŘBETNICI (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	62
OBR. 33: DETEKOVANÉ POTENCIÁLNÍ UZLOVÉ BODY V OBLASTI MEDVĚDÍNSKÉHO VODOPÁDU (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	63

Seznam tabulek

TAB. 1: VÝHODY A NEVÝHODY LLS (ZDROJ: ŠÍMA, 2009)	17
TAB. 2: TECHNICKÉ PARAMETRY SKENERU RIEGL LMS Q-680 (ZDROJ: LEMMENS 2009, VLASTNÍ ÚPRAVA).....	23
TAB. 3: PŘESNOST DMR 5G V ZÁVISLOSTI NA POVRCHU (ZDROJ: BRÁZDIL ET AL., 2012)	26
TAB. 4: PRŮMĚRNÉ SKLONY DNA V JEDNOTLIVÝCH ČÁSTECH PUDLAVY A DVORSKÉHO POTOKA (ZDROJ: PILOUS, 1989)	59
TAB. 5: PRŮMĚRNÉ SKLONY DNA V JEDNOTLIVÝCH ČÁSTECH PUDLAVY A DVORSKÉHO POTOKA SPOČTENÉ ALGORITMEM (ZDROJ: VLASTNÍ TVORBA)	60

1 Úvod

V naší krajině jsou jedním z nejdůležitějších a často i nejvýraznějších prvků říční údolí včetně jimi protékajících vodních toků. Byl to právě dobrý přístup k vodě, který v historických dobách představoval limitní podmínku pro život. Z tohoto důvodu se první sídla formovala v okolí řek či potoků v údolích. Říční síť navíc záhy začala představovat důležitou dopravní tepnu. Mimo lodní dopravy na velkých splavných řekách byly vodní toky využívány například i pro plavení dřeva z nepřístupných horských oblastí, kde řeka představovala po dlouhou dobu jedinou možnou přístupovou cestu (Lokvenc, 2007). Již dlouhou dobu se tedy objevuje snaha údolí a především vodní toky pochopit a popsat. V současné době je možné zmínit například velmi aktuální problematiku povodní. Pro přesný popis jejich průběhu, který umožňuje efektivnější ochranu lidí a jejich majetku, je mimo znalosti informací o okolním terénu zásadní i přesná znalost polohy toku včetně jeho dalších charakteristik. Poloha toku je však důležitá i pro nespočet dalších hydrologických, hydrodynamických či geografických a geomorfologických analýz, jako jsou například tvorba morfologicky přesných modelů terénu či výpočty odtokových poměrů.

Vzhledem ke své důležitosti není překvapující, že se říční síť objevuje prakticky od prvopočátku na všech mapách. S vývojem technických možností se samozřejmě zpřesňovala i informace o průběhu terénu, což s sebou přinášelo i zpřesňování polohy toků. V současné době navíc zažíváme rychlý rozvoj moderních technologií, který je možný dokumentovat i na způsobu pořizování údajů o nadmořské výšce terénu. Nivelaci či tachymetrii, které je možné zařadit mezi tradiční způsoby disciplíny sběru výškových dat, postupně nahrazují či doplňují metody dálkového průzkumu. Nejdříve se začala využívat letecká fotogrammetrie a na konci 20. století i metoda leteckého laserového skenování (LLS). Přes relativně krátkou dobu, po kterou jsou data laserového skenování využívána, si tento princip vydobyl mezi ostatními

silnou pozici (Oršulák; Pacina, 2010). Navzdory probíhajícímu intenzivnímu výzkumu existuje řada nezodpověděných otázek, a letecké laserové skenování tak nabízí mnoho potenciálních vědeckých příležitostí.

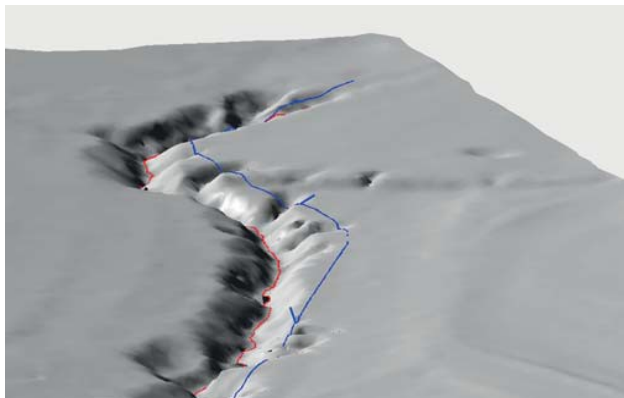
Předkládaná diplomová práce spojuje možnosti přinášené daty leteckého laserového skenování s potřebou znalosti přesného průběhu vodních toků. Mezi řadu výhod dat poskytovaných metodou LLS se řadí i jejich vysoká přesnost. Naopak nevýhodou je chybějící informace o liniových prvcích, jako jsou například terénní hrany. Bez znalosti průběhu hran však nelze vytvořit přesný model terénu a jsou proto důležitým vstupem pro řadu geoinformačních projektů (Wild; Krzystek; Madani, 1996). Z tohoto důvodu byla prezentována již řada studií jak k extrakci terénních hran z dat LLS přistoupit. Tohoto faktu je možné využít, a proto bude v rámci této práce i na vodní toky nahlíženo jako na jeden konkrétní typ terénní hrany tj. údolnici.

Diplomová práce je rozdělena do několika kapitol. Po vytýčení hlavních cílů následuje nástin teorie problematiky leteckého laserového skenování. Data získaná touto metodou jsou základním vstupem celého procesu detekce vodních toků a je tedy důležité znát pozadí jejich sběru. Součástí kapitoly je i popis tvorby nového výškopisu ČR, který probíhá právě metodou LLS a jehož data jsou využita v praktické části diplomové práce. Teoretický úvod je doplněn rešerší odborné literatury, která se zabývá detekcí hran z dat LLS. Stěžejní částí práce je popis vlastní vyvíjené metody zpřesnění průběhu vodních toků. Součástí této kapitoly je i stručný popis implementace vyvíjeného algoritmu do programovacího jazyka Python následovaný experimentální částí popisující data a dosažené výsledky. Celá práce je ukončena diskuzí nad výsledky a možnostmi metody.

1.1 Cíle práce

Hlavním cílem práce je detekce vodního toku, respektive zpřesnění jeho polohy. Rozvoj nových technik sběru výškových dat s sebou přinesl i možnost tvorby přesnějších modelů terénu. Jelikož však datové sady zobrazující vodní toky většinou pocházejí z méně přesných zdrojů, můžeme se lehce ocitnout v situaci, kdy po překrytí DMT vodním tokem tento tok nekopíruje údolnici, ale teče ve svahu (obr. 1). Takovýto stav však v reálných přírodních podmínkách nenastane a je tedy prokazatelně chybný. Odstraněním této nepřesnosti, tedy posunutím toku do míst, kudy dle fyzikálních zákonitostí skutečně poteče, se zabývá např. ČÚZK. V současnosti používané řešení je založeno na vizuální interpretaci stínovaného modelu terénu, na jejímž základě probíhá manuální editace vodního toku. Cílem práce je tedy poskytnout návod, který umožní k řešené problematice přistupovat systematicky a jednotně. Bude navržen postup,

který automaticky sloučí zkoumaný vodní tok s odpovídající údolnicí. Metoda se zároveň robustně vyrovná s možnými nepřesnostmi ve vstupním modelu terénu a bude i vhodně reagovat na přítomnost nehomogenit v průběhu údolí. Dílčím cílem je zároveň implementace metody do vhodného programovacího jazyka, aby mohla být dále prakticky využívána.



obr. 1: Vodní tok ZABAGED (modrá linie) a zpřesněný tok (červená linie) na stínovaném modelu povrchu vytvořeném z dat LLS (zdroj: Zeměměřický úřad, 2014)

Vodní toky jsou však velice rozličným krajinným prvkem. Porovnáme-li například horské potoky v pramenných oblastech s širokými dolními toky velkých řek, je zřejmé, že k jejich detekci nelze přistupovat stejným způsobem. Široká koryta řek je například vhodné aproximovat nikoliv jedinou linií tj. osou vodního toku, ale spíše dvěma liniemi představujícími břehové čáry. Pokud má řeka navíc okolo sebe vyvinutou širokou údolní nivu, nemusí téměř představovat terénní hranu, čímž je vyloučeno pro detekci vodního toku využít postupy založené právě na nalezení polohy terénních zlomů. Další velké rozdíly bychom našli i v podélných profilech obou typů toků. Z těchto důvodů byla řešená problematika zúžena a práce se zabývá pouze vodními toky v ostře zaříznutých údolích s velkým spádem. Takovým podmínkám odpovídají právě horské toky.

Jako základní vstupní data budou sloužit DMR 5G a vodní toky ZABAGED. Metoda však bude vyvíjena s ohledem na možné použití i jiných vstupních dat ve stejném formátu. Digitální model terénu tedy bude vstupovat ve formě filtrovaného mráčka bodů LLS a na rozdíl od většiny postupů uveřejněných v odborné literatuře, nebude v průběhu detekce převáděn do rastrové podoby.

2 Letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování je jednou z nejmladších metod získávání prostorových dat. Navzdory relativně krátkému časovému úseku, po který se tato metoda v praxi používá, našla své uplatnění v mnoha oborech (Roub; Hejduk; Novák, 2012). Velký přínos má v situacích, kdy ostatní běžné metody sběru dat (fotogrammetrie či tachymetrie) selhávají, nebo jsou příliš zdoluhavé. Typické jsou proto dle Kiliana (1996) aplikace v zalesněných územích či příbřežních zónách.

LLS je metodou bezkontaktní, kdy měřicí aparatura není v přímém kontaktu s měřeným prvkem. Tímto se liší od metod kontaktních, jako jsou například nivelační či tachymetrická měření. Data získaná bezkontaktními metodami se zpravidla vyznačují menší přesností. Tento nedostatek je však v poslední době díky technologickým pokrokům eliminován. Naopak typickým pozitivem bezkontaktních metod je větší rychlost měření i rozsáhlých územních celků a možnost mapovat i místa špatně přístupná. Mezi klasické bezkontaktní metody sběru dat patří fotogrammetrie, DPZ či radarová měření (Oršulák, 2010).

V odborné literatuře se vyskytuje několik označení, pod kterými se skrývá metoda LLS. Většina autorů používá zkratku ALS vycházející z anglického označení Airborne Laser Scanning. Lze však narazit i na akronym LIDAR (LIght Detection And Ranging) případně LADAR (LAsER Detection And Ranging) (Wehr; Lohr, 1999). V některých pracích je pojem LIDAR zaměnitelný za pojem laserové skenování, častěji však označuje pouze laserový skener bez technického zařízení pro určení přesné polohy aparátu v okamžiku měření. S LIDAREm je tedy možné pracovat i při pozemním laserovém skenování, kde není vyžadováno přesné určení geografických souřadnic (Lichti; Skaloud, 2009). Jelikož je celá práce založena především na zpracování laserových dat, budou v následujících kapitolách přiblíženy základní principy této metody, technické pozadí měření i typické vlastnosti získaných dat.

2.1 Obecný princip

Laser patří mezi aktivní senzory, což znamená, že zařízení obsahuje vlastní zdroj záření. Tímto zdrojem je vyslaná určitá energie, která se po interakci se zkoumaným objektem vrátí do senzoru, kde se zaznamená a okamžitě převede do digitální reprezentace (Morin, 2002). Obrovskou výhodou oproti tzv. pasivním sensorům (např. fotogrammetrie), které využívají externí zdroj záření (nejčastěji Slunce), je možnost měření 24 hodin denně i při nepříznivých podmínkách, jako je např. oblačnost či slabá sněhová pokrývka. Naopak měření nelze provádět při dešti a sněžení (Šíma, 2009). Další typické výhody a nevýhody LLS jsou shrnuty v následující tabulce.

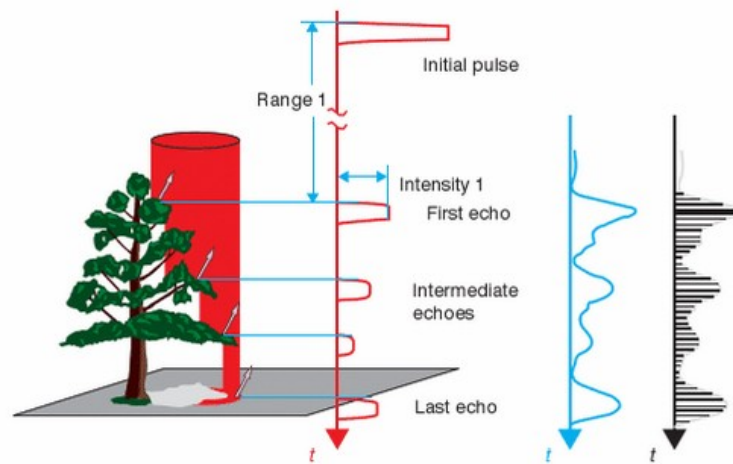
Výhody
získání velkého množství bodů terénu i objektů na něm v krátkém čase
vysoká míra automatizace zpracování dat
výšková přesnost LLS je vždy vyšší než v případě digitální letecké fotogrammetrie ze stejné relativní výšky letu
Nevýhody
počáteční investiční náročnost
pro laiky neposkytuje srozumitelný obraz území
polohová přesnost je 2 až 5x nižší než výšková (především v terénu s větším sklonem)

Tab. 1: Výhody a nevýhody LLS (zdroj: Šíma, 2009)

Podstatou metody LLS je měření vzdálenosti pomocí laserového paprsku. Výsledkem jsou v podstatě polární souřadnice – vzdálenost a úhel (Gajski, 2000). V první fázi je emitováno světelné elektromagnetické záření s danými vlastnostmi. Tento paprsek je pod určitým úhlem vyslán ke snímanému povrchu. Od něj se část paprsku odrazí zpět do aparatury, kde je zaznamenána (Šíma, 2009). Poté je buď z doby uplynulé mezi vysláním a příjmem paprsku, nebo ze znalosti fázového posuvu a počtu period (dle použitého typu laseru) vypočítána vzdálenost mezi místem odrazu a měřící aparaturou (Jaroš, 2001). Dále je při znalosti přesné polohy letadla, respektive senzoru v době vyslání paprsku možné určit souřadnice bodu na povrchu, od kterého se paprsek odrazil zpět. Prostorová poloha skeneru je určována pomocí palubní GPS aparatury. Znalost vnější orientace - tj. pootočení, podélného a příčného sklonu - skeneru vůči plánované letové dráze v okamžiku měření je zajišťována inerciální měřičkou jednotkou (IMU) (Šíma, 2009).

Výsledkem LLS je mračno bodů ve 3D. Axelsson (1999) upozorňuje, že na rozdíl od modelů ve 2,5D, kde souřadnicím x a y odpovídá jediná souřadnice z , jsou některé laserové

systémy schopné zaznamenat více odrazů signálu v rámci jednoho měření a vytvořit tak 3D model. K těmto situacím dochází v okamžiku, kdy stopa paprsku, jejíž velikost je závislá na divergenci světelného paprsku a výšce letu, dopadne na zemském povrchu na více různých objektů. Divergence paprsku, která zároveň určuje okamžité zorné pole (Dolanský, 2004) se dle Lemmense (2007) většinou pohybuje mezi 0,2 - 2,7 mrad, což při výšce letu 500 m nad povrchem odpovídá stopě paprsku, jejíž velikost na povrchu se pohybuje od několika desítek centimetrů až po metry. Typickým příkladem, kde se tato vlastnost LLS projeví, je území s vegetací. Paprsek v prvním okamžiku dopadne na korunu stromu, část se odrazí, ale část paprsku projde do nižších pater a v ideálním případě dosáhne až terénu, kterému odpovídá poslední odraz (obr. 2). Tato vlastnost umožňuje využívat LLS pro některé konkrétní aplikace.



obr. 2: Vícenásobný odraz (zdroj: Beraldin; Blais; Lohr, 2010)

2.2 Technika

Technické pozadí LLS se dělí na dvě hlavní komponenty - laserový skener, který měří vzdálenost od stopy paprsku laseru na zemském povrchu a GPS/IMU jednotku, která určuje přesnou polohu a orientaci skeneru (Beraldin; Blais; Lohr, 2010).

2.2.1 Laserová skenovací jednotka

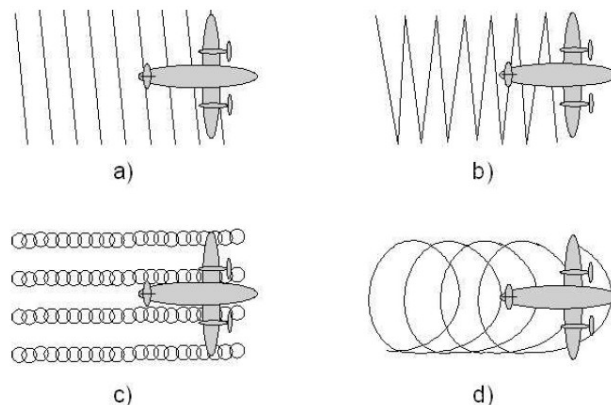
Přístroj se skládá ze zdroje laserového záření, optické soustavy a detektoru záření. Dále obsahuje mechanický prvek a velmi přesné hodiny.

V současné době se jako zdroj laserového záření využívá řada různých emitorů v závislosti na požadovaném výkonu a vlnové délce. Setkat se můžeme s pevnolátkovými lasery rubínovými či diodovými (Dolanský, 2004). Světelné pulsy jsou vysílány s velice vysokou frekvencí, která dosahuje i 250 000 Hz, což odpovídá 250 000 měření za sekundu (Lemmens

2007). Vlnová délka záření se většinou pohybuje mezi 1000 - 1500 nm, což odpovídá infračervenému záření. Z hodnot intenzity odraženého světla je možné mimo jiné vytvořit pseudosnímek, díky kterému od sebe lze odlišit objekty s nízkou a vysokou odrazivostí v tomto pásmu záření. Infračervené záření je však téměř stoprocentně pohlcované vodou, což má za následek prakticky nulovou hustotu bodů v oblastech vodních ploch. Pro potřeby bathymetrie se tak používá záření zelenomodré. (Dolanský, 2004)

Uvažujeme-li po dopadu záření na zkoumaný povrch difuzní odraz, energie světla klesá s druhou mocninou vzdálenosti, což má za následek potřebu velmi citlivého detektoru. Jako detektory jsou používány světlocitlivé diody, které jsou spektrálně synchronizované na vlnovou délku vysílaného záření. (Dolanský 2004)

Laserová skenovací jednotka obsahuje i optickou soustavu, která zajišťuje koncentraci záření do úzkého svazku. Součástí optické soustavy je zařízení, které zajišťuje vychylování paprsku v příčném směru. Většinou se jedná o zrcadlo či hranol na mechanickém prvku. Existují různé konstrukce, jejichž výsledkem jsou různé druhy stop naskenovaných bodů (obr. 3). Posun paprsku v podélném směru je pak zajištěn pohybem samotného letadla.



obr. 3: Stopy naskenovaných bodů v závislosti na různých konstrukcích skeneru (zdroj: Dolanský, 2004)

Poslední částí laserové skenovací jednotky jsou velmi přesné hodiny, díky kterým lze měřit čas, který uplyne od vyslání paprsku po jeho detekci na detektoru (Beraldin; Blais; Lohr, 2010). Vynásobením získaného času rychlostí světla získáme dvojnásobek vzdálenosti bodu na povrchu od měřicí aparatury. Při znalosti přesné polohy aparatury a úhlu vyzářených paprsků, tak lze určit souřadnice bodu na povrchu.

2.2.2 Navigační systém

Jak již bylo naznačeno, výsledkem měření laserovým skenerem je pouze přímá vzdálenost mezi senzorem a bodem na povrchu země. Souřadnice daného bodu je nutné dopočítat ze znalosti

přesné polohy senzoru v době měření. A právě určení polohy senzoru v souřadném systému zajišťuje tzv. navigační systém (POS = position and orientation system), jehož součástí je palubní jednotka GPS a IMU, která díky soustavě gyroskopů a akcelometrů poskytuje aktuální údaje o zrychlení a úhlových prvcích vnější orientace (Kalvoda, 2004).

Dle Kiliana (1996) by bylo možné pro stanovení všech potřebných hodnot použít pouze jednotku IMU či GPS měření. V praxi se však využívá kombinace těchto přístrojů z důvodu eliminace chyb, které by vznikly v případě měření pouze jedním způsobem. Pro další zlepšení dosažených výsledků je používán přístup diferenční GPS (DGPS) využívající předpokladu, že chyby v měření polohy dvěma blízkými přijímači jsou silně korelované. Základem měření DGPS je soustava referenčních stanic o známé poloze. Známa poloha v tomto ohledu znamená znalost souřadnic stanice nikoliv v místním souřadném referenčním systému ale v systému WGS 84, ve kterém je měření GPS prováděno (Illiffe; Lott, 2000). Každá referenční stanice pomocí družic GPS určuje svou polohu. Rozdíly mezi oběma polohami (tj. známou a určenou pomocí GPS) se nazývají diferenční korekce a předávají se uživatelům, kteří je využijí k opravě svých měření (Švábenský; Fixel; Weigel, 1995).

Jelikož GPS data jsou oproti laserovému snímání získávána s relativně malou frekvencí (do 10 Hz), je nutné naměřená data interpolovat tak, aby bylo možné určit polohu skeneru při každém vyslání pulsu skenerem. Druhou možností jak získat hustší polohová data je využití přidávaných informací o relativní poloze z měření IMU, která jsou měřena s vyšší frekvencí (např. 100 Hz a více) (Kilian, 1996).

2.3 Zpracování dat

Při průchodu paprsku atmosférou směrem k zemskému povrchu může docházet k úplnému či částečnému odrazu od objektů nad terénem. Především se jedná o vzrostlou vegetaci, budovy nebo například prvky rozvodných sítí (Dolanský, 2004). Nezpracovaná data z LLS tak představují digitální model povrchu, který mimo terénu zobrazuje i všechny prvky, které se nacházejí na něm. Pro většinu aplikací je však nutné znát přímo terén – tedy získat digitální model reliéfu (DMR), čehož se dosáhne procesem filtrace (Badea; Jacobsen, 2008). Chybně provedená filtrace může způsobit nepřesnosti při následných analýzách vycházejících ze získaného modelu, mezi které se řadí i detekce vodních toků.

2.3.1 Filtrace

Výsledkem procesu filtrace je odstranění prokazatelně chybných měření (např. letící pták), šumu a bodů, které popisují jiné objekty, než je požadováno. Typickým příkladem je odstranění vegetace a dalších objektů nepříslušících terénu za účelem tvorby DMR. Jelikož ruční zpracování

dat by bylo časově neúnosné, využívá se k tomuto účelu různých algoritmů automatické filtrace (Badea; Jacobsen, 2008). Xuelilang (2010) upozorňuje na prvky reálného světa, jejichž zařazení do skupin terén/ostatní bývají obecně pro filtrační algoritmy problematické. Jsou to například mosty, křoviny (především jsou-li nižší než 1 metr), budovy rozdílných velikostí a tvarů či oblasti se střídajícím se vysokým a nízkým reliéfem. V následujících textech budou stručně popsány některé z nejrozšířenějších algoritmů filtrace.

2.3.1.1 Filtry založené na porovnání sklonu

Jednou ze základních skupin filtrů jsou filtry, které určují příslušnost bodu ke kategorii terén podle porovnání s body v jeho nejbližším okolí. Mezi testovanými body je zkoumán jejich výškový rozdíl, který v poměru se vzájemnou vzdáleností bodů definuje sklon. Překročí-li spočtený sklon zadanou mez, je výše položený bod zařazen do kategorie mimoterénních bodů (Sithole; Vosselman, 2004). Sklon však lze určovat více způsoby. Mimo výpočtu přímé spojnice je možné použít např. sofistikovanější nelineární funkci vypočtenou z většího počtu okolních bodů (Dolanský, 2004).

Poněkud odlišnou metodou, která je však stále založena na porovnání sklonu sousedních bodů, je filtrace region growing. V tomto případě se vychází z uzlového bodu, který s určitostí leží na terénu, a testují se body v určeném okolí. Pokud je převýšení daných bodů v přístupných mezích, jsou tyto body také označeny za body nacházející se na povrchu terénu a testování dále pokračuje od nich. Tento postup je opakován do chvíle, kdy je v testovaném okolí alespoň jeden bod splňující danou podmínku. Výhodou oproti předchozímu postupu je menší výpočetní náročnost, neboť nedochází k testování každého bodu s každým bodem ve svém okolí. Jako nevýhoda se naopak může jevit potřeba apriorní znalosti uzlového bodu ležícího na terénu. K jeho určení je nutné použít jiné filtrační metody. Zároveň je zřejmé, že ke správnému výsledku nestačí pouze jeden uzlový bod pro celou zpracovávanou oblast. Hustota potřebných bodů se mění v závislosti na charakteristice území. Například je snadné si představit situaci urbanisticky zastaveného území s velkým počtem vnitrobloků. Pro každý vnitroblok, je nutné znát alespoň jeden uzlový bod, protože toto území neprostupně obklopují body, které neleží na terénu a tím pádem se zde testování ukončí a je potřeba pokračovat v další části území (Dolanský 2004).

2.3.1.2 Morfologické filtry

Základními filtry jsou dilatace a eroze. Společným prvkem je strukturální element, díky kterému je možné provádět analýzu v celém prostoru.

Použití morfologických filtrů je nejběžnější pro rastrová data, nicméně Dolanský (2004) uvádí, že lze použít i pro zpracování dat diskretních (mračno bodů) či spojitých (vektorový popis tvaru objektu). V tomto případě se však (na rozdíl od obrazových dat) nelze pohybovat v rastru s určitým krokem, ale je nezbytné filtr aplikovat v celém prostoru. V praxi to znamená přechod k integrálnímu vyjádření, což s sebou přináší nárůst výpočetní náročnosti.

Dilatace

V průběhu dilatace dochází k vyplnění mezer a vyhlazení hranic objektu o velikosti strukturálního elementu. Jednoduše řečeno dochází k výběru nejvyššího bodu z oblasti určené strukturálním elementem a přiřazení jeho výšky bodu, který se nachází pod hlavním bodem elementu.

Eroze

Duálním filtrem k dilataci je eroze. Výsledkem jsou erodované obrysy objektů. Úzké objekty mohou být zcela vymazány. Hlavnímu bodu pod elementem se v tomto případě přiřazuje výška nejnižší položeného bodu oblasti.

Kombinací dilatace a eroze vznikají filtry otevření a uzavření. Jako otevření se označuje eroze následovaná dilatací. Jeho výsledkem je odstranění příliš malých detailů, respektive objektů menších, než je daný strukturální element (stavby, stromy). Při dalším opakování otevření se stejnými parametry již nedochází ke změnám dat. Opačným pořadím eroze a dilatace vede k uzavření, jehož výsledkem je vyplnění štěrbin v datech.

Dual-rank

Vyšším morfologickým filtrem je dual-rank, který částečně řeší problém vznikající při používání výše uvedených filtrů v nehomogenním území. Pro plochá území s budovami velkých rozměrů je třeba totiž použít jinak velký strukturální element než v členitém terénu (Dolanský, 2004).

2.3.1.3 Lineární predikce

Další z metod filtrace je založena na lineární predikci s různou vahou pro každý měřený bod. V prvním kroku jsou nevážené body proloženy plochou, která znázorňuje přibližný průběh terénu. Plocha tak nutně leží mezi body terénními a mimoterénními. Následně je pro každý bod vypočtena odchylka od tohoto prvotního terénu, podle které je bodu přiřazena váha. Váhová funkce je nesymetrická. Bodům ležícím pod terénem je přiřazena velká váha, zatímco bodům vysoko nad terénem je přiřazena váha 0. Následně je znovu vypočten průběh terénu s použitím určených vah. Tento proces je iteračně opakován do doby, kdy jsou všechny body rozděleny do skupiny terén či ostatní (Kraus; Pfeifer, 1998).

2.4 Letecké laserové skenování v ČR

Dosavadní digitální výškový model České republiky pokrývající celé území (tzv. ZABAGED® - výškopis 3D vrstevnice) vznikl v letech 1995 až 2000 digitalizací Základní mapy ČR 1 : 10 000 (Šíma, 2011). Přestože bylo v následujících letech přistupováno ke zdokonalování modelu pomocí různých technik, jeví se dnes jeho aktuálnost, přesnost a kvalita jako limitující faktory pro rozvoj územně orientovaných informačních a řídicích systémů (Brázdil, 2010). Z tohoto důvodu byla v roce 2009 podepsána dohoda mezi ČÚZK, MO a MZe o spolupráci na Projektu tvorby nového výškopisu České republiky v letech 2009 - 2015 (Dušánek, 2014). Jako nejvhodnější metoda sběru dat bylo po zhodnocení jednotlivých možných metod vybráno LLS.

Území republiky bylo pro účely skenování rozděleno na tři pásma (západ, střed, východ) a dále na bloky o rozměrech 10 x 10 km, 10 x 20 km či 10 x 30 km s ohledem na výškovou členitost reliéfu (Šíma, 2011). Vlastní skenování povrchu začalo na úplném konci roku 2009 (Zeměměřický úřad, 2010) a ukončeno mělo být v průběhu roku 2012. Tohoto termínu však nebylo vzhledem k závadám na letadle nesoucí skener dosaženo a celé území republiky bylo naskenováno až k 12. 11. 2013 (Zeměměřický úřad, 2014).

Sběr dat byl proveden systémem Litemapper 6800, který se skládá z laserového skeneru RIEGL LMS Q-680, záznamového zařízení, palubní aparatury GPS Nova Tel a inerciální měřické jednotky firmy IGI (Šíma, 2011). Celý systém byl nesen armádním fotogrammetrickým letounem L-410 FG (Fedrzel, 2014). Následující tabulka shrnuje základní parametry použitého skeneru.

váha, rozměry	175 kg; 42 x 21,5 x 22,8 cm
vlnová délka pulsu	1550 nm
doba trvání pulsu	< 4 ns
divergence	0,4 mrad
první / poslední odraz	ano
skenující mechanika	rotující víceplošné zrcátko
frekvence skenování (rychlost zrcátka)	10 - 200 Hz
pulsní frekvence	80 000 - 240 000 Hz
úplný úhel záběru	60°
pulsní vzorkovací frekvence	1 GHz
metoda detekce pulsu	plná návratová vlna
letová výška (min/typ/max)	50 m/1600 m/2500 m

Tab. 2: Technické parametry skeneru RIEGL LMS Q-680 (zdroj: Lemmens 2009, vlastní úprava)

Skenování probíhalo ze dvou středních relativních výšek letu. V době vegetačního klidu (od oblevy do 30. dubna) bylo měřeno z výšky 1400 m s frekvencí laserových pulsů 120 000 Hz.

Naopak, aby byla zajištěna lepší průchodnost laseru vegetačním krytem, bylo v období se vzrostlou vegetací snímáno z výšky 1200 m s frekvencí 80 000 Hz. V tomto případě byl blok pokryt 14 pásy (oproti 12 pásům v případě vyšší výšky letu). Příčný překryt dosáhl v rovinatém území 50 %, respektive 35 % v terénu horském (Šíma, 2011).

Konečným výsledkem Nového výškopisu ČR budou tři modely: DMR 4G (zobrazení terénu pomocí výšek diskrétních bodů v pravidelné mřížce 5x5 m), DMR 5G (zobrazení terénu pomocí výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti) a DMT 1G (zobrazení povrchu i objektů na něm).

2.4.1 Úprava dat

Zpracování dat a tvorbu výsledných produktů zajišťuje zeměměřický odbor Zeměměřického úřadu v Pardubicích ve spolupráci s oddělením fotogrammetrie Vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu v Dobrušce (Brázdil, 2010). Prvotním výsledkem skenování je mračno bodů v souřadnicovém systému skeneru, které je možné díky známé trajektorii letu georeferencovat do referenčního systému WGS 84 / UTM. Georeferencovaná data jsou dále exportována do databáze a pro další zpracování rozdělena do pravidelných oblastí o velikost 2 x 2 km (Dušánek, 2014).

Jelikož cílem projektu je vytvořit digitální model reliéfu, je nutné provést filtraci, která rozdělí data do kategorií dle toho, zda znázorňují terén, vegetaci, stavby či výškové překážky leteckého provozu. Zároveň jsou identifikována i chybná měření (např. letící pták) (Brázdil et al., 2012). K automatické filtraci byla použita metoda robustní filtrace vyvinutá Technickou univerzitou ve Vídni (Dušánek 2014). Princip této metody filtrace byl blíže popsán v kapitole 2.3.1.3.

Výsledek filtračního procesu silně závisí na době, kdy byla data pořízena. Orientačně úspěšnost automatizovaného třídění dat dosahuje 90 % v případě dat nasnímaných v době bez rozvinuté vegetace (březen - květen), naopak při skenování v pozdější době (červen - září) je úspěšnost pouze 30-40 % (Brázdil et al., 2012). Z důvodu této nedokonalosti je dále prováděna manuální editace.

Další zpracování je již zcela odlišné dle toho, o jaký z výsledných produktů se jedná. Jelikož diplomová práce vychází z DMR 5G, bude následující kapitola zaměřena na zpracování dat vedoucí právě k tomuto výstupu.

2.4.2 DMR 5G

Pokud nebude uvedeno jinak, text této kapitoly vychází z Technické zprávy k DMR 5G (Brázdil et al., 2012).

Ani ruční kontrola robustní filtrace nezaručí, že budou všechny body zařazeny do správné kategorie. V reálném případě se stává, obzvláště v oblastech naskenovaných v hlavním vegetačním období, že kategorie reliéf obsahuje i body správně patřící do kategorie vegetace. Řešením problému je generalizace modelu uvnitř určených polygonů (zemědělsky obhospodařované areály, oblasti se zjevně dočasným charakterem nerovnosti terénu atd.) výběrem reprezentativního bodu v síti 5 x 5m. Zpracovávané oblasti jsou rozděleny na čtverce 5 x 5 m a z každého je vybrán nejnižší položený bod, u kterého lze s maximální pravděpodobností předpokládat, že reprezentuje reliéf. V průběhu určení reprezentativního bodu však musí být zároveň kontrolováno, zda se jeho výška výrazně neodlišuje od výšky bodů okolních, což by mohlo signalizovat chybné měření (tzv. "zbloudilý" paprsek). Tento postup však zákonitě vede k nekonzistentní hustotě dat vzhledem k ostatním areálům. Z tohoto důvodu, ale i kvůli odstranění nepodstatných výškových nerovností terénu, byla ve zbytku území provedena podobná generalizace terénu do sítě 1 x 1 m. Výsledkem popsanych postupů je tak množina skutečně měřených nerovnoměrně rozložených výškových bodů zachycujících terénní reliéf.

Jelikož LLS ze své podstaty nemůže pořídit data zobrazující terénní reliéf v oblastech vodních ploch, pod budovami a částečně i v hustých vegetačních porostech, je nutné model v těchto místech doplnit interpolací z nepravidelné sítě blízkých okolních bodů. Model je doplněn o body v pravidelné síti 5 x 5 m a to v oblastech s minimální plochou 25 m² bez LLS měření. V případě vodních ploch bylo interpolováno pouze do vzdálenosti 15 m od břehové čáry dovnitř vodní plochy. Tyto uměle vytvořené body jsou současně zaznamenány do speciálního souboru pro případnou potřebu jejich identifikace.

Dalším krokem zpracování je zjednodušení modelu při zachování maximální úplné výškové chyby a odstranění systematické složky měření. Systematická složka byla zjištěna pomocí testování absolutní přesnosti výškového měření. Testování probíhalo na komparačních základnách, které tvoří geodeticky zaměřená lokální polohová a výšková pole. Například v pásmu střed byla zjištěna systematická složka chyby měření $c_H = -0,034$ m. Konečným procesem je transformace souřadnic do referenčního souřadnicového systému S-JTSK. Výsledkem zpracování jsou tedy georeferencované soubory výškový bodů DMR 5G reprezentované souřadnicemi X, Y v systému S-JTSK a výškou H ve výškovém referenčním systému Bpv, ve kterém probíhá zpracování bodů již od začátku.

Po získání konečného modelu byla, alespoň na vzorcích dat, kontrolním geodetickým měřením dokumentována a ověřována přesnost interpolace výšky bodu z DMR 5G v různých typech terénu. V terénu bylo pomocí trigonometrické nivelace zaměřeno celkem 3014 podrobných bodů v 21 lokalitách. Body současně byly rozděleny do pěti kategorií podle půdního krytu a charakteristiky povrchu v době snímkování. Pro každý bod byly změřeny jeho souřadnice X, Y, H_{geo} a zároveň byla bilineární interpolací vypočítána jeho výška H_{5G} z DMR 5G. Výškový rozdíl byl označen jako ΔH a jeho statistickým zpracováním byly určeny v jednotlivých kategoriích následující parametry přesnosti:

Kategorie povrchu	systematická chyba [m]	úplná střední chyba [m]	maximální chyba [m]
terénní hrany u komunikací	-0,11	0,18	0,66
zpevněné plochy	-0,09	0,13	0,37
orná půda	-0,07	0,14	0,56
louky a pastviny	-0,03	0,21	0,42
křoviny, stromořadí a lesy	-0,06	0,13	0,46
průměrná hodnota	-0,07	0,14	0,49

Tab. 3: Přesnost DMR 5G v závislosti na povrchu (zdroj: Brázdil et al., 2012)

Z tabulky mimo jiné vyplývá, že deklarovaná úplná střední chyba 0,18 m je překročena v kategorii luk a pastvin. Tato skutečnost je dána tím, že v těchto oblastech bylo málo paprsků, které pronikly vegetací až k samotnému terénu a naopak nebyla nalezena vhodná metoda, která by tyto paprsky (tj. paprsky dopadlé na nízkou vegetaci), přiřadila do správné kategorie. Dále je možné si všimnout, že úplná střední chyba u terénních hran komunikací dosahuje hodnoty 0,18 m, což zcela přesně odpovídá deklarované přesnosti modelu. Tento fakt je způsoben parametry nastavenými v průběhu zpracování u generalizačních a filtračních procesů.

Zároveň je nutné si uvědomit, že lokálně se chyba mění a zvětšuje s rostoucím sklonem reliéfu (Karel; Kraus, 2006). Jelikož se diplomová práce zaměřuje na horská území s velkým sklonem reliéfu, je očekávané, že chyba v zájmovém území bude dosahovat vyšších hodnot, než je průměrná hodnota pro celý model.

3 Publikované metody detekce zlomových hran

Hledání zlomových linií v datech LLS se v odborné literatuře řeší především zpracováním rastrové formy DMT, ať už je detekce založena na odtokových poměrech (O'Callaghan; Mark, 1984), aplikaci hranových filtrů (Brugelmann, 2000, Lohmann, 2003 či Wild; Krzystek; Madani, 1996), hledání míst s extrémní tangenciální křivostí terénu (Baruch; Filin, 2008, Passalacqua et al., 2012), či na společné analýze výškového rastru a rastru intenzity odrazů bodů LLS (Clode et al., 2004, Toskano et al., 2013). LLS však poskytuje data ve formě mračna bodů, které je nutné nejdříve na rastr převést. Tento proces přináší nežádoucí vyhlazení terénu a tvarů reliéfu, což má za následek snížení přesnosti detekovaných linií (Jaroš; Lysák, 2012). Další nevýhodou je, že výsledkem zpracování je zlomová linie ve 2D. Vzhledem k těmto nedostatkům je vyvíjena snaha vytvořit postup, který bude modelovat hrany přímo z mračna bodů a jehož výsledkem bude linie ve 3D.

Společným prvkem prací, které se zabývají detekcí zlomových linií z mračna bodů, je co nejpřesnější vyjádření terénu v okolí zlomové linie minimálně jednou matematickou funkcí. Tato myšlenka indikuje, že je nutné před zahájením procesu znát alespoň přibližný průběh hledané linie, abychom věděli, které z bodů využít pro výpočet aproximační funkce.

V následujících kapitolách budou stručně popsány základy jednotlivých metod založených na zpracování bodového mračna. Pokud není uvedeno jinak, text vychází vždy z práce autora uvedeného v názvu kapitoly.

3.1 Bailly et al. (2008)

Tato práce využívá jednoduchý princip založený na mračnu bodů a příčných profilech. Pomocí profilu lze popsat průběh terénu v předem daném směru. Jedná se o funkci závislosti nadmořské výšky na jedné proměnné, a to na vzdálenosti od počátku profilu. Jelikož však profil

zachycuje podobu terénu pouze v jediném směru, je nutné pro správný popis terénu vytvořit více profilů svírajících mezi sebou co největší úhel (Jaroš, 2011). V konkrétní problematice terénních hran přináší nejvíce informací profil, který je vedený kolmo na hranu. Vzhledem k tomu, že se autoři zaměřují na detekci odvodňovacích příkopů v zemědělské krajině jižní Francie, které se v naprosté většině případů nacházejí na hranicích polí a pozemků a je možné je tedy apriorně předpokládat právě v těchto místech, mohou si dovolit pracovat pouze s jedním směrem příčných profilů. Ty jsou tvořeny pouze ve směru kolmém na předem definované hranice pozemků.

Celý algoritmus se skládá ze tří hlavních kroků. Prvním je tvorba příčných profilů. Území je rozděleno pomocí okna o velikosti 10 x 2 m, které se posouvá po celé délce hranice pozemku tím způsobem, že jeho těžiště vždy leží právě v místě hranice. Z bodů, které leží v jednotlivých oknech, se vytvoří příčný profil, na kterém je následně provedena analýza křivosti. Dosažené výsledky jsou nakonec klasifikovány. Pokud vykazují (dostatečnou) konkávnost profilu, jsou označeny jako místo, kudy prochází příkop.

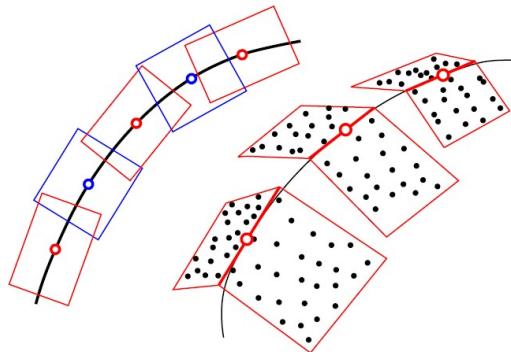
Z praktického hlediska se spíše než o detekci hran jedná pouze o ověření, zda je hranice pozemku tvořená odvodňovacím kanálem či nikoliv. Z tohoto důvodu nelze postup aplikovat na obecnou problematiku naleznutí polohy terénních hran.

3.2 Kraus, Pfeifer (2001)

Práce autorů Krause a Pfeifera se v první části zabývá postupy předzpracování dat vyvíjených na Technické Univerzitě ve Vídni. Především se jedná o kalibraci jednotlivých měřických pásů a robustní interpolaci pro obdržení filtrovaných dat. Současně však pokládají základy metody detekce hran, ze které vycházejí i další autoři. Základní myšlenkou jejich práce je, že zlomovou linii představuje průsečnice dvou ploch - svahů. Nejdříve je tedy nutné určit body, které charakterizují průběh terénu v okolí hledané zlomové linie. Toho se dosáhne pomocí obalové zóny s předem definovanou velikostí, vytvořené okolo prvotně odhadnuté linie. Odhad průběhu hrany je v práci získáván aplikací hranových filtrů na rastrový model terénu vytvořený ze vstupních dat LLS. Díky tomu již první aproximace hrany dosahuje relativně vysoké přesnosti, která se navíc v celém průběhu linie, respektive v celém území signifikantně nemění. Tento fakt umožňuje volit velikost obalové zóny malou (5 metrů) a neměnnou.

Všechny body spadající do obalové zóny lze vzápětí rozdělit na dvě podmnožiny dle toho, zda se nacházejí vlevo či vpravo od prvotní linie. Každá podmnožina tedy v ideálním případě obsahuje body aproximující jeden z k linii přilehlých svahů. V tuto chvíli je třeba zmínit,

že předchozí dva kroky probíhají ve 2D prostoru, kdy se zanedbává výška bodu neboli z souřadnice. Následující postup se však již vrací do trojrozměrného prostoru.



obr. 4: Princip překrývajících se oblastí pro aproximaci terénu (zdroj: Briese, 2004)

Pokud již máme určeny body vstupující do algoritmu, je možné jimi pomocí metody nejmenších čtverců proložit dvě roviny (pro každý svah jedna) a naleznout jejich průsečnici. Se svahy se však nezachází jako s celky, ale zpracovávají se po jednotlivých, malých a překrývajících se segmentech, jak je naznačeno na obr. 4. Pro každý segment je v jeho rámci určen jeden bod ležící na průsečnici aproximačních rovin, který se dále stává uzlovým bodem zpřesněné hrany. Získaná linie však není hranou konečnou, ale použije se k novému rozdělení bodů do dvou podmnožin a celý výpočet se iteračně opakuje až do doby, kdy poloha hrany již nevykazuje signifikantní změny, nebo dokud počet iterací nedosáhl předem zadaného počtu.

3.3 Briese (2004)

Na výše uvedený postup navázal Briese, který metodu rozšířil o několik vylepšení. Například si uvědomuje, že svah má ve svých různých částech různý tvar, přičemž pro správnou detekci hrany je nejdůležitější chování terénu v blízkém okolí hrany. Z tohoto důvodu do aproximace rovin zavádí váhovou funkci, v závislosti na kolmé vzdálenosti od odhadované hrany. Bodům nejdále od hrany přiřazuje nízkou váhu a naopak. Zároveň však bodům v bezprostřední blízkosti hrany přiřazuje nízkou váhu kvůli faktu, že v případě ne zcela přesného průběhu odhadu linie tyto body mohou ve skutečnosti ležet již na druhém svahu, než je žádoucí.

Autor se v práci také zaměřuje na bližší popis určení parametrů prokládané roviny. Zmiňuje, že je možné pracovat ve 3D či 2,5D prostoru. V případě setrvání v trojdimenzionálním prostoru lze použít řešení založené na vlastních číslech. Tato metoda je ještě podrobněji popsána např. v Pfeifer (2002) či Stankevicius (2011). Hledaná je taková rovina, pro kterou součet druhých mocnin (vážené) ortogonální vzdálenosti jednotlivých bodů od této roviny

dosahuje minimální hodnoty. Rovinu je možné určit normálovým vektorem n a konstantou c . Pokud od souřadnic všech prokládaných bodů v prvním kroku odečteme jejich průměr, docílíme toho, že výsledná rovina prochází počátkem lokálního souřadnicového systému, což z praktického hlediska přinese eliminaci konstanty c . Lze tedy říci, že rovina aproximující terén je určena systémem

$$(A^T W A - \lambda E)n = 0,$$

kde $A = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \bar{y}_1 & \bar{z}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{x}_n & \bar{y}_n & \bar{z}_n \end{pmatrix}$ je matice redukováných souřadnic prokládaných bodů, $W = \text{diag}(w_i)$ je

matice vah jednotlivých bodů a E je matice jednotková. Výsledkem předchozí rovnice jsou tři vlastní čísla λ_1, λ_2 a λ_3 , respektive jim odpovídající vlastní vektory n_1, n_2 a n_3 . Jelikož nás zajímá pouze řešení, pro něž platí minimální součet odchylek bodů od roviny měřeno v ortogonálním směru, je hledaným normálovým vektorem roviny vektor, který odpovídá vlastnímu číslu nejmenší hodnoty.

Druhým možným přístupem, jehož využití v praxi převládá, je určení roviny v prostoru 2,5D. V tom případě je souřadnice z funkční hodnotou souřadnic x a y tedy

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

Na rozdíl od předchozího řešení se v tomto případě reziduální odchylky neměří ortogonálně od prokládané roviny, ale od roviny parametrické. V geoinformační problematice se za parametrickou rovinu bere rovina horizontální a reziduální odchylky se tak měří ve směru souřadnice z . Výhodou tohoto řešení je možnost zahrnout přímo do postupu určování roviny detekci odlehlých mimoterénních bodů, což prakticky vede k možnosti využít pro detekci hran nefiltrované bodové mračno. Dále je možné jednodušeji do procesu přidávat další pozorování. V neposlední řadě je metoda 2,5D výpočetně jednodušší.

Nakonec se autor v práci zaměřuje na nutnost znalosti prvotního odhadu průběhu linie. Navrhuje postup "narůstání hran", kdy není nutné znát celý přibližný průběh hledané linie, ale pouze její část, která svou délkou odpovídá velikosti jednoho segmentu. V tomto jediném segmentu je pomocí výše uvedených kroků určena zpřesněná poloha zlomové linie, což mimo jiné znamená, že je znám její směr v daném místě. V dalším kroku je pak tato zpřesněná část hledané linie extrapolována, jsou spočteny hranice sousedního segmentu a určeny body, které do tohoto segmentu spadají. Dále je postup iteračně opakován dokud je hrana významná. Nejvhodnějším kritériem významnosti je velikost úhlu, který svírají roviny představující jednotlivé svahy. Pokud tento úhel překročí zadanou mez (v citované práci 170°), hrana již není

významná a proces se ukončí. Postup narůstání hran však selhává v místech, kde hledaná hrana náhle mění svůj směr a v místech, kde se hrana rozděluje na dvě.

Největší překážkou, která prakticky neumožňuje aplikovat postup představovaný Briesem a Krausem s Pfeierem přímo na řešenou problematiku detekce vodních toků z dostupných dat, je nutnost relativně velké přesnosti vstupní aproximace linie pro tyto metody.

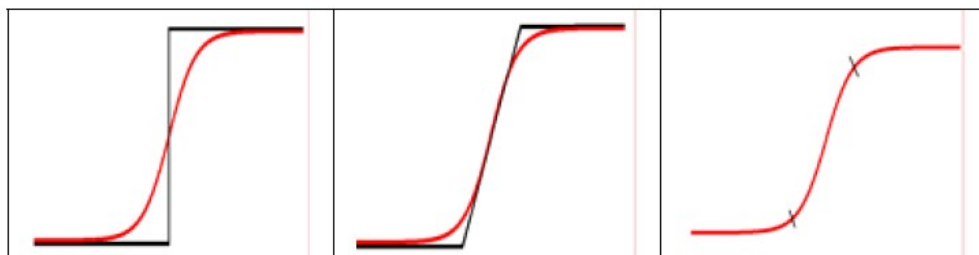
3.4 Briese, Mandlbürger, Ressler, Brockmann (2009)

V této práci je popsán postup určení prvotní aproximace hrany i bez znalosti jediného jejího segmentu. Pro každý bod ze vstupního mračna za využití bodů v jeho okolí lze vypočítat plochu druhého stupně neboli kvadriku. Kvadrika popisuje terén v okolí zkoumaného bodu a díky její znalosti lze aplikací metody hlavních komponent spočítat maximální a minimální lokální křivost. Tyto výpočty se provedou nad všemi body mračna. Jelikož jsou hrany definovány jako místa s extrémní křivostí, je možné body, jejichž křivost přesahuje určitou mezní hodnotu, identifikovat jako potenciální body na zlomové linii. Zároveň lze určit i lokální směr zlomové linie, čímž prakticky získáme segment hrany, který je možné extrapolovat a dále postupovat dle metody protínajících se rovin.

Drobnou nevýhodou řešení je fakt, že pro jednu linii algoritmus určí větší počet startovních segmentů. Aby nedocházelo k redundantnímu určování linií, je nutné před začátkem extrapolace daného segmentu ověřit, zda v tomto místě a směru již detekce hrany neproběhla.

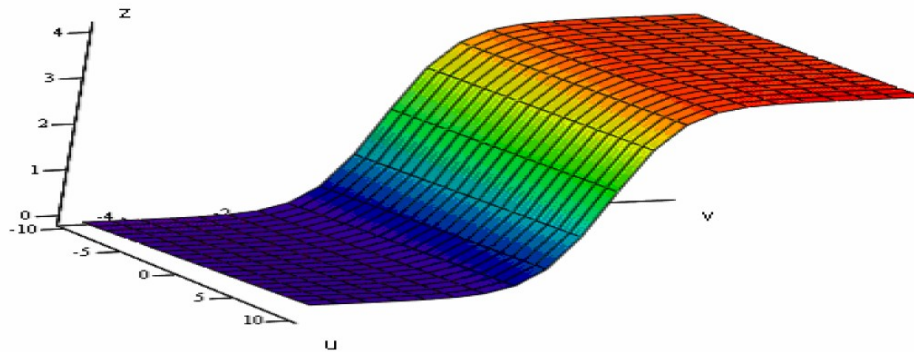
3.5 Brzank, Lohmann, Heipke (2005)

Tato práce studuje změny v pobřežních oblastech Severního moře. Autoři pomocí zlomových linií popisují charakteristické morfologické tvary, jejichž pozice, velikost a tvar se v průběhu času mění. Přesné určení polohy těchto tvarů umožňuje analýzu jejich změny za pomoci dat, které byly pořízeny v jiném časovém období. Práce se zaměřuje na tři tvary hran, které se ve zkoumané oblasti nejvíce vyskytují (obr. 5).



obr. 5: Typické hrany v příbřežních oblastech (zdroj: Brzank; Lohmann; Heipke, 2005)

Jak je patrné z obrázku, všechny hledané hrany jsou v praxi tvořeny dvěma zlomovými liniemi. Velké rozdíly však mohou být v horizontální vzdálenosti mezi oběma liniemi či sklonem jednotlivých svahů a jejich zakřivení. Podstatou metody je, stejně jako u předchozích, co nejpřesnější vyjádření terénu v okolí hrany. V tomto případě se však pro reprezentaci terénu používá pouze jedna funkce - hyperbolický tangens (obr. 6).



obr. 6: 2D hyperbolický tangens (zdroj: Brzank; Lohmann; Heipke, 2005)

První dva případy hran z obr. 5 neodpovídají přesně hyperbolickému tangentu. Vezmeme-li ale v úvahu, že zkoumaným prvkem jsou pobřežní rýhy, jejichž horní a spodní rovina jsou od sebe vzdáleny často méně než dva metry, lze říci, že rozdíl mezi hyperbolickým tangentem a skutečným průběhem terénu je zde menší než šum v datech LLS.

Jednodimenzionální hyperbolický tangens je určen rovnicí

$$z(v) = s \tanh(f(v + p)) + k,$$

kde parametr s udává vertikální vzdálenost mezi horní a dolní plochou, parametr f odpovídá vzdálenosti mezi oběma liniemi maximálního zakřivení – s rostoucím parametrem f vzdálenost klesá a funkce hyperbolického tangensu je podobnější schodovému zlomu. Pokud parametr f klesá, zároveň roste vzdálenost mezi oběma liniemi a hyperbolický tangens se blíží nakloněné rovině. Třetí parametr p určuje přimknutí funkce podle osy v a analogicky parametr k značí přimknutí funkce podle osy z .

Ve dvoudimenzionálním prostoru je potřeba aproximovat jak rovné části zlomu, tak jeho zakulacené části. Z tohoto důvodu se používají dvě verze vycházející z předcházející rovnice. Vždy je přidán parametr α , který vyjadřuje transformaci souřadnic x a y do souřadnic u a v . V případě rovných úseků se v rovnici objevuje ještě parametr t , který určuje sklon funkce ve

směru osy u . V konečném důsledku je tedy v rovnici dvojdimenzionálního hyperbolického tangentu šest parametrů.

$$\begin{aligned}z(u, v) &= s \tanh(f(v + p)) + k + tu \\u &= \cos(\alpha)(x - \Delta x) + \sin(\alpha)(y - \Delta y) \\v &= -\sin(\alpha)(x - \Delta x) + \cos(\alpha)(y - \Delta y)\end{aligned}$$

Pokud dělicí linie změní v rámci části terénu, který je vyjadřován jednou rovnicí, svůj směr více než je zadaná prahová hodnota, je nutné využít rovnici obsahující sedm parametrů. Mimo parametry s , f , k a t se zde objevují parametry u_{shift} a v_{shift} , značící střed oblouku v souřadném systému určeném osami u - v a parametr r definující rádius. Transformace souřadnic x a y bodů LLS do souřadného systému u - v je počítána stejným způsobem jako v případě rovných úseků linie, celá rovnice hyperbolického tangentu má poté následující tvar:

$$z(u, v) = s \tanh\left[f\left(\sqrt{(u - u_{\text{shift}})^2 + (v - v_{\text{shift}})^2} - r\right)\right] + k + a \cos\left[\frac{u - u_{\text{shift}}}{\sqrt{(u - u_{\text{shift}})^2 + (v - v_{\text{shift}})^2}}\right] t$$

Autoři uvádějí, že při vhodně zvolených parametrech, funkce hyperbolický tangens dokáže dobře aproximovat skutečný průběh terénu. Zároveň tato funkce splňuje požadavek malého počtu parametrů. Nevýhodou však je zkreslení výsledného tvaru v případě, že jsou obě hrany blízko u sebe a tím pádem se mezi nimi nachází málo zpracovávaných bodů.

Jako nevýhoda může být vnímán i fakt, že mimo prvotního odhadu průběhu hrany (který se získá aplikací hranového filtru na data v rastrové podobě) je nutné, aby uživatel určil i typ detekované hrany. Každý ze tří výše zmíněných typů hran je totiž z funkčního vyjádření povrchu extrahován poněkud jiným způsobem (schématicky naznačeno na obr. 5).

Metoda detekce hran založená na hyperbolickém tangentu je silně závislá na tvaru hledaných zlomových linií. V oblasti Severního moře, pro kterou byla tato metoda prvotně vytvořena, dosahuje velmi dobrých výsledků. Její využití v jiných oblastech s tvarově odlišnými prvky však není příliš reálné.

4 Vlastní metoda

Následující kapitola je zaměřena na stěžejní, praktickou část předkládané diplomové práce. Nejdříve jsou zde vymezeny některé základní pojmy vážící se k dané problematice a ozřejměna terminologie, která je v práci využívána. Dále je představena metodika a podrobněji rozebrány postupy, které byly využívány. Nakonec jsou prezentovány a zhodnoceny dosažené výsledky včetně popisu území, na kterých byl algoritmus testován.

4.1 Vymezení základních pojmů a terminologie

Reliéf zemského povrchu je značně složitý, ale lze ho rozdělit na jednotlivé geometricky jednoduché plochy, které jsou od sebe odděleny lomy spádu – hranami. Typickými zástupci hran v terénu jsou například hřbetnice, údolnice či úpadnice.

Vodní tok vzniká při soustředění odtékající vody. Jedná se o koryto s vodou, která buď trvale či po delší část roku odtéká z povodí. Povodí jsou části krajiny, které jsou odvodňovány do jednoho profilu a jsou ohraničeny myšlenou čarou v krajině – rozvodnicí. Vodní tok může být přirozený či umělý. Pro přirozený vodní tok se používá množství různých označení, jako jsou bystřina, potok či řeka. Rozdíly mezi jednotlivými označeními nejsou pevně dána a záleží na místních zvyklostech či tradicích (Demek, 1987).

Důležitou charakteristikou vodního toku je jeho podélný profil – tj. závislost nadmořské výšky na vzdálenosti od počátku profilu (pramen). Z geomorfologického hlediska se jedná o tzv. spádovou křivku. Říční eroze a další činnosti řeky v globálu směřují k tomu, aby žádný úsek řeky neměl větší spád než kterýkoliv úsek, nacházející se nad ním proti proudu toku. Během času tedy dochází k vyrovnávání podélného profilu. Pro spádovou křivku je typický parabolický tvar. V horní části toku je obvyklý největší spád s relativně nejvíce nerovnostmi. Vodní tok zde vymílá a snaží se spád zmenšit. Ve střední části toku nerovnosti ubývá a přes

zmenšující se spád díky rostoucímu množství vody je zde řeka ještě schopna nejen dopravovat materiál, ale i erodovat. Naopak na dolním toku se množství vody stále zvětšuje, ale vzhledem k nepatrnému spádu není schopna materiál transportovat a proto zde dochází k akumulaci. Spádová křivka se zde blíží horizontále, se kterou při ústí do moře zcela splývá (Horník, 1981).

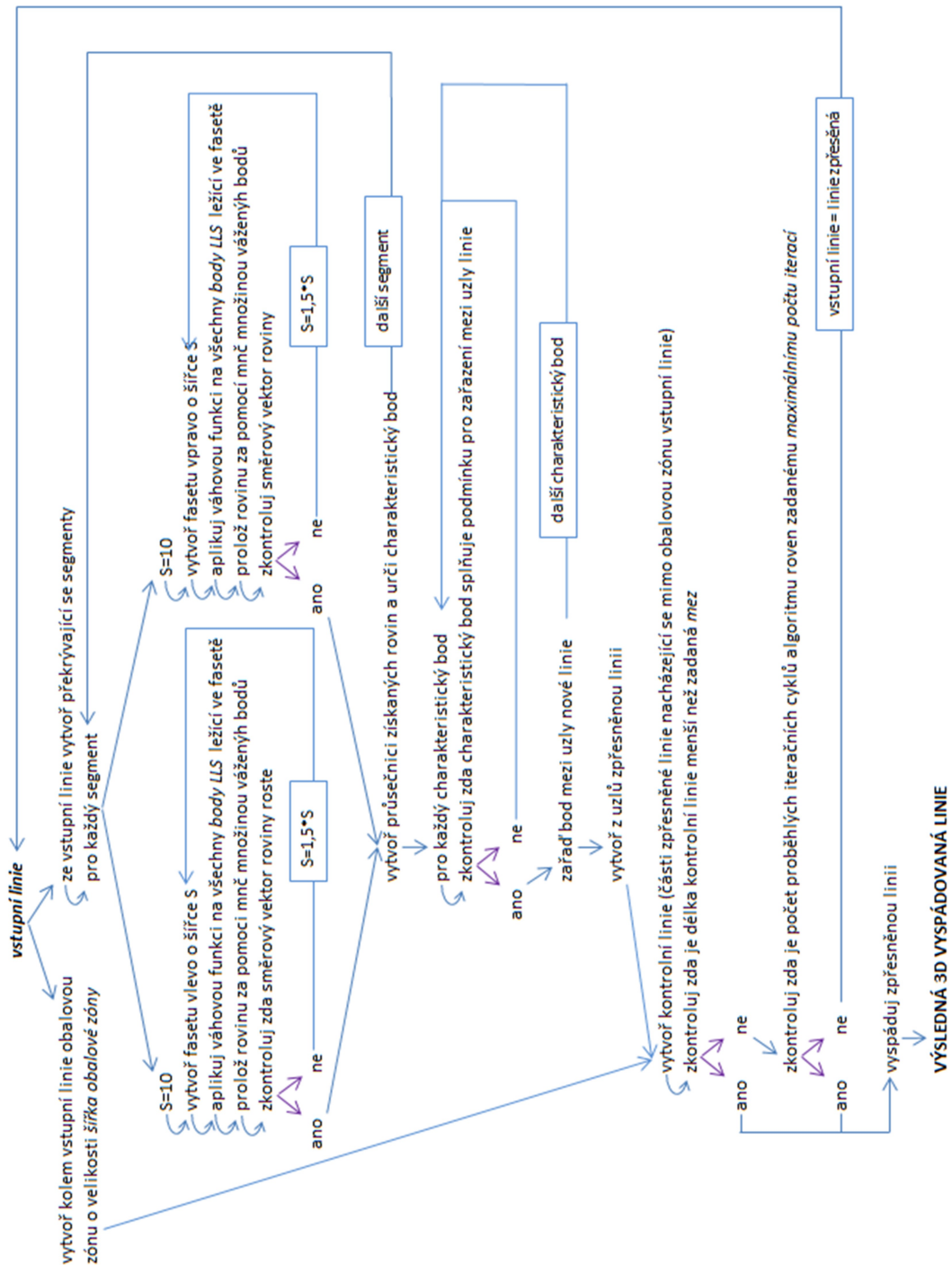
Říční údolí, která jsou jedním z nejdůležitějších prvků v humidních oblastech, jsou protáhlé sníženiny, které vznikají říční činností a sklánějí se ve směru spádu vodního toku (Demek, 1987). Jejich výsledný tvar je výsledkem spolupůsobení eroze vodního toku a svahové modelace. Na horních tocích řek, kde je většinou prudký a nevyrovnaný spád je častým případem silnější hloubková eroze než svahová modelace. Takto vznikají říční soutěsky, což jsou ostře zaříznutá údolí převážně přímého směru, který bývá určen sklonem povrchu. V případě vyrovnaného působení hloubkové eroze a modelace svahů jsou výsledkem údolí typu V. Při převaze svahové modelace vznikají údolí se širokým dnem. Údolí však mohou být dále přemodelována působením ledovce. Ledovcový splaz pohybující se jazykově dolů údolím velmi silně působí na své okolí. Výsledkem je po ústupu ledovce charakteristické přehloubené žlabovité ledovcové U-koryto se strmými skalními stěnami, které jsou nahoře ukončené ostrou hranou, nad níž se mohou rozkládat mírně skloněné konkávní skalní stěny. Rozdíl mezi říčními a ledovcovými údolím je mimo příčného profilu i v podélném. Zatímco říční eroze snižuje prahy a přispívá k odstranění nerovností podélného profilu, pro modelování ledovcem je typické topografické zdůraznění údolních stupňů (Horník, 1981).

Linie vznikající na místě styku dvou přilehlých svahů téhož údolí se nazývá údolnice. Údolnice kopíruje svým průběhem místa největšího vyhloubení v údolí. Ze všech spádnic nacházejících se v údolí má údolnice nejmenší sklon (Demek, 1987). Spádnice je přitom definována jako „čára probíhající ve směru největšího sklonu terénního reliéfu a kolmo k vrstevnicím“ (VÚGTK ©2005 – 2015).

V rámci práce je terén vyjádřen jednou rovnicí vždy pouze v určitém, relativně malém prostoru, který je zde nazýván jako „faseta“. Všechny body, z tohoto prostoru jsou zahrnuty do aproximace terénu pomocí metody nejmenších čtverců. V praxi je možné fasetu popsat jako obdélník s definovanou délkou a šířkou. Faseta je ohraničena z jedné strany částí – segmentem – linie představující vodní tok. Velikost segmentu linie odpovídá délce fasety. Šířka fasety je v prvním kroku definována pevnou velikostí, která musí zohledňovat přesnost prvotně odhadnuté linie a hustotu bodů DMT. V dalších krocích je šířka fasety dynamicky měněna. Zpracování celé linie je postupné po segmentech, které se pro větší přesnost vzájemně překrývají, což vede i k překrývání jednotlivých faset.

4.2 Metodika

Vyvíjená metoda je založena na iteračním protínání k hraně přilehlých svahů. Zaměření práce na detekci pouze údolnic přináší možnost metodu upravit pro tento konkrétní typ hrany a tím dosáhnout lepších výsledků i z méně přesné vstupní aproximace linie než při použití nemodifikované metody extrakce obecných hran.



obr. 7: Schéma používané metody (zdroj: vlastní tvorba)

Navrhovaný postup, který je znázorněn na obr. 7, lze rozdělit na několik hlavních mezikroků. Zaprvé je nutné vhodně aproximovat terén. Mimo určení parametrů aproximační funkce je v tomto kroku zahrnut i výběr bodů, ze kterých jsou parametry vypočítávány, respektive určení velikosti okolí původního odhadu linie, ze kterého se tyto body získají. Dalším mezikrokem je vytvoření postupu, který umožní ze znalosti aproximace svahů údolí extrahovat jejich stykovou linii, tedy údolnici. Jelikož se jedná o iterační metodu, musí být součástí i vytvoření podmínky pro ukončení algoritmu. Třetím a posledním krokem je vyspádování výsledné linie způsobem, aby v celém svém profilu klesala.

4.2.1 Aproximace terénu

Terén lze popsat řadou funkcí, například polynomy různých řádů. V práci je však využito pouze polynomu prvního řádu neboli roviny. Rovina má velkou výhodu v malém počtu parametrů, které lze jednoduše zjistit pomocí metody nejmenších čtverců.

Obecná rovnice roviny je definována jako $Ax + By + Cz + D = 0$. Pro jednodušší výpočty lze rovnici upravit takovým způsobem, aby parametr C byl roven 1. Dále tedy bude pracováno s rovinou určenou rovnicí $ax + by + z + d = 0$, kde d je úsek na ose z , $a = tg\beta$ a $b = tg\gamma$ jsou směrnice průsečnic roviny s rovinami souřadnic (Böhm; Radouch, 1978). Za nejvhodnější bereme takovou rovinu, pro kterou platí, že součet vzdáleností jednotlivých bodů od roviny ve směru osy z , je minimální. Označíme-li souřadnice bodu $[X,Y,Z]$, musí tedy ekvivalentně platit: $(Z - z)^2 \rightarrow \min$

$$z = -ax - by - d$$

$$f_{(x,y,z)} = \sum (Z + aX + bY + d)^2 \rightarrow \min$$

Splnění této podmínky se docílí položením parciálních derivací podle jednotlivých neznámých rovnajících se nule.

$$\frac{\partial f}{\partial a} = a \sum X^2 + b \sum XY + d \sum X + \sum XZ = 0$$

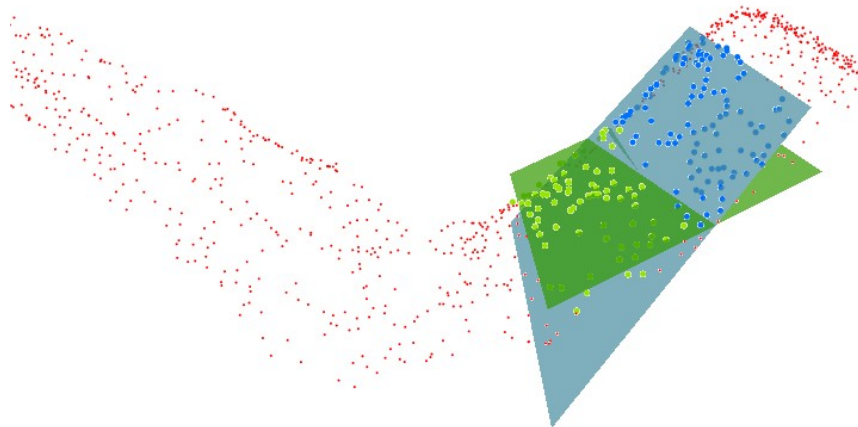
$$\frac{\partial f}{\partial b} = a \sum XY + b \sum Y^2 + d \sum Y + \sum YZ = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial d} = a \sum X + b \sum Y + dn + \sum Z = 0; \text{ kde } n \text{ je počet měření}$$

Z těchto tří rovnic se pomocí matic vypočtou neznámé parametry a , b , d .

4.2.1.1 Určení šířky fasety

K výpočtu parametrů aproximační roviny jsou využity všechny body v určeném okolí segmentu zpracovávané linie (tj. ve fasetě). Jelikož má na přesnou polohu údolnice největší vliv terén v její bezprostřední blízkosti, je vhodné pracovat s co nejmenší šířkou fasety. S klesající šířkou však roste nebezpečí, že odchylka skutečné údolnice od jejího odhadu bude větší než použitá šířka a obě fasety budou tedy obsahovat body ze stejného břehu. Pokud takto získanými body proložíme roviny, jsou vzájemně téměř rovnoběžné a úhel mezi nimi je velice malý. Tato situace je zachycena na obr. 8, kde se do výpočtu dostaly pouze zelené, respektive modré body. Poznatku, že roviny v takovémto případě svírají malý úhel, je využito v první verzi algoritmu. Pro každou dvojici odpovídajících si rovin je dle vzorce $\cos\varphi = \frac{|n_\rho * n_\sigma|}{|n_\rho| * |n_\sigma|}$, kde n_ρ a n_σ jsou normálové vektory rovin vedené směrem nad povrch (tj. rostoucí souřadnice z), spočten úhel, který vzájemně svírají. Pokud je tento úhel menší než daná mez (např. 10°), je šířka obou faset zvětšena na 1,5 násobek své původní šířky. V ideálním případě rozšíření fasety zahrne i body správného svahu, respektive tyto nově přidané body vykompenzují body, které leží ve větší blízkosti dělicí linie a tedy ve špatném svahu. Proces rozšiřování fasety lze iteračně opakovat, než je splněna podmínka minimální velikosti úhlu. Tento přístup přináší eliminaci odlehlých průsečnic, které vznikají v případě protínání rovin aproximujících stejný svah údolí.



obr. 8: Malé šířky faset vedoucí k aproximaci pouze jednoho ze svahů (zdroj: vlastní tvorba)

Uvedený postup ovšem selhává například v situacích, kdy prvotní linie leží blíže k významné hřbetnici než k hledané údolnici. V takovém případě zpřesněná linie konverguje k hřbetnici, neboť tato hrana také splňuje podmínku dostatečné velikosti svírajícího úhlu. Z toho důvodu musí být přistoupeno ke spočtení orientovaného úhlu. Pokud neuvažujeme jiné

zlomové hrany než údolnice, je jasné, že terén přiléhající ke zlomové linii má v příčném směru konkávní tvar. Pro každou dvojici odpovídajících si normálových vektorů je proto určena rovina ω , která oba tyto vektory obsahuje. Zároveň je určen vektor u , který odpovídá průsečnici roviny ω s rovinou horizontální. Následně jsou již podle jednoduchých vzorců $\cos\varphi_\rho = \frac{|u \cdot n_\rho|}{|u| \cdot |n_\rho|}$ a $\cos\varphi_\sigma = \frac{|u \cdot n_\sigma|}{|u| \cdot |n_\sigma|}$ spočteny úhly svírané normálami rovin s vektorem u . Jejich vzájemným odečtením je konečně určen úhel mezi normálovými vektory rovin, který je kladný či záporný v závislosti na faktu, zda nalezená hrana odpovídá spíše údolnici či hřbetnici. Tato modifikace úspěšně odstraní problém detekci hřbetnic namísto údolnic.

V další verzi algoritmu je poznatek o průběhu terénu přilehlého k hraně aplikován na obě z faset samostatně. Údolnice prochází nejnižším bodem příčného profilu, z čehož plyne, že směrový vektor jednotlivých polorovin aproximujících terén, který je vedený kolmo k dělicí linii, musí mít kladný koeficient u souřadnice z . Není-li předchozí podmínka splněna, lze s určitostí předpokládat, že daná rovina neaproximuje správný břeh, respektive svah, tedy že body nejsou vybrány optimálně. V takovém případě je nutné fasetu rozšířit. Velkou výhodou tohoto postupu je řešení každé fasety samostatně. Rozšiřuje se pouze ta faseta, která neaproximuje správný svah, což přispívá ke splnění podmínky co nejmenší šířky fasety.

Jelikož v praxi mohou nastat situace, kdy ani další rozšiřování fasety nevede k výběru vhodných bodů pro aproximaci terénu (viz kapitola 4.2.4.), je nutné nastavit i její maximální přípustnou šířku. Tímto krokem se lze vyhnout možnému zacyklení algoritmu, který by nastal v případě rozšiřování fasety přes hranice oblasti, ze které jsou data LLS k dispozici. Zároveň se předejde situaci, kdy by aproximaci malého horského údolí ovlivňovaly i stovky metrů vzdálené body.

Nakonec je nutné zmínit, že vzhledem k nepravidelně rozmístěným bodům v DMT se může stát, že ve fasetě je méně než tři body, což neumožňuje proložení roviny. Tento problém nastává především v případě, že v okolí toku je hustá vegetace a po filtraci zde tedy chybí body terénu. Zároveň je ovšem nutné říci, že ani tři body rozhodně nezaručují správnou aproximaci svahu. Z tohoto důvodu byla do procesu zavedena podmínka, že ve fasetě musí být minimálně 10 bodů. Pokud tato podmínka není splněna, je šířka fasety opět zvětšena na 1,5 násobek šířky předchozí.

4.2.1.2 Využití vah

Využití vah umožňuje přiřadit větší důležitost určité množině bodů a tím lépe zachytit průběh terénu v dané oblasti. Základem je stanovení bodů s určitostí ležících na svahu, pro který je

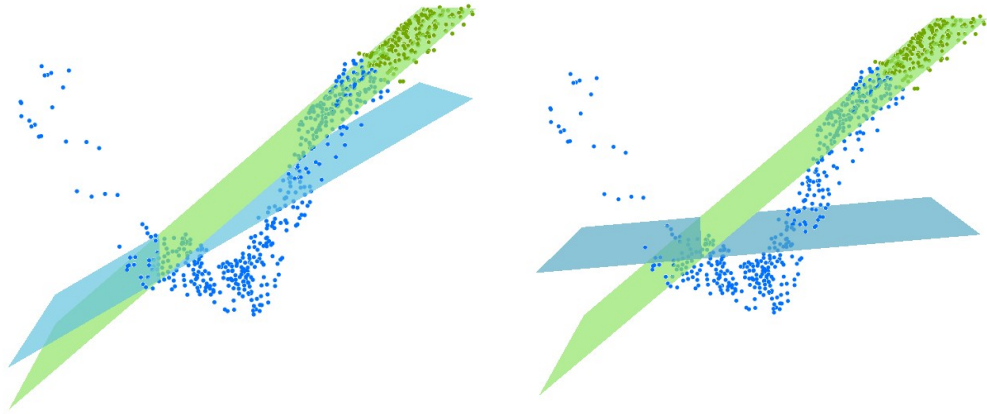
určována aproximující rovina. Takovým bodům je následně pomocí váhové funkce určena vyšší váha než bodům, u nichž je větší pravděpodobnost, že leží na protějším svahu, případně odpovídají korytu toku. Určování těchto bodů je prováděno při iteračním rozšiřování fasety.

Pokud po prvním výpočtu parametrů roviny pomocí nevážené metody nejmenších čtverců tato rovina nesplňuje podmínku růstu směrem od odhadnuté linie, je možné tvrdit, že hraně blízké body neaproximují správně žádaný svah a že vybrané body (minimálně z větší části) připadají svahu protilehlému. Čím blíže je bod k prvotní linii, tím je pravděpodobnost, že patří do špatného svahu, větší. Z tohoto důvodu je možné po rozšíření přiřadit větší váhu bodům vzdálenějším od linie, respektive bodům, které do výpočtu vstupují nově. Jako vhodná váhová funkce se ukazuje funkce lineárně rostoucí až do vzdálenosti rovnající se polovině šířky fasety v předchozím kroku. Bodům ležícím od přímky dále než zmíněná hranice je přiřazena váha jedna (obr. 9).

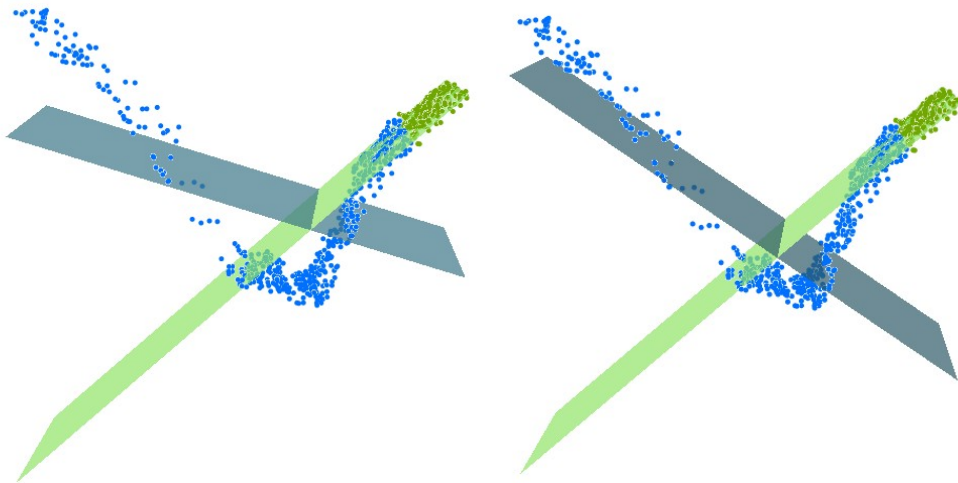


obr. 9: Používaná váhová funkce (zdroj: vlastní tvorba)

Postup zahrnující využívání rozdílných vah bodů především urychluje konvergování výsledné linie k údolnici. Na následujících obrázcích je znázorněna situace z reálných dat, kdy prvotní linie vykazuje velkou odchylku od skutečné údolnice. Rovina aproximující body na pravé straně od linie (tj. body zelené) splňuje již od základní šířky své fasety podmínku růstu a dále se tedy nerozšiřuje. Rovina prokládaná levými (modrými) body však tuto podmínku nesplnila a šířka fasety tedy byla postupně rozšiřována na jeden a půl násobek šířky předchozí. Porovnáme-li vždy dvojici obrázků zobrazující výsledek pro stejnou šířku fasety, je zřejmé, že v případě využití vážené metody nejmenších čtverců vystihuje rovina daný svah lépe.



obr. 10: 3D pohled na aproximační roviny v případě velké nepřesnosti prvotního odhadu linie pro šířky faset 10, respektive 50,6 m za využití nevážené (vlevo) a vážené (vpravo) metody nejmenších čtverců (zdroj: vlastní tvorba)



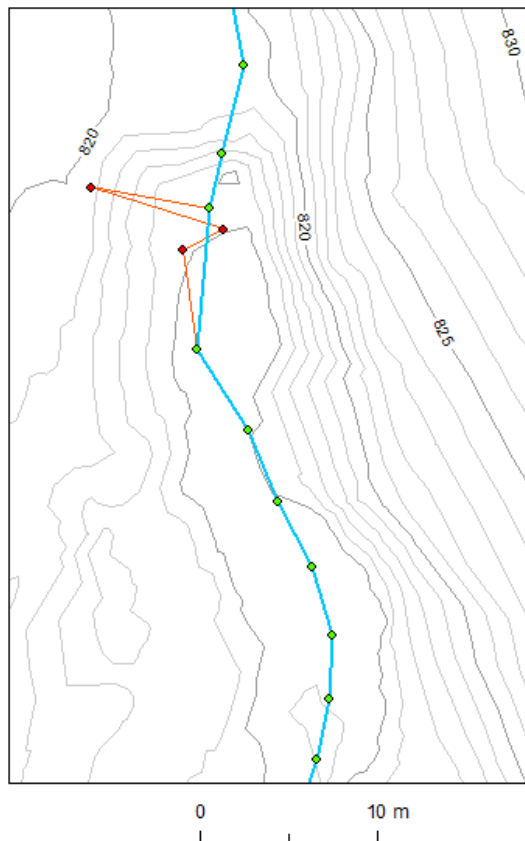
obr. 11: 3D pohled na aproximační roviny v případě velké nepřesnosti prvotního odhadu linie pro šířky faset 10, respektive 75,9 m za využití nevážené (vlevo) a vážené (vpravo) metody nejmenších čtverců (zdroj: vlastní tvorba)

Váhová funkce je využívána pouze v případě, že šířka fasety je větší než šířka inicializační. Zároveň lze konstatovat, že důsledky použití váhové funkce se zvětšují s rostoucí šířkou fasety.

4.2.2 Vytvoření linie z průsečnic

Výsledkem předchozích kroků algoritmu jsou pro jeden segment prvotní linie dvě roviny aproximující přilehlý terén levého a pravého břehu, respektive přímka v prostoru, která je průsečnicí těchto rovin. Dále je pro každý segment určený jeden charakteristický bod v prostoru, který leží v průsečíku zmiňované průsečnice s přímkou kolmou na segment vedenou jeho středem. Po obdržení bodů pro všechny segmenty celé linie se tyto body stávají uzly pro další aproximaci údolnice a postup se iteračně opakuje. V tomto kroku je však nutné si uvědomit, že se mezi těmito body mohou objevit i poněkud odlehlá měření, která jsou

způsobena nedokonalým přiblížením terénu rovinou či atypickým průběhem terénu, na který není algoritmus připraven (více v kapitole 4.2.4). Z tohoto důvodu byly z dalšího zpracování, kterým je tvorba nové aproximace hrany, vyjmuty body, jež v porovnání s ostatními vykazovaly odlehlou polohu, či by jejich zařazením do průběhu linie tato linie nabývala nepřirozeného tvaru, jako jsou ostré změny směru průběhu linie (obr. 12). Zároveň jako uzel není označen takový bod, který leží na průsečnici rovin, z nichž alespoň jedna nesplňuje podmínku růstu.



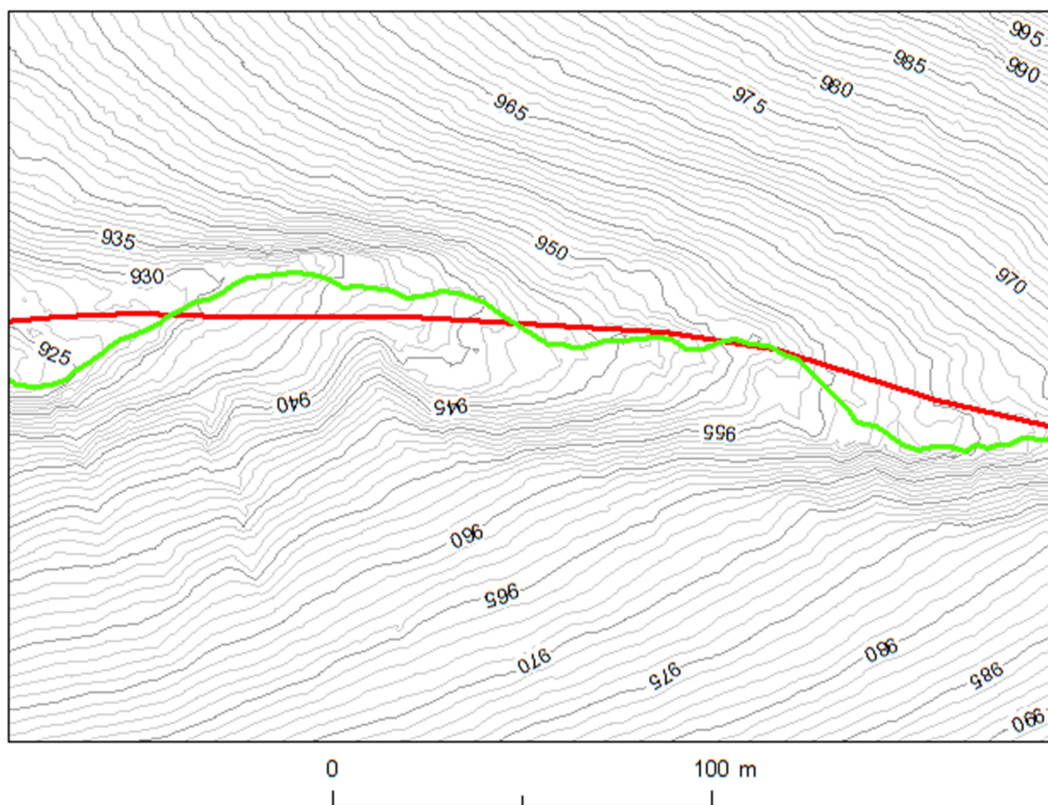
obr. 12: Odebrání uzlových bodů (zdroj: vlastní tvorba)

4.2.3 Ukončení algoritmu

Po vytvoření nové aproximace vodního toku se celý postup iteračně opakuje. Algoritmus je ukončen v případě splnění podmínky, že nová linie při porovnání s linií původní, respektive s linií vzešlou z minulého cyklu, nevykazuje signifikantní změny. Pro účely kvantifikace proběhlých změn je okolo zpřesňované linie vytvořena obalová zóna určité šířky. Dále jsou detekovány všechny úseky nové tj. pro právě proběhlý cyklus výsledné linie, které leží mimo zmiňovanou obalovou zónu. Pokud žádný takový úsek neexistuje, respektive pokud součet jejich délek nepřesahuje určitou hodnotu, je průběh algoritmu ukončen. V opačném případě probíhá další iterace. Šířku obalové zóny stejně jako maximální přípustnou délku úseků linie mimo obalovou zónu může nastavit uživatel dle specifických nároků pro danou úlohu.

Druhou podmínkou ukončení algoritmu je počet iterací. Především v situacích, kdy se na zpracovávaném toku nachází několik pro představovaný algoritmus problematických úseků, nemusí být předchozí podmínka splněna ani po několika iteracích. Z tohoto důvodu je vhodné nastavit maximální počet proběhlých iterací. Po posledním iteračním cyklu je zároveň vytvořena další liniová vrstva, která obsahuje pouze úseky výsledné linie nacházející se mimo vytvořenou obalovou zónu. Tato vrstva následně funguje jako identifikátor možných nepřesností pro případnou ruční kontrolu a editaci.

Jeden z konkrétních výsledků algoritmu je zobrazen na obr. 13. Zelená linie značí linii vzešlou ze třetího iteračního cyklu. Poloha této linie se již oproti linii z předchozího iteračního cyklu nezměnila, a byla proto prohlášena za linii výslednou. Zároveň je jasné, že se v kontrolní vrstvě úseků nové linie ležících mimo obalovou zónu linie předchozí nenachází žádný prvek.



obr. 13: Původní a zpřesněná linie po průběhu algoritmu (zdroj: vlastní tvorba)

4.2.4 Problémová místa

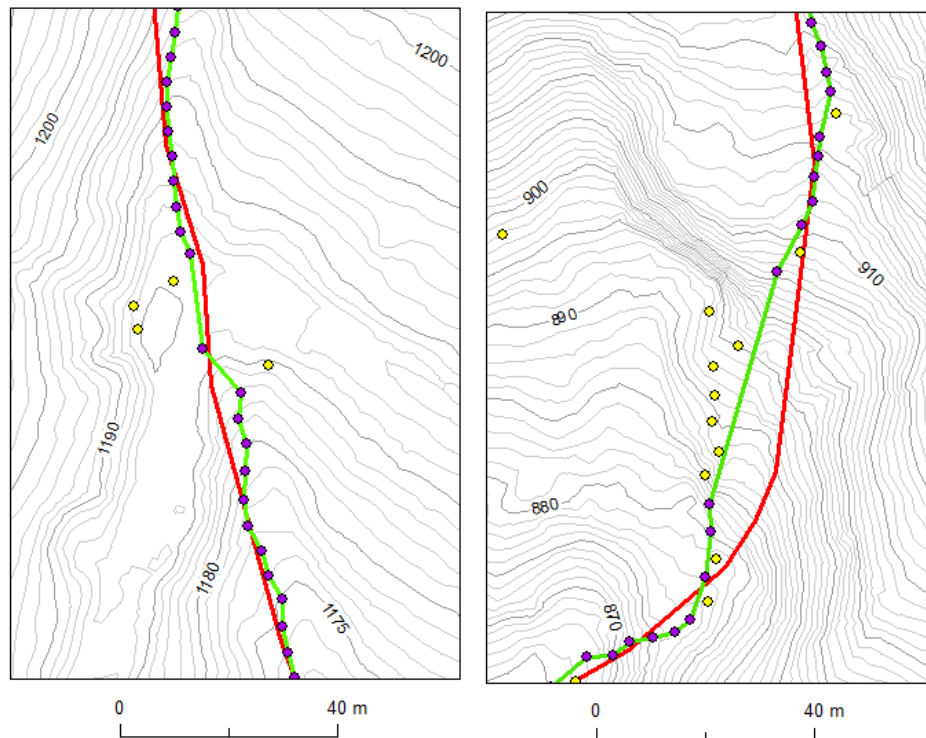
Obdržené výsledky závisí na vstupních datech. Algoritmus je prvotně koncipovaný pro sevřená údolí. Pokud se k takovému typu terénu přidá i relativně přesná poloha prvotní aproximace zlomové linie, algoritmus dosahuje výborných výsledků. V reálném případě je však často nutné pracovat i s průběhem terénu, který nemá pro algoritmus zcela ideální parametry. V takových případech se již výrazněji projevují vstupní parametry a různé dílčí postupy algoritmu. Pro

popis chování algoritmů bylo vybráno několik míst, kde byly očekávány nepřesnosti ve výsledku, případně kde byly tyto nepřesnosti odstraněny díky vyšší verzi představovaného algoritmu.

4.2.4.1 Jiné krajinné prvky

První problémové situace nastávají při přítomnosti jiných krajinných prvků, jako jsou například vodopády či cesty přecházející přes vodní tok. Taková místa narušují obecný očekávaný tvar údolí a mohou do detekce zanášet chybu. Typickým projevem těchto situací jsou relativně velké poziční rozdíly mezi charakteristickými body jednotlivých sousedních segmentů vodního toku. Tento případ je zaznamenán na obr. 14 - vlevo.

Jelikož však před tvorbou nové aproximace linie dochází k výběru takových uzlových bodů, aby úhly svírané částmi linie nebyly nepřírodně ostré, je většina takovýchto chybných bodů v procesu odebrána. V této oblasti tak chybí uzlové body a detekovaná linie prochází místem přímo spojujícím uzlové body, které jsou již v neproblémových oblastech. Pokud se však takové místo nachází na začátku či konci linie, není možné určit směr, kudy by linie měla přibližně procházet, a detekovaná linie je ukončena před problémovým místem.

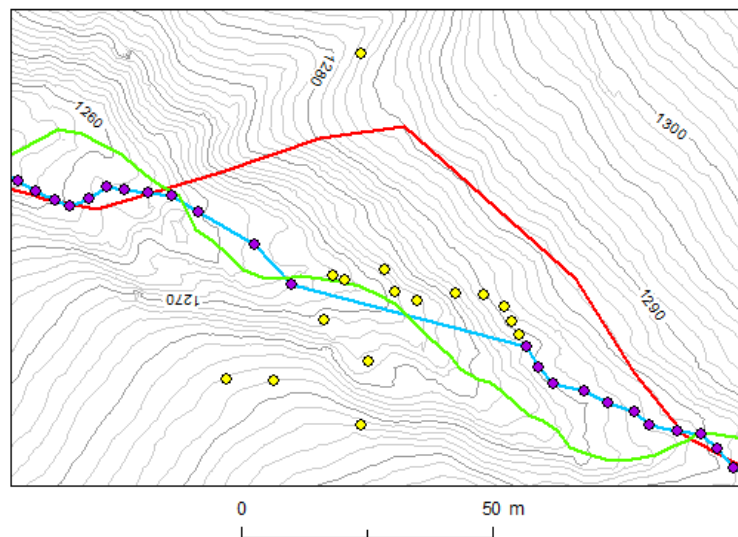


obr. 14: Široká cesta přecházející přes zkoumaný tok (vlevo) a vodopád (vpravo) (zdroj: vlastní tvorba)

Mimo pozičních rozdílů některé krajinné prvky způsobují i nerostoucí průběh roviny, který není pro svah údolí přípustný. Typicky toto nastává u vodopádů. V souladu s dříve

popsaným výběrem uzlových bodů pro další aproximaci linie je i v tomto případě výsledkem v řečené oblasti absence uzlových bodů nové linie (obr. 14 – vpravo).

Důsledkem výše popsaného postupu nezahrnování nepravděpodobných uzlových bodů do další tvorby linie mimo jiné je, že příliš nezáleží, zda směr přibližné linie odpovídá směru skutečného údolí. Před testováním algoritmu bylo očekáváno, že pokud se bude směr linie výrazně lišit od skutečnosti, algoritmus správně neaproximuje terén a postup bude vést k nesprávným výsledkům. V praxi však tato domněnka nebyla zcela naplněna. Výsledkem odebrání nepravděpodobných bodů je přímkový úsek linie. V následující iteraci se tento úsek rozdělí na segmenty a je znovu zpracováván. Konkrétně je tato situace dokumentována na obr. 15. Prvotní odhad hledané hrany znázorněný červenou barvou výrazně neodpovídá pozici a příliš ani směru skutečné údolnice. Následkem toho je v této oblasti velký rozptyl charakteristických bodů segmentu. Žádný z těchto bodů však není zahrnut do tvorby nové linie (zelená barva), která díky tomu prochází oblastí přímočaře, její průběh a směr se však přiblížil skutečné hraně. Při dalším iteračním cyklu tak již dochází k vhodnější aproximaci terénu a výsledná linie (modrá barva) odpovídá skutečnému průběhu údolnice.



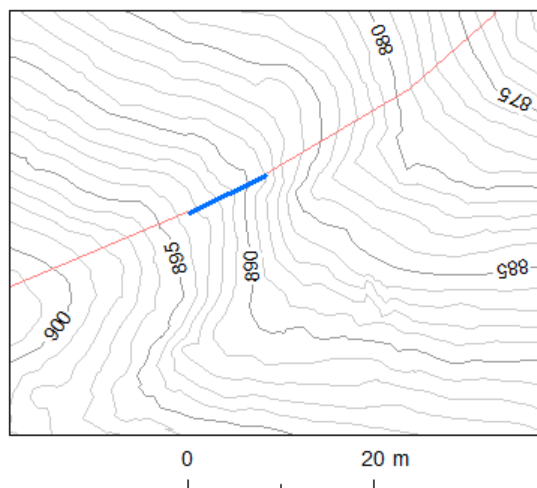
obr. 15: Velká poziční i směrová chyba původní linie (zdroj: vlastní tvorba)

4.2.4.2 Blízká hřbetnice

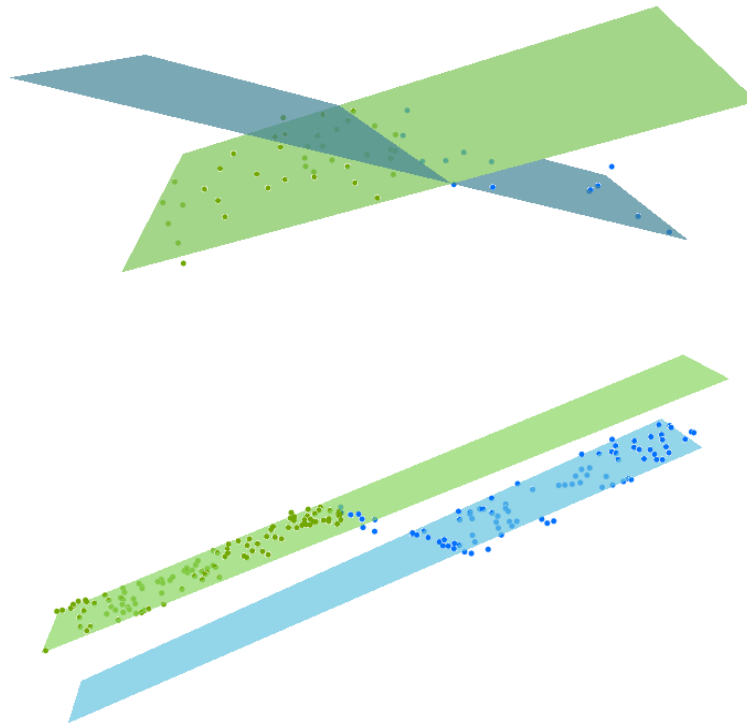
V průběhu práce byla tedy z velké části potlačena závislost na polohové přesnosti prvotní aproximace zlomové linie, která ale musí ležet alespoň ve správném údolí, jehož tvar je dostatečně vhodný pro aplikaci popisovaného postupu. Problém však nastává, když je některý úsek prvotní linie příliš blízko hřbetnici. V takovém případě velice záleží na počáteční šířce fasety. Pokud je šířka facety větší než vzdálenost odhadu linie od hřbetnice, do výpočtu parametrů roviny jsou zařazeny i body ze sousedního údolí, které zanášejí nepřesnost do

aproximace svahu. V případě, že ve výpočtu převažují body správného údolí, rovina má alespoň přibližně správný průběh a díky iteračnímu opakování postupu výsledná linie konverguje ke skutečné údolnici. Pokud je však prvotní odhad linie natolik blízko hřbetnici, že většina bodů, jimiž se prokládá rovina, patří do vedlejšího údolí, výsledná rovina nesplňuje podmínku růstu směrem od hrany. V souladu s představovaným postupem se zvětší šířka fasety, čímž se dostanou do výpočtu roviny další body nesprávného svahu. Stejná situace nastane, pokud se prvotní odhad údolnice nachází již za hřbetnicí neboli v druhém údolí. Také v tomto případě žádné rozšiřování fasety nevede k výběru správných bodů pro výpočet parametrů roviny jednoho ze svahů a algoritmus nutně vede ke špatným výsledkům.

Popsaný problém je na reálných datech ve 3D prostoru znázorněn na následujících obrázcích. Zpracovávaný segment je zvýrazněn na obr. 16 modrou barvou. Prvotní odhad linie zde téměř splývá s hřbetnicí, což vede k situaci, kdy jsou téměř všechny body údolí na jedné straně od odhadnuté linie. Druhá faseta tedy obsahuje téměř výhradně body údolí sousedního. Při základní šířce fasety (obr. 17 – nahoře) nesplňuje ani jedna z rovin podmínku růstu. Zatímco po druhém rozšíření jihovýchodní fasety (ve 3D zobrazení modrá) se do výpočtu dostane dostatek bodů správného svahu a aproximační rovina díky nim získá očekávaný průběh, v případě druhé fasety je průběh roviny i po několikanásobném rozšiřování stále neakceptovatelný (obr. 17 – dole). Charakteristický bod pro tento segment tak není možné zařadit mezi uzly nově vytvořené aproximace vodního toku. Následuje-li po sobě více segmentů odhadu linie s polohou blízko hřbetnici, je výsledkem v oblasti absence uzlových bodů nově vytvořené linie, jejíž následky jsou popsány v předchozí kapitole.



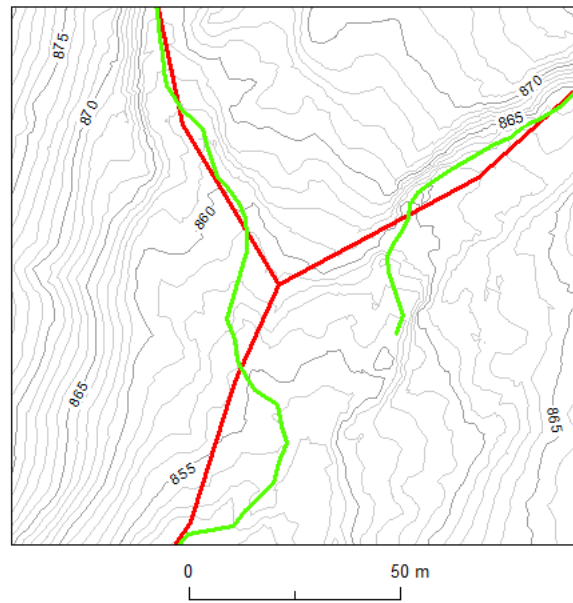
obr. 16: Segment linie ležící v blízkosti hřbetnice (zdroj: vlastní tvorba)



obr. 17: 3D pohled na aproximační roviny pro segment blízky ke hřebetnici v případě inicializačních šířek faset (nahore) a po třetím rozšíření (dole) (zdroj: vlastní tvorba)

4.2.4.3 Soutok

Zajímavé je i chování algoritmu u soutoku dvou vodních toků. V tomto případě stoupá pravděpodobnost, že se do množiny bodů, kterými je prokládána rovina, dostanou také body z vedlejšího údolí. Teoreticky se tato pravděpodobnost ještě zvyšuje s klesající velikostí úhlu, který oba toky při svém soutoku svírají. Navíc se zde může ukládat potokem unášený materiál a tvořit náplavový kužel, který pro algoritmus vytváří neočekávaný prvek oproti ideálnímu průběhu a tvaru údolí. Tyto skutečnosti vedou k situacím, že terén není aproximován zcela vhodně a jdou zde detekovány odlehlé body, které není možné zařadit mezi uzly linie. Pokud je zpracováván tok tokem nižšího řádu (dle Graveliovy stupnice) a linie, která je jeho digitální reprezentací tedy pokračuje i za místem soutoku, algoritmus se s absencí uzlových bodů vypořádá stejně, jak bylo popsáno výše. Větší problém nastává, pokud je tok soutokem ukončen. V tomto případě totiž nelze určit přímý směr přes problematické místo. Z toho důvodu je daná výsledná linie ukončena dříve a nedosáhne spojení s vodním tokem nižšího řádu, do kterého se v reálu vlévá (obr. 18).



obr. 18: Nedokonalé řešení v oblasti soutoku, kdy se zpřesněné linie (zelené) nespojí (zdroj: vlastní tvorba)

4.2.5 Spádování podélného profilu

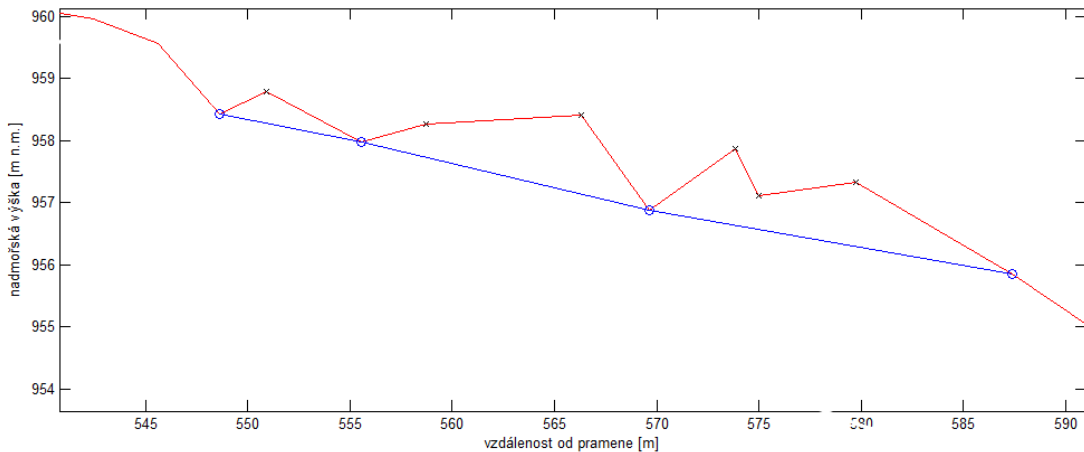
Podélný profil 3D linie vzešlé z předchozího zpracování není ve všech případech v celé své délce klesající, jak je u vodního toku očekávané a žádoucí. Tento fakt je způsobován určitou nedokonalostí filtrace vstupního mračna bodů, kdy nebyly odstraněny všechny body patřící vegetaci obklopující zpracovávaný tok, což vede k nedokonalé aproximaci terénu rovinami. Dopady této nepřesnosti jsou však větší v rovinném území, kdy i malé množství nedokonale odfiltrovaných bodů následně výrazně ovlivní průběh průsečnice aproximačních rovin.

Druhou příčinou rostoucího podélného profilu, jejíž dopady v horském prostředí převládají, je vlastní charakter zpracovávaného území, respektive koryta toku. V korytech horských toků se nachází množství balvanů a kamenů, jež vystupují nad vodní hladinu a od kterých se laser může odrazit. Z praktického hlediska tak voda reálně teče níže, než je výška obdrženého DMT v témže bodě.

Jelikož výsledkem celého algoritmu má být vodní tok v celé své délce klesající, je po ukončení detekce polohy vodního toku přistoupeno k jeho spádování. Vzhledem k tomu, že výpočty od počátku ve 3D, respektive 2,5D prostoru, je pro každý uzel výsledné linie známa jeho výška. Algoritmus postupně prochází body po směru toku od pramene a porovnává výšku daného bodu s výškou bodu předchozího. Pokud dojde k situaci, že zkoumaný bod převyšuje bod předchozí, je nutné zaznamenat souřadnice předchozího bodu (tj. posledního, který splňoval podmínku nerostoucího profilu). Posléze algoritmus pokračuje dále po toku do doby, než nalezne první bod, jehož výška je nižší než v případě zaznamenaného bodu. Výška všech

uzlů nacházejících se mezi body splňující podmínku klesání výškové souřadnice je lineárně interpolovaná.

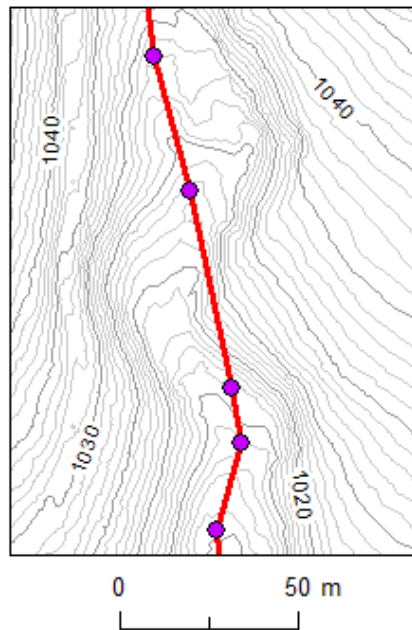
Konkrétní případ rostoucího úseku podélného profilu včetně jeho opravy je znázorněn na obr. 19. Červená linie představuje původní průběh profilu. Černé křížky znázorňují body, jejichž výšky je třeba opravit lineární interpolací a to z výšek okolních bodů, které byly určeny jako správné. Tyto body jsou v obrázku znázorněny modrým kolečkem.



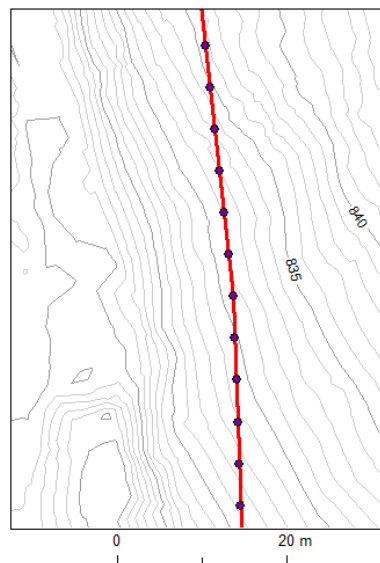
obr. 19: Část vyspádovaného podélného profilu (zdroj: vlastní tvorba)

4.2.6 Kontrola výsledků

Nejcharakterističtější vlastností vodního toku v reálním světě za běžných podmínek je jeho nerostoucí podélný profil. Jako první globální kontrola by se tedy nabízelo zhodnocení podélného profilu výsledné linie před provedením jeho spádování. Jak však bylo popsáno v předchozí kapitole, správný podélný profil není závislý pouze na přesnosti metody detekce jako takové, ale je ovlivněn i přesností modelu a charakteristikou koryta vodního toku. Další nevýhodou takto jednoduchého řešení je četnost odečtu výšek bodů. Jsou-li uzly od sebe navzájem příliš vzdáleny, často splňují podmínku klesání i přes fakt, že terén v určitém místě mezi nimi stoupá. Takový případ je znázorněn na obr. 20. Pokud však daný tok rozdělíme na menší části a výšku odečteme pro každý ze zahuštěných uzlových bodů, podmínka již splněna nebude. Podmínku stálého klesání zároveň může splňovat i linie, jejíž umístění je nesprávně ve svahu údolí rovnoběžně se skutečnou údolnicí (obr. 21). Ze všech těchto důvodů byla analýza podélného profilu výsledného toku brána jen jako pomocný ukazatel správné detekce.



obr. 20: Situace, kdy uzlové body toku splňují podmínku klesajícího podélného profilu, přestože terén mezi nimi stoupá (zdroj: vlastní tvorba)



obr. 21: Situace, kdy uzlové body toku splňují podmínku klesajícího podélného profilu, přestože linie zjevně leží ve svahu (zdroj: vlastní tvorba)

Jako hlavní ukazatel správné detekce je použito porovnání výškové souřadnice uzlového bodu linie s body digitálního modelu terénu, které se nacházejí v určitém okolí. Vycházíme z představy, že jakýkoliv bod na údolnici musí mít menší výšku než kterýkoliv bod údolí, ležící od zkoumaného bodu ve směru proti proudu toku. Tato situace je modelována porovnáváním výškové souřadnice uzlových bodů linie s body LLS, které se nacházejí v menší vzdálenosti od

uzlu, než zadaná mez. Porovnávání je však prováděno pouze s body LLS z poloviny směřující k pramenu toku.

Dalším použitým ukazatelem je porovnání spočtené výšky uzlových bodů s výškou odečtenou z DMR ve formě TIN vytvořeného ze vstupních dat LLS. Pokud je k dispozici i geomorfologická charakteristika daného vodního toku či údolí, typický sklon či spád, je s nimi možné porovnat stejné veličiny spočtené z výsledné linie algoritmu.

4.3 Implementace a testování algoritmu

Veškerý postup detekce vodního toku popsáný v předchozích částech diplomové práce byl testován na reálných datech a bylo tedy nutné realizovat daný algoritmus. Pro implementaci byl zvolen programovací jazyk Python, což je interpretovaný a objektově orientovaný programovací jazyk vytvořený v roce 1991 Guido van Rossumem. Výhodou Pythonu mimo jiného je jeho jednoduchá syntaxe či nezávislost na platformě. Zároveň se jedná o opensource.

Přestože součástí Pythonu je řada zabudovaných funkcí, pro použití specifitějších funkcionalit je nutné importovat externí moduly (Pimpler, 2013). V práci bylo využíváno modelů math, numpy a Arcpy. Modul math umožňuje používat pokročilejších matematických funkcí, rozšíření numpy pak zpřístupňuje práci s maticemi a základní operace nad nimi. Dále byl importován modul ArcPy od firmy ESRI, díky kterému je možné ve skriptu využívat funkce programu ArcMap a vytvářet geografické analýzy, konverze dat i další nezbytné postupy. Některé funkce z balíčku ArcPy je však možné využívat až po zakoupení tzv. extenzí a je tedy v průběhu skriptu nutné testovat, zda jsou tyto extenze k dispozici.

V průběhu práce bylo vytvořeno několik skriptů, v jejichž rámci byly vytvářeny i jednotlivé funkce. Mimo hlavního skriptu detekující vodní tok bylo vytvořeno několik skriptů za účelem kontroly obdržených výsledků. Součástí práce na přiloženém CD je hlavní skript detekce.py a kontrolaB.py. Skripty jsou řádně okomentované a v následujících řádcích bude jen stručně nastíněna jejich funkcionalita a především zmíněny vstupní proměnné, které je nutné skriptům předat.

Detekce.py je nejobsáhlejší skript, který vytváří ze vstupních dat LLS a z přibližné linie ve formátu shp polohově i výškově zpřesněnou liniovou vrstvu odpovídající vodnímu toku. V jeho rámci jsou vytvořeny funkce zajišťující načtení vstupních souborů, získání rovnic přímek, které ohraničují prostor, ve kterém se hledají body pro aproximování roviny. Dále je vytvořena funkce s názvem mnc, která vstupní množinou bodů proloží rovinu použitím metody nejmenších čtverců. Funkce mnc má svou váženou i neváženou variantu. Další funkce zjišťuje rovnici průsečnice a následná generalizuje výslednou linii, respektive vyhledává body, které je

nutné nezahrnout jako uzlové body do tvorby výsledné linie. Konečně poslední funkce zajišťuje vyspádování toku. Výstupem skriptu je zároveň několik textových souborů s informacemi, které byly následně využity pro hodnocení dosažených výsledků.

Pro správný průběh skriptu je nutné při jeho zavolání zadat šest parametrů. Jedná se o absolutní cestu shp souboru odhadu zpřesňovaného toku, respektive souboru bodů LLS. Dále je vyžadována cesta k adresáři, do kterého budou vkládány všechny vytvořené soubory. Posledními parametry jsou požadovaná šířka kontrolní obalové zóny, procento délky zpřesněné linie, které může ležet mimo tuto obalovou zónu a maximální počet iteračních cyklů.

KontrolaB.py poté vytváří z textových souborů získaných z předchozího skriptu bodovou vrstvu uzlů, jejichž atributem je výškový rozdíl mezi daným uzlem a nejnižší položeným bodem terénu v okolí. Uživatel zde musí zadat vstup ve formě cesty k souboru bodů LLS a k adresáři, v němž jsou uloženy zmiňované textové soubory.

4.4 Výsledky

Jak již bylo řečeno, představovaný algoritmus nelze aplikovat v libovolné oblasti, jelikož jeho chování je závislé na průběhu terénu. V následující kapitole bude tedy zevrubněji popsána charakteristika území, na kterém probíhalo testování algoritmu. V dalších podkapitolách budou uveřejněny a zhodnoceny konkrétní výsledky tohoto testování.

4.4.1 Testované území

Algoritmus byl testován na datech DMR 5G, poskytnutých Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním, z pramenné oblasti Labe a Bílého Labe v Krkonoších. Konkrétně se jednalo o 10 mapových listů – Tanvald 1-8, Tanvald 0-8, Tanvald 1-9, Tanvald 0-9, Ptačí Kámen 9-9, Vrchlabí 0-0, Žacléř 9-0, Žacléř 8-0, Žacléř 8-1 a Žacléř 7-1.

Krkonoše jsou důležitou pramennou oblastí, ve které se nachází počátek důležitých střeoevropských toků. Voda je zde výhradně srážkového původu a dle toho, na jaké straně Slezského hřbetu se nacházíme, je odváděna buď do Severního či Baltského moře. Prapůvod místní říční sítě spadá už do třetihor, avšak ve čtvrtohorách docházelo k její významné modelaci ledovcem (Šebesta; Tremel, 1976). Vodní toky na české straně Krkonoš utvářejí složitější síť říčních údolí, často na sebe uspořádaných kolmo do mřížovité sítě. Převládá zde severojižní směr hlavních toků, ke kterým v pravých úhlech směřují jejich přítoky, případně tímto směrem probíhají i kratší úseky hlavních toků.

V Krkonoších převažují bystřiny, které mají velký spád a jejich koryta se vyznačují velkým a nevyrovnaným sklonem. Spádem koryta se rozumí výškový rozdíl mezi dvěma místy na toku,

sklonem pak poměr spádu a délky koryta toku. Spád se udává v metrech, zatímco jednotkou sklonu jsou většinou promile (Hančarová; Parzóch, 2007).

Podélné profily jsou zde nevyrovnané, neboť eroze podstatně převažuje nad akumulací. Dna toků jsou tedy neustálená. Koryta jsou často hluboce zaklesnuta v úzkých údolích, ve skalním podloží vznikají vymíláním obří hrnce a kotle, tvoří se peřeje i kaskádovité vodopády. V Krkonoších lze najít nejenom největší vodopád v ČR, kterým je Pančávský vodopád s výškou 148 m, ale i další vodopády např. na Dvorském potoce či Pudlavě. Všechny tyto toky jsou přítoky Labe a vodopády zde vznikly z důvodu, že údolí Labe bylo přemodelováno ledovcem, zatímco postranní údolí přítoků zůstala visutá (Pilous, 1989).

Podobu koryt toků ovlivňoval svojí činností i člověk. Pro snazší splavování dřeva byly budovány klausury neboli klausy – vodní nádrže, které umožňovaly udržovat hloubku plavební vody. V pramenné oblasti Labe byly už na začátku minulého století prováděny na některých tocích hrazenářské úpravy, které měly protierozní nebo protipovodňový účel. Základním prvkem jsou příčné objekty tzv. přehrážky, jejichž použití vede ke stabilizaci dna toků s velkým spádem a snížení podélného sklonu dna. Dále byly stavěny kamenné žlaby, což jsou opevněná koryta, která v úsecích s enormním spádem zajišťují ochranu svahů (Lokvenc, 2007).

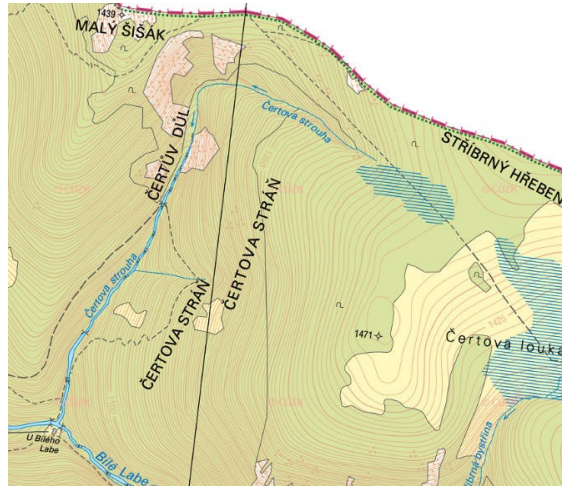
Popsaný postup byl vyzkoušen na všech v daném území se vyskytujících tocích, které zároveň splňují vstupní podmínky (tj. šířka koryta do 5 m). Popsány však budou pouze výsledky dosažené na vybraných tocích, které nesou některé charakteristické znaky a pro demonstraci výsledků algoritmu v určitých podmínkách jsou tedy vhodné a dostačující.

4.4.2 Čertova strouha

Čertova strouha, protékající Čertovým dolem, je jedním z pravostranných přítoků Bílého Labe. Od vývěru pramenné zdrojnice k soutoku u Boudy u Bílého Labe je tato bystřina dlouhá 2 900 m a překonává více jak 400 výškových metrů. Přibližně ve dvou třetinách délky se z Čertova návrší do Čertovy strouhy vlévá jediný významnější povrchový tok (Dvořák, 2014 a).

Přestože v minulosti probíhaly určité pokusy zabydlet tuto část Krkonoš, v současné době je Čertův důl jedním z nejméně navštěvovaných a člověkem ovlivňovaných míst našich nejvyšších hor. Na podobě samotného potoka má však lidská ruka velký podíl. Po povodních v červenci 1897, které zvláště do Krkonoš přinesly mimo obrovských škod na majetku i ztrátu stovek lidských životů, byly totiž vypracovány projekty úprav toků sloužící k ochraně před dalšími povodněmi (ČHMÚ, 2010). Na Čertově strouze tak bylo v letech 1901 – 1902 postaveno 43 příčných a 194 podélných kamenných hrazenářských objektů, jako jsou prahy, přepážky nebo zdi (Lokvenc, 2007). Na celém díle je vyzdvihován nejenom fakt, že přečkalo několik

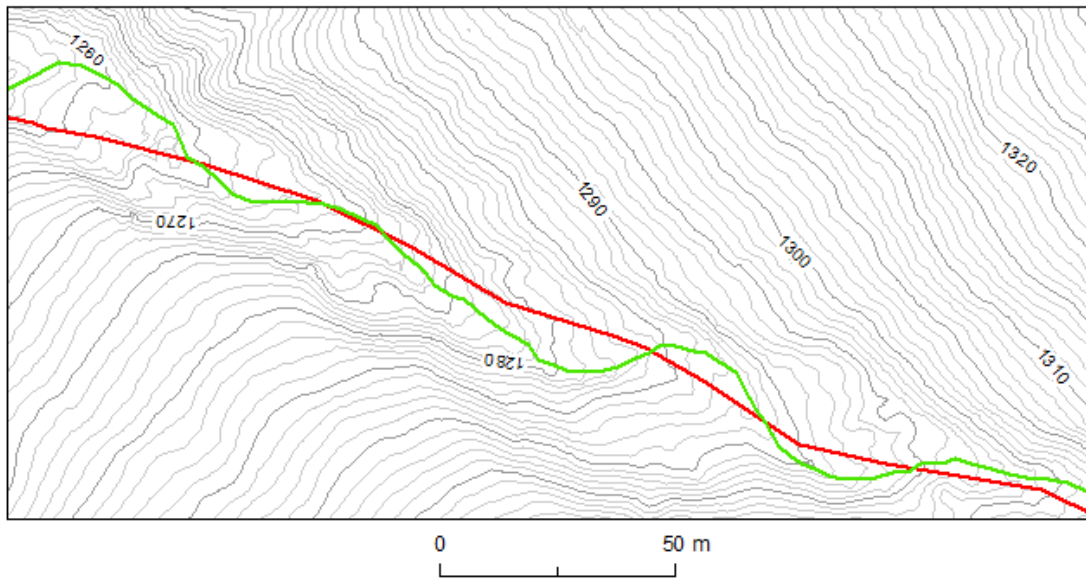
velkých povodní a že se dochovalo v téměř nezměněné podobě, ale i jeho splnutí s okolní krajinou (Bašta, 2014).



obr. 22: Oblast Čertovy strouhy (zdroj: ČÚZK, 2014)

Samotný počátek Čertovy strouhy je tzv. horským růžencovým potokem. Díky podloží, okolnímu terénu a rašeliništím zde vzniklo hluboce proříznuté koryto, často i s podzemním průběhem a následnými propadlinami (Štursa et al., 2012). Z počátku teče potok severozápadním směrem souběžně s hlavním hřebenem. Zajímavostí je, že se v těchto místech jedná o jedno z vůbec nejvýše položených údolí České republiky. Přibližně po 800 metrech se tok Čertovy strouhy prudce stáčí k jihu a pokračuje dalších cca 200 metrů, než narazí na první umělou překážku a tím skončí jeho neregulovaná část. (Dvořák, 2014 b).

Celý horní tok Čertovy strouhy se nalézá v prudkém, sevřeném údolí a je vhodným tokem pro aplikaci vyvíjeného algoritmu. Svah pravého břehu je v celé popisované části dostatečně dlouhý. Naopak svah na levém břehu je v některých místech, především v oblasti ohybu údolí, relativně krátký a mohl by zde hrozit nedostatek bodů ke správnému proložení rovinou. Jelikož je však tento svah pokryt pouze řídkým smrkovým porostem a nikoliv hustou vegetací, zůstává i po filtraci dostatek bodů, které znázorňují svah a umožňují jeho správnou aproximaci.



obr. 23: Porovnání průběhu linie ZABAGED a výsledné linie algoritmu v oblasti horní toku Čertovy strouhy (zdroj: vlastní tvorba)

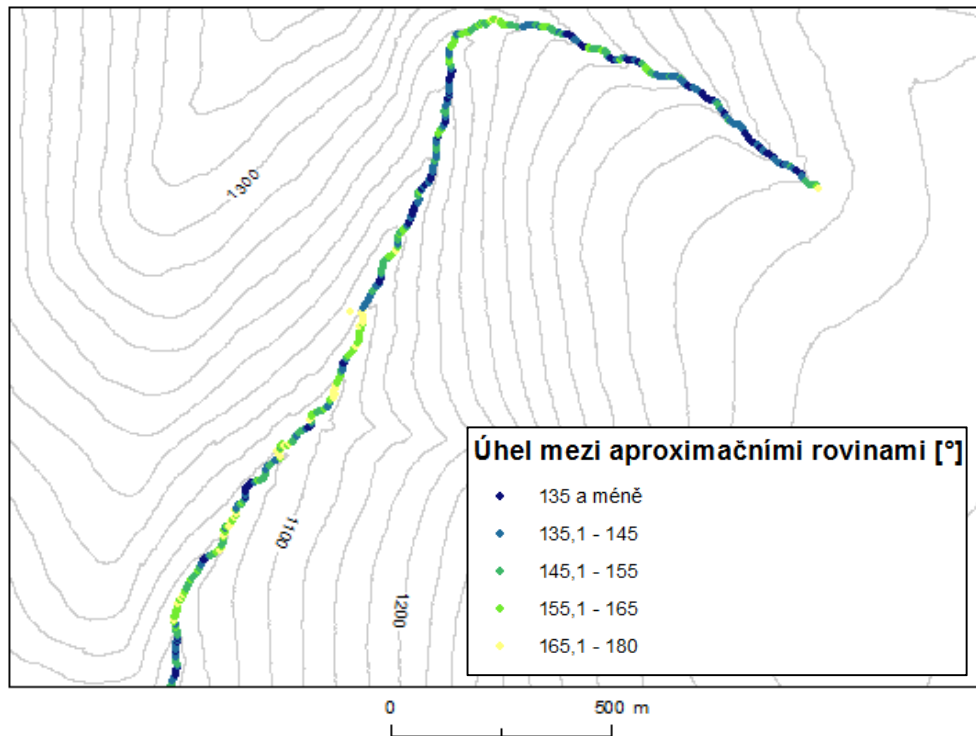
obr. 23 ilustruje typickou situaci, která se objevuje v horní části Čertovy strouhy. Vodní tok ZABAGED znázorněný červenou linií zde správně vystihuje směr údolí, jeho průběh je však přímočařejší. Výsledná linie algoritmu (zelená) křivolakost skutečné údolnice kopíruje lépe.

Druhá, níže položená a regulovaná část toku šířkou svého koryta přesahuje 5 metrů a v datech ZABAGED je vedena jako vodní plocha. Přesto byl algoritmus aplikován i na tuto část. Jak již bylo zmíněno, koryto potoku je zde upraveno především příčnými překážkami. Přibližně 300 m níže po toku od nejvýše položeného prahu se nachází bývalá kovárna, ke které vede podél Čertovy strouhy až od Boudy u Bílého Labe naučná stezka, jenž potok dvakrát překonává po mostě. V blízkosti kovárny současně končí i poněkud širší cesta tzv. Holmanka. V nejspodnější části Čertovy strouhy, přibližně 200 metrů od soutoku s Bílým Labem je možné nalézt i přírodní stupeň, který vytváří vodopád, respektive kaskádovitou soustavu (Bašta, 2014).

Ovlivnění výsledné linie soutokem ani blízkou cestou není zřetelné. Důvodem je jejich relativně malý dopad na průběh celého údolí. Oproti části strouhy s úzkým korytem je ale možné vypočítat nárůst potřebných iterací pro dosažení pouze nesignifikantních změn poloh výsledných linií vzešlých z po sobě následujících iteračních cyklů. Lze však tvrdit, že algoritmus dosahuje uspokojivých výsledků i v této oblasti, pro kterou nebyl prvotně uzpůsobován.

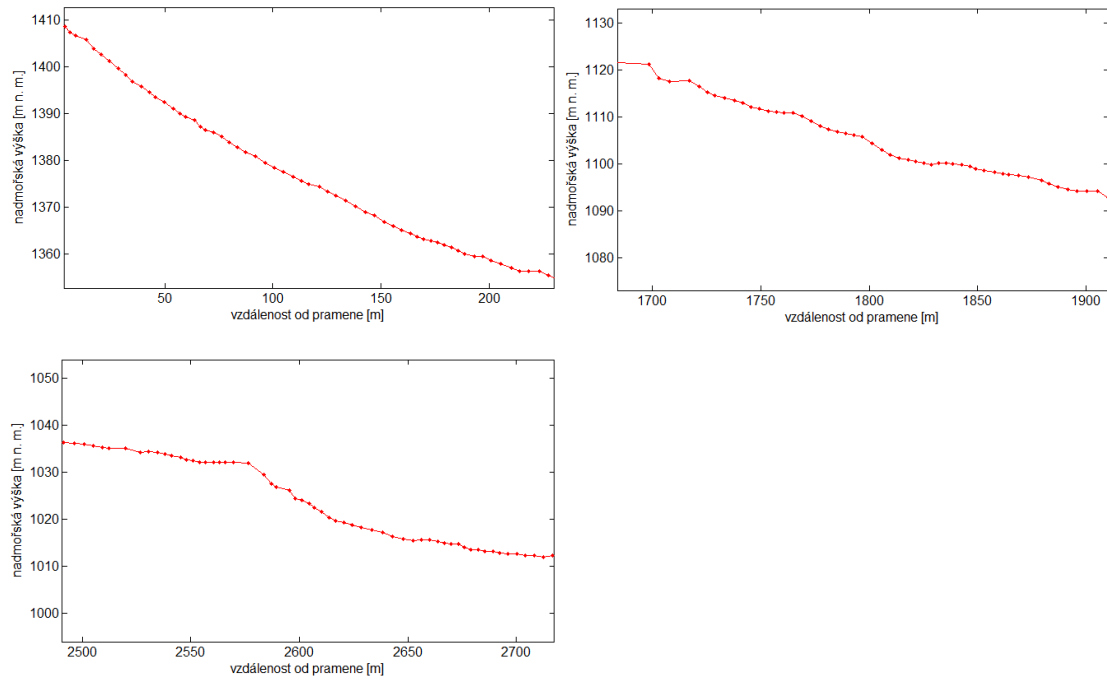
K přirozenému rozdělení Čertovy strouhy na horní a dolní tok přispívá rozdílná sevřenost údolí. Na obr. 24 jsou znázorněny úhly, které v jednotlivých uzlových bodech zpřesněné linie

navzájem svírají roviny aproximující terén. Celkově je horní část údolí sevřenější než spodní. Zajímavostí je ale rozšíření údolí v okolí ohybu toku. Dvořák (2014 b) uvádí, že zmiňovaná část údolí je svým charakterem bližší spíše dolním partiím Čertova dolu, což pohled na řečený obrázek potvrzuje.



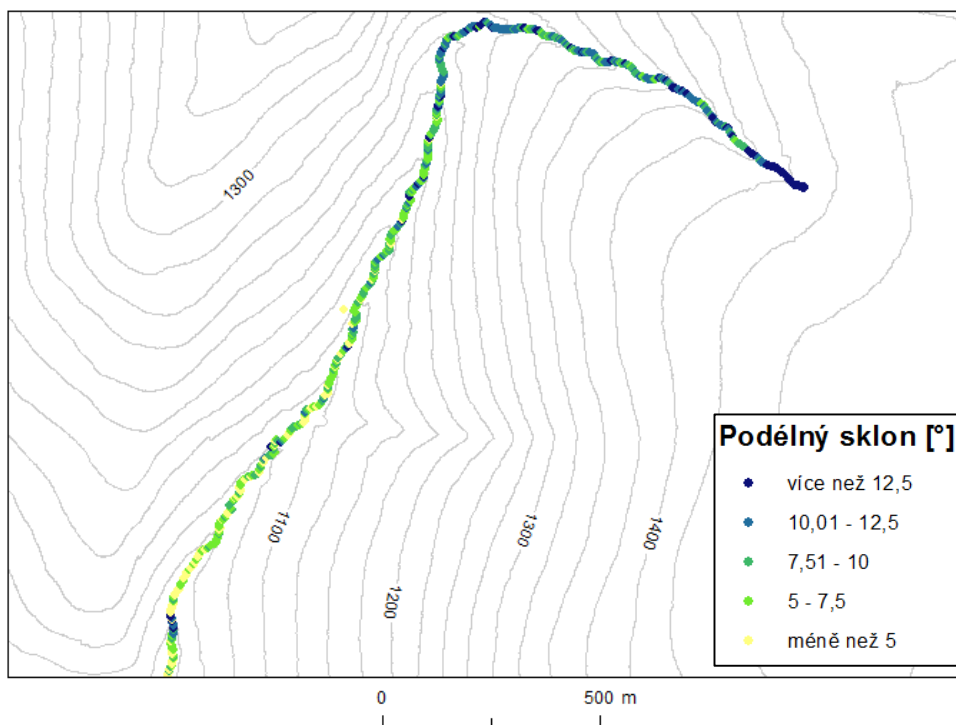
obr. 24: Úhly svírané svahy údolí v jednotlivých uzlových bodech zpřesněné linie (zdroj: vlastní tvorba)

Rozdílná charakteristika toku Čertovy strouhy je dobře patrná při pohledu na podélný profil výsledné 3D linie před jejím konečným spádováním. Zatímco v horní části je jeho sklon prakticky vyrovnaný (obr. 25 – vlevo nahoře), přibližně 900 metrů od pramene se začíná sklon viditelně zvolňovat. Zároveň se zde začínají objevovat nerovnosti, způsobené především příčnými regulačními překážkami nacházejícími se v korytě. (obr. 25 – vpravo nahoře). Na konci profilu je dále výrazný skok, který je způsoben zde se nacházejícím vodopádem (obr. 25 – dole).



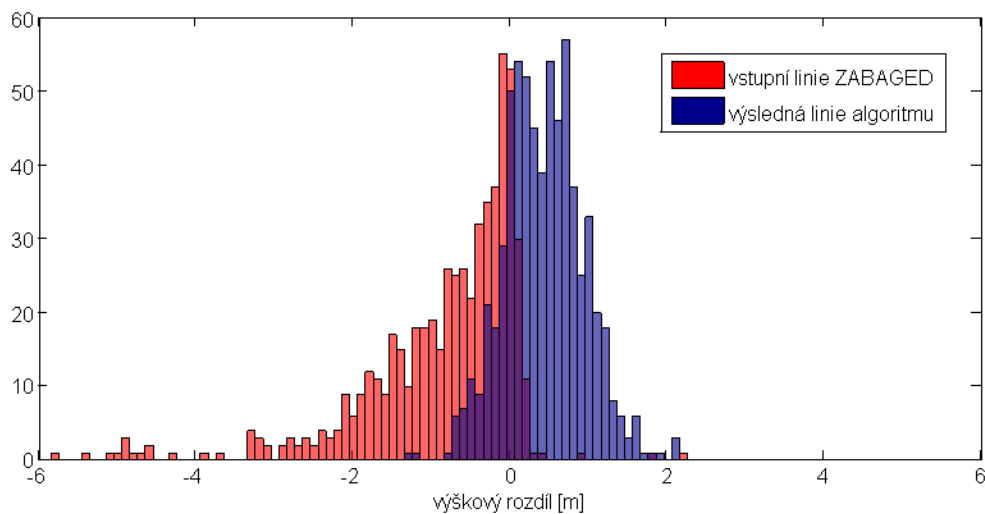
obr. 25: Podélný profil Čertovy strouhy (zdroj: vlastní tvorba)

Podobné informace lze vypočítat i při pohledu na vizualizaci vypočtených velikostí úhlů, které svírají jednotlivé průřešnice aproximačních rovin s rovinou horizontální (obr. 26). Největší sklon vykazuje vypočtená linie ve své první části před tím, než se tok stočí k jihu. Následuje úsek s globálně menším spádem avšak s většími výkyvy. V poslední části toku je zřetelně vidět zvýšení sklonu v oblasti vodopádu.



obr. 26: Vypočtené podélné sklony v jednotlivých uzlových bodech zpřesněné linie (zdroj: vlastní tvorba)

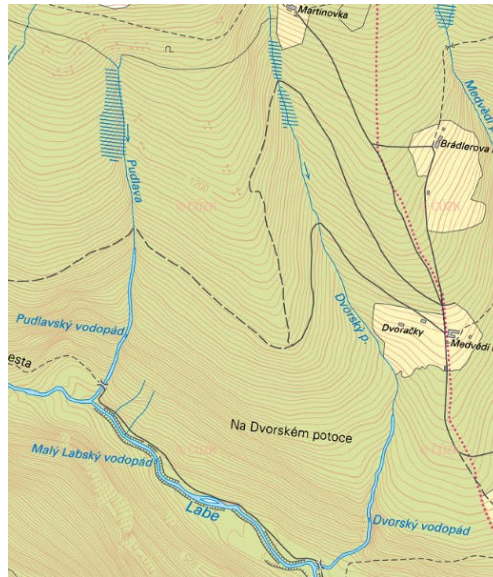
Celkové zpřesnění polohy Čertovy strouhy lze demonstrovat na výškových rozdílech bodů ležících na linii toku ZABAGED, respektive bodů výsledné linie algoritmu vůči nejnižšímu bodu LLS v okolí. Histogramy, které tyto rozdíly pro obě linie dokumentují, zobrazuje obr. 27. Jelikož vstupní tok má výrazně méně uzlových bodů než tok zpřesněný, byly tyto uzlové body zahuštěny takovým způsobem, aby jejich rozestupy byly podobné, jako je tomu v případě výsledné linie. Těmto bodům, které jsou vzhledem ke svému původu pouze ve 2D prostoru byla přiřazena výška odečtená z TINu vytvořeného ze vstupního mračna bodů LLS. Z obrázku je zřejmé, že v případě vstupní linie se ve směru proti proudu toku nachází více výrazně níže položených bodů terénu než v případě linie vzešlé z představeného algoritmu.



obr. 27: Výškový rozdíl mezi uzlem toku a nejnižším bodem LLS v okolí – Čertova strouha (zdroj: vlastní tvorba)

4.4.3 Dvorský potok, Pudlava

Dvorský potok a Pudlava jsou prvními významnými levostrannými přítoky Labe. Genetický vývoj obou toků je velice podobný. Jejich údolí, pravděpodobně z důvodu jižní orientace a nevýhodné polohy v rámci orografických systémů, nebyla v pleistocénu zcela zaledněna. Pouze jejich prameniště, nacházející se na jižním svahu Vysokého Kola, byla dle Šebesty a Tremly (1976) nivačně přemodelována se zvýrazněným, k východu orientovaným svahem. Zbylé části údolí mají výrazně erozní charakter svahových údolí s profilem písmene V. Díky ledovcem přehloubenému údolí Labe, do nějž se toky vlévají, jsou obě údolí visutá se stupněm, který toky překonávají vodopádem.



obr. 28: Oblast Pudlavy a Dvorského potoka (zdroj: ČÚŽK, 2014)

Lokální podmínky však způsobily u Dvorského potoka intenzivnější zpětnou erozi, což s sebou přináší větší zahloubení údolí a nižší stupeň na visutém údolí (Pilous, 1989). Rozdíl je možné vysledovat i ve sklonu dna jednotlivých toků. V následující tabulce jsou shrnuty sklony v různých částech obou potoků.

Vodní tok	Průměrný sklon nad vodopádem		Průměrný sklon ve vodopádu	Nejstrmější úsek vodopádu	Průměrný sklon pod vodopádem	
	ve °	v ‰	ve °	ve °	ve °	v ‰
Pudlava	14	245	25	44	10	180
Dvorský potok	8,5	147	20	33	12,5	220

Tab. 4: průměrné sklony dna v jednotlivých částech Pudlavy a Dvorského potoka (zdroj: Pilous, 1989)

Podobné vlastnosti, průběh a tvar údolí nabízí možnost porovnání dosažených výsledků algoritmem, který byl se stejnými parametry aplikován současně na oba toky. Pro účely popisu byly potoky rozděleny na stejné úseky, jako v předchozí tabulce. Výsledky získané v tocích nad vodopády nevykazují žádnou velkou nepřesnost či chybu. Z vizuálního hlediska průběh detekované linie vodního toku odpovídá průběhu údolnice a hodnoty kontrolních parametrů se pohybují v nízkých hodnotách. Nejzajímavější částí toku jsou vodopády. Pudlava je i ve většině délky svého vodopádu alespoň mírně zařízlá a stále tak vytváří terénní hranu. Algoritmus zde nachází dostatek bodů, které klasifikuje jako uzly toku. Naopak Dvorský vodopád zařízlý není a algoritmus zde selhává. V místě vodopádu chybějí uzlové body pro zpřesněnou linii důsledkem čehož, tudý prochází nová linie přímočaře.

Poslední částí toků jsou oblasti od spodní hrany vodopádů do soutoku. V těchto místech je zřetelně pozvolnější spád údolí. Toky zde zároveň mají šířku koryta větší než pět metrů. Algoritmus však i v těchto místech dobře vystihuje průběh údolnice.

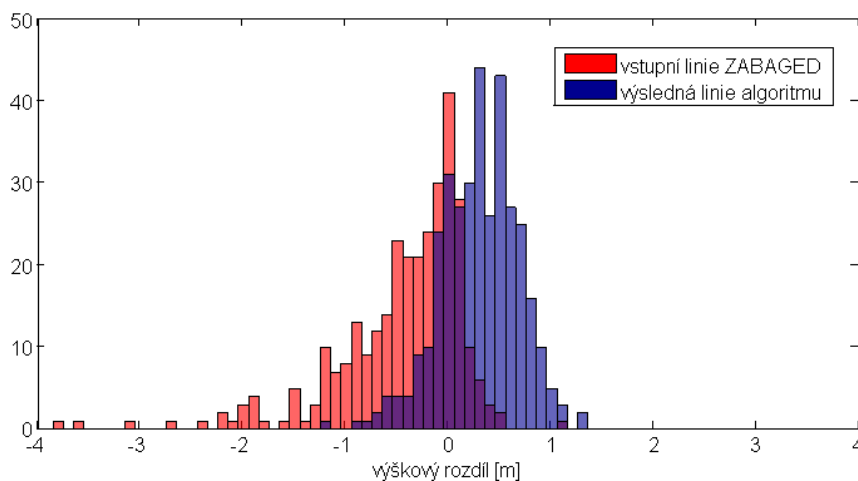
Jelikož jsou pro Pudlavu i Dvorský potok známé skutečné podélné sklony, je možné je porovnat s vypočtenými sklony linie vytvořené algoritmem.

Vodní tok	Sklon nad vodopádem [°]		Sklon vodopádu [°]		Sklon nad vodopádem [°]	
	průměr	směrodatná odchylka	průměr	směrodatná odchylka	průměr	směrodatná odchylka
Pudlava	12,8	3,8	24,1	8,4	10	2,6
Dvorský potok	7,8	3	15,1	7,3	10,8	3,5

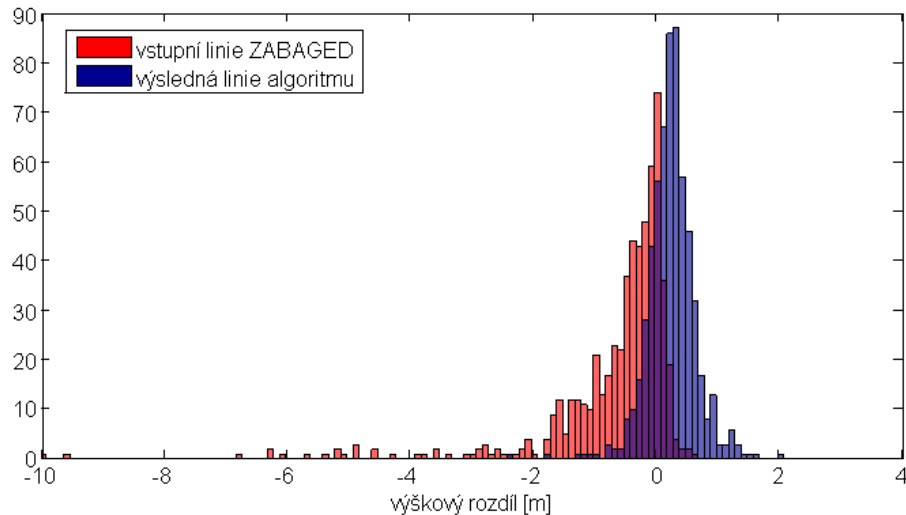
Tab. 5: průměrné sklony dna v jednotlivých částech Pudlavy a Dvorského potoka spočtené algoritmem (zdroj: vlastní tvorba)

Z porovnání obou tabulek vyplývá, že sklon vypočtený algoritmem a uváděný v literatuře si navzájem nejvíce odpovídají v úseku nad vodopádem. Důvodem je průběh terénu, jenž odpovídá podmínkám, pro které je algoritmus uzpůsoben. Nejrozdílnější výsledky jsou v oblasti vodopádu Dvorského potoka. Tato nepřesnost je daná zmiňovanou nevhodností tohoto úseku údolí k aplikaci algoritmu. Naopak Pudlavský vodopád vykazuje porovnatelné hodnoty sklonu jak v odborné literatuře, tak při výpočtu z výsledné linie představované metody.

Na obr. 29 a obr. 30 jsou zobrazeny výškové rozdíly uzlových bodů linie vůči nejnižšímu bodu v určeném okolí. Je zřejmé, že histogramy pro linie vzešlé z představovaného algoritmu jsou zřetelně užší a jejich střed je posunut více k nule, respektive do kladné části osy, než je tomu u histogramů pro vstupní odhad linie. Tento fakt značí lepší umístění vodního toku do správné polohy v údolí.



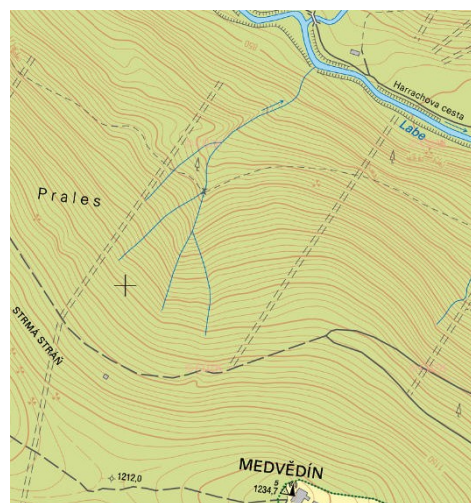
obr. 29: Výškový rozdíl mezi uzlem toku a nejnižším bodem LLS v okolí – Pudlava (zdroj: vlastní tvorba)



obr. 30: Výškový rozdíl mezi uzlem toku a nejnižším bodem LLS v okolí – Dvorský potok (zdroj: vlastní tvorba)

4.4.4 Žlábský ručej

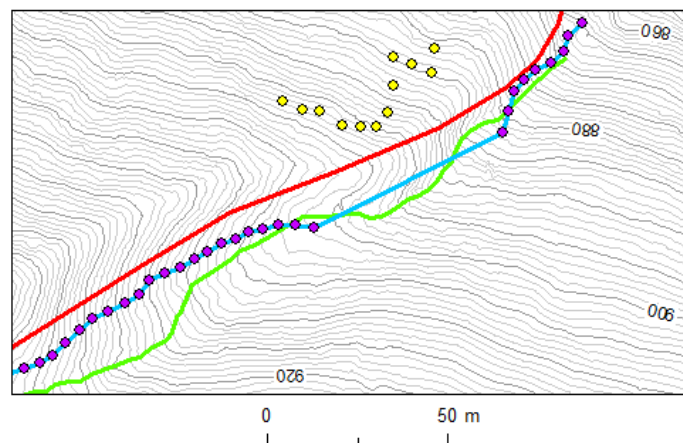
Žlábský ručej je krátký, stálý a velice strmý potok stékající ze severních svahů kopce Medvědína. Teče severním až severovýchodním směrem a do Labe ústí přímo proti náplavovému kuželu Dvorského potoka. Jeho koryto je téměř celou dobu kamenité či balvanité. Žlábský ručej je příkladem postranního extraglaciálního toku (tj. v nezaledněném údolí) a těsně před soutokem musí překonat svahovou hranu do ledovcem přehloubeného údolí. V tomto místě se tak vyvinul Medvědínský (případně také Žlábský) vodopád peřejovitě kaskádového až kaskádového typu (Pilous, 2009). Přes to, že Žlábský ručej není velkým a význačným tokem, lze na něm dokumentovat několik z pohledu vyvíjeného algoritmu zajímavých míst a skutečností.



obr. 31: Oblast Žlábského ručeje (zdroj: ČÚZK, 2014)

Horní část toku se vzhledem k algoritmu nachází v téměř ideálních podmínkách. Údolí je zde souměrně sevřené bez výrazných umělých i přírodních prvků. Podélný sklon je téměř stálý a pohybuje se okolo 18°. Nejsou zde detekovány prakticky žádné odlehle uzly, které by musely být vyloučeny z dalšího zpracování. Rovněž rozdíly mezi spočtenou výškou uzlu a nejnižším bodem LLS v okolí jsou minimální.

Přibližně v polovině své délky se tok stáčí k východnímu směru a charakter údolí se začíná měnit. Levý svah údolí je zde prudký, ale velmi krátký. Horizontální vzdálenost mezi údolnicí a hřbetnicí dosahuje 30 m, v extrémním případě dokonce pouze 15 m. Z tohoto faktu vyplývá, že v DMT bude k dispozici jen velmi málo bodů, které znázorňují daný svah. Pokud se podíváme na vizualizaci vstupních dat (obr. 32), můžeme si všimnout, že se odhadnutá linie vodního toku (červená linie) postupně oddaluje od údolnice a naopak přibližuje k hřbetu, až jej nakonec překročí. Jak je z obrázku zřejmé, algoritmus v tomto místě určí několik bodů, které zcela jistě neodpovídají hledané údolnici, neboť leží ve svahu sousedního údolí. Tyto body jsou však vyloučeny z dalšího zpracování, neboť roviny, na jejichž průsečnici body leží, nesplňují podmínku růstu. Díky odstranění všech těchto chybných měření zpřesněná linie po první iteraci (modrá linie) leží ve větší vzdálenosti od hřbetnice, než je základní šířka fasety, což má za následek správnou aproximaci daného svahu a tím současně i konvergování linie k údolnici. Výsledná linie celého algoritmu, která je zobrazena zelenou barvou, již vyjadřuje údolnici zcela správně.

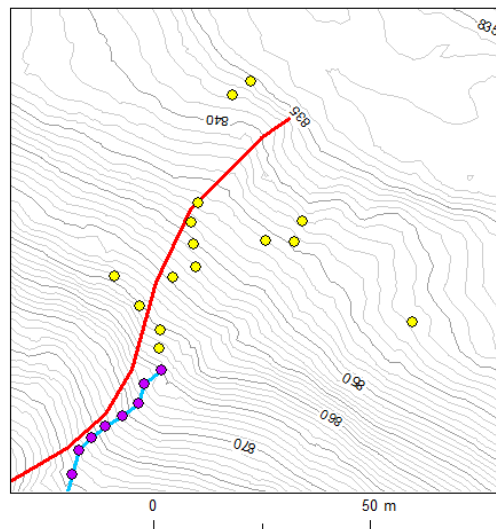


obr. 32: Situace, kdy se aproximace Žlábského ručeje blíží k hřbetnici (zdroj: vlastní tvorba)

V tomto místě je však nutné zmínit, že k odstranění všech chybných měření došlo i díky vhodnému průběhu okolního terénu. Za zmíněnou hřbetnicí totiž následuje dlouhý svah neměnné expozice i sklonu. Z toho důvodu ani při největší přípustné šířce fasety nemá proložená rovina očekávaný tvar. Pokud by však sousední údolí mělo například jen krátký pravý

svah následovaný údolnicí a dlouhým protisvahem, rozšiřování fasety by vedlo nutně k situaci, kdy rovina aproximuje tento dlouhý svah a tím pádem by měla očekávaný průběh, čímž by byly splněny všechny podmínky pro zařazení získané průsečnice, respektive bodu do dalšího zpracování.

Nejméně vhodných výsledků dosahuje algoritmus v závěru toku, kde se nachází i Medvědínský vodopád. Údolí se zde rozvírá a potok již téměř nevytváří terénní hranu. Na obr. 33 je patrné, že body detekované v této oblasti nesplňují podmínku pro zařazení mezi uzly řeky. Jelikož je problematická oblast na konci toku, není možné určit ani přímý směr, kudy by měl vodní tok probíhat. Z tohoto důvodu je zpřesněná linie ukončena již před tímto širokým údolím v místě, kde leží poslední bod, který splňuje podmínky uzlu.



obr. 33: Detekované potenciální uzlové body v oblasti Medvědínského vodopádu (zdroj: vlastní tvorba)

5 Diskuze

Letecké laserové skenování umožnilo získávat nový typ výškopisných dat. V odborných kruzích stále probíhá intenzivní výzkum zaměřující se jak na problematiku sběru dat, tak především na jejich pozdější zpracování. Pro data získaná pomocí LLS je mimo jejich bodové povahy charakteristická i vysoká přesnost, hustota zaměřených bodů a zároveň chybějící informace o liniových prvcích, jakými jsou například hrany terénní kostry. K poznání v této oblasti se snaží přispět i předkládaná diplomová práce, jejíž hlavním tématem je navržení metody vedoucí ke zpřesnění polohy vodních toků.

Vstupními daty je mimo digitálního modelu terénu ve formě filtrovaného mračka bodů získaných metodou leteckého laserového skenování i 2D liniová vrstva zpracovávaného toku, která slouží jako nezbytný prvotní odhad polohy detekovaného toku. Výstupem je 3D liniová vrstva daného vodního toku, jehož podélný profil je v celé své délce klesající. Doplnujícím výstupem je bodová vrstva, která mimo uzlových bodů zpřesněné linie obsahuje i takové body, jež původně byly detekovány jako body linie, ale nesplnily podmínku pro zařazení mezi uzly. Dalším výstupem je i liniová vrstva zobrazující takové úseky linie, jejichž poloha se oproti předchozí aproximaci toku změnila více, než je zadaná mez. Obě tyto vrstvy mohou sloužit pro případnou následnou ruční kontrolu a zhodnocení dosažených výsledků. Práce se vzhledem k rozličné charakteristice toků zaměřuje pouze na vodní toky v hluboce zaříznutých údolích s velkým spádem.

Vzhledem k povaze vstupních dat a očekávanému průběhu terénu ve zpracovávaném území vychází navrhaná metoda z prací Kraus, Pfeifer (2001) a především Briese (2004). Tito autoři rozpracovali metodu detekce terénních hran z mračka bodů LLS. Na rozdíl od jejich přístupu se však předkládaná práce zaměřuje pouze na vodní toky, které chápe jako údolnice. Tento náhled umožňuje používat řadu specifických modifikací, které vedou k lepším výsledkům

než v případě použití nemodifikované metody pro detekci hran. Práce především dokazuje, že není nutné získávat prvotní aproximaci zpracovávané hrany aplikací hranového filtru na rastrový DMR vytvořený ze stejného bodového mračna, ze kterého vychází další postup zpřesnění polohy hrany, ale je možné využít liniiovou vrstvu z jiného datového zdroje. V předkládané práci bylo pro tento vstup využito databáze ZABAGED, konkrétně vrstvy vodní tok. Zároveň je ale nutné poznamenat, že zatímco vstupní linie získané aplikací hranového filtru dosahují vysoké přesnosti, která je navíc v celé délce linie porovnatelná, u linie získané jinými postupy toto zaručeno není. Tento fakt musel být v návrhu metody zohledněn, a proto byla zavedena dynamická šířka obalové zóny, ze které se získávají body pro výpočet aproximace k toku přilehlých svahů.

Obecně lze konstatovat, že metoda přinesla očekávané výsledky a polohu daného vodního toku zpřesnila. Zároveň je ovšem nutné dodat, že výsledky záleží na několika různých faktorech. Za prvé je nutné si uvědomit, že detekce probíhá v rámci modelu terénu a její přesnost je omezena přesností vstupního modelu. Jelikož je pracováno s filtrovaným mračnem bodů LLS, silně záleží na kvalitě provedené filtrace. Neodfiltrované zbytky jakýchkoliv objektů v okolí toku znamenají nesprávnou aproximaci terénu rovinou a vedou k chybným výsledkům.

Dále se na podobě výsledné linie podílí i přesnost prvotního odhadu údolnice. Sice se tuto závislost díky dynamickému určení šířky obalové zóny podařilo z velké části odstranit, nicméně příliš velká nepřesnost původní linie v kombinaci s nevhodným terénem (typicky výrazné sousední údolí) může vést k umístění uzlových bodů dané údolnice do nesprávného místa.

Algoritmus dále obecně nemusí dosahovat ideálních výsledků v místech, kde se průběh údolí výrazně odlišuje od očekávaného tvaru. Především se jedná o soutoky, vodopády, případně kaskády a obecně místa, kde se tok z různých důvodů příliš nezařízí do podloží. Neočekávaný tvar údolí vytvářejí i lidské zásahy do terénu. Například přítomnost široké cesty v těsné blízkosti toku může silně ovlivnit průběh aproximační roviny a tím celé výsledné linie.

Z výše uvedených problematických míst má největší dopad na podobu výsledné linie soutok. V ostatních problematických místech totiž dojde k odebrání nevhodných uzlových bodů a vytvořená linie prochází přes tyto oblasti přímočaře. Ovšem v případě soutoku není možné určit směr, kterým by linie měla vést a ta je proto ukončena již před tím, než se na ní začne soutok projevovat. Žádný z toků, na kterých byl algoritmus testován, tak nedosáhl toku nižšího řádu. Tento fakt se jeví jako největší mínus představované metody.

Algoritmus byl vyvíjen s ohledem pouze na úzká koryta vodních toků do šířky 5 m. Tato hranice byla zvolena poněkud uměle vzhledem k datům ZABAGED, která sloužila jako vstupní data a jejichž vodní toky se rozdělují právě na toky s užším a širším korytem než 5 m. V průběhu testování byl však algoritmus aplikován i na toky, jejichž část má koryto širší, než je zmíněná hranice. I za těchto podmínek dosahuje metoda porovnatelných výsledků jako v případě užších toků. Obecně zde však může docházet k větším změnám mezi výslednými liniemi jednotlivých iteračních cyklů v rozmezí koryta. Pokud jsou přilehlé svahy nesouměrné, výsledek navíc bude inklinovat k prudšímu z obou svahů. Je však nutné si uvědomit, že tyto poznatky byly získány na vodních tocích, které stále protékají zařízými údolími, a především, že se jedná o horské bystřiny, v jejichž korytě se nachází velké množství kamenů a balvanů, o které se může odrazit laserový paprsek. V mračnu bodů se tak výrazně liší popisované toky od ostatních širokých řek, kde vzhledem k téměř nulové odrazivosti vody body laserového skenování chybí. Při aplikaci algoritmu na tyto široké vodní plochy uspokojivých výsledků nebude dosaženo.

Přes kvalitu obdržených výsledků je v řešení několik oblastí, které nejsou vyřešeny zcela optimálně, a nabízejí tak možnosti pro další zkoumání a zlepšování. První je samotný výběr bodů pro aproximaci terénu rovinou. Pro ukončení rozšiřování fasety musí být splněna podmínka rostoucí roviny směrem od linie. Je však nutné si uvědomit, že tato podmínka nemusí být dostatečná. Například v případě, když rozšíření fasety přidá do výpočtu body, které pouze vykompenzují body z druhého, nesprávného svahu. V takové situaci sice rovina splní vyžadovaný průběh terénu, současně však může být téměř horizontální, což značí vysokou pravděpodobnost nepřiliš vhodné aproximace svahu. Jsou tedy případy, kdy by bylo nutné zkombinovat dva protichůdné požadavky – a to snahu o co nejmenší šířku fasety a její dostatečnou šířku pro správné vyjádření terénu.

Dále by bylo vhodné vyřešit problém, který nastává při poloze údolnice v blízkosti hřbetnice. V tomto případě obsahuje jedna faseta body odpovídající oběma svahům zpracovávaného údolí, zatímco druhá faseta body údolí sousedního. Pokud by byl algoritmus schopen určit, že se jedná právě o tento případ, mohlo by dojít k posunu segmentu odhadu linie o určenou vzdálenost tím směrem, ve kterém leží faseta obsahující body obou svahů údolí. Zůstává však otázka, zda-li je možné určit, že se jedná právě o popsanou situaci. Řešení by mohla nabízet analýza závislosti nadmořské výšky bodů LLS na jejich vzdálenosti od odhadu údolnice. Pokud tato závislost nabývá například parabolického tvaru, je možné předpokládat, že daná faseta obsahuje body obou svahů údolí. Popsanou závislost však bude zkreslovat sklon

terénu ve směru údolí. Z tohoto důvodu by bylo nutné analýzu provádět na bodech z pruhu území, jehož šířka by byla menší než délka v práci využívaných faset.

Další oblastí potencionálních vylepšení představovaného řešení jsou problémová místa, jak byla charakterizována v kapitole 4.2.4. Většinou těchto míst výsledná linie toku prochází přímočaře, což představuje uspokojivé řešení, nikoliv však optimální. V budoucích pracích by mohla do zpracování vstupovat i data o poloze prvků jako jsou vodopády či mostky. Díky tomu by bylo možné v místě daný prvek očekávat a dle jeho dalších případných charakteristik řešit průběh toku v oblasti sofistikovaněji. Největší pozornost by však z výše uvedených důvodů měla být věnována soutoku. Z pokusů provedených v rámci práce se zdá, že by bylo vhodným řešením prodloužit linii představující zkoumaný tok i o část hlavního toku za soutokem. Pro ověření této hypotézy však nebylo k dispozici dostatečné množství dat. Navíc tento způsob s velkou pravděpodobností bude fungovat pouze v případě, že oba stékající se toky leží v údolích, která jsou svým tvarem vhodná pro představovaný algoritmus.

6 Závěr

Předkládaná diplomová práce se věnuje zpřesnění polohy a podélného profilu vodních toků z dat leteckého laserového skenování. Cílem bylo navrhnout a zhodnotit metodu zpřesnění průběhu vodního toku za využití prvotního odhadu polohy daného toku a DMR ve formě filtrovaného mračna bodů leteckého laserového skenování. Navržená metoda je postavena na metodě protínajících se rovin. V průběhu práce však bylo navrženo několik uzpůsobení pro problematiku detekce konkrétního krajinného prvku – úzkých vodních toků v zařízlých horských údolích.

Obdržené výsledky je možné hodnotit veskrze pozitivně. Ve všech zkoumaných situacích metoda detekovala přesnější průběh vodního toku, než byl jeho původní odhad. V celém testování nenastala situace, kdy by bylo nutné obdržené výsledky hodnotit jako nevhodné. Existují sice místa toků, ve kterých algoritmus nepracuje zcela ideálně (soutok, vodopády), lze však tvrdit, že i s těmito místy se metoda dokáže vyrovnat na přijatelné úrovni.

Vzhledem k funkčnosti navržené metody je možné řešit otázku jejího budoucího využití v praxi. V současné době se daná problematika řeší ručním zpracováním stínovaného modelu reliéfu, který je vytvořen z dat leteckého laserového skenování. Automatizace, kterou do procesu zavádí tato diplomová práce, může celý proces zjednodušit.

7 Zdroje

- AXELSSON P. 1999: Processing of laser scanner data – algorithms and applications. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. 1999, ročník 54, č. 2, s. 138 – 147. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z URL: <<http://warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1133.pdf>>
- BADEA D., JACOBSEN K. 2008: Filtering proces of lidar data. In : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. kongres Peking 2008, roč. 37, č. B1, s. 815 – 820. [cit. 2015-02-09]. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxvii/congress/1_pdf/141.pdf>
- BAILLY J. S. et al. 2006: Agrarian landscapes linear features detection from LiDAR: application to artificial drainage networks. In : *International journal of remote sensing* [online]. 2008, ročník 29, č. 12, s. 3489 – 3508 [cit. 2014-06-30]. Dostupné z URL: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431160701469057>>
- BARUCH A., FILIN S., 2008: Detection of subtle ridgelines from laser scanning data. In : *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* [online]. kongres Peking 2008, ročník 37, č. B3a, s. 111 – 118 [cit. 2014-06-23]. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3_pdf/17.pdf>
- BAŠTA J. 2014: Kde čerti dávají dobrou noc: Hrazení Čertovy strouhy. In : *Krkonoše – Jizerského hory* [online]. 2014, roč. 12, č. 8, s. 6 – 10 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z URL: <http://krkonose.krnep.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=12678&Itemid=40>

- BERALDIN J.-A., BLAIS F., LOHR U. 2010: Laser scanning technology In : VOSELMAN G., MAAS H.G. (eds.) *Airborne and terrestiral laser scanning*, CRC Press, 1. edition, s. 1 -44
- BÖHM J, RADOUCH V. 1978: *Vyrovňovací počet*, 2. přepracované vydání, Kartografie, Praha, 508 str.
- BRÁZDIL K. 2010. Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. In : HRUBÁ L., PODHORANYI M., KAPIAS A. (eds.) *Sborník - Symposium GIS Ostrava 2010* [online]. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z URL: <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2010/sbornik/Lists/Papers/CZ_5_2.pdf >
- BRÁZDIL K. et al. 2012: *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)* [online]. Zeměměřický úřad, Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad. Pardubice 2012. [cit. 2014-25-06]. Dostupné z URL: <http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf>
- BRIESE CH. 2004: *Breakline modelling from airborne laser scanner*. Dissertation. Wien : Fakultät für Mathematik und Geoinformation, Technische Universität Wien, 2004, 67 str
- BRIESE CH. 2010, Extraction of digital terrain models. In : VOSELMAN G., MAAS H.G. (eds.) *Airborne and terrestiral laser scanning*, CRC Press, 1. edition,. 135-168
- BRÜGELMANN R. 2000: Automatic breakline detection from airborne laser range data. In : *International archives of photogrammetry and remote sensing* [online]. 2000, roč. 33, č. B3, s. 109 – 116 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/383_XXXI-part3.pdf>
- BRZANK A., HEIPKE C., GOEPFER J., SOERGEL U. 2007: Aspect of generating precise digital terrain models in the Wadden Sea from lidar-water classification and structure line extraction. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online] 2008, roč. 63, č. 5, s. 510 – 528 [cit. 2014-06-15]. Dostupné z URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092427160800021X>>
- BRZANK A., LOHMANN P., HEIPKE C. 2005. Automated extraction of pair wise structure lines using airborne laserscanner data in coastal areas. In : *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. Workshop „Laser scanning 2005“, ročník 36, č. 3/W19, s. 36 – 41 [cit. 2014-06-30]. Dostupné z URL: <<http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/3-w19/papers/036.pdf>>

CLODE S., KOOTSOOKOS P., ROTTENSTEINER F. 2004: The automatic extraction of roads from lidar data In : *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Istanbul : ISPRS, 2014, roč. 35, č. B3, s. 231-236 [cit. 2015-02-26]. Dostupné z URL:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.133.520&rep=rep1&type=pdf>>

Český hydrometeorologický ústav 2010: *Vyhodnocení povodní v srpnu 2010. Porovnání s historickou povodní v červenci 1897*. Příloha č. 4 k dílčí zprávě Hydrologické vyhodnocení průběhu povodní [online]. 2010, 19 str. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z URL: <<http://voda.chmi.cz/pov10s/pdf/priloha4.pdf>>

Český úřad zeměměřický a katastrální (2014): *Prohlížeč sloužba WMS – ZM 10* [online]. 2014 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z URL: <<http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/>>

DEMEK J. 1987: *Obecná geomorfologie*. 1. vyd., Praha : Academia, 1987, 476 str.

DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování* [online]. Ústí nad Labem : Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004, 100 str. [cit. 2014-12-03]. Dostupné z URL: <<http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf>>.

DUŠÁNEK P. 2014. Nové výškopisné mapování České republiky. In: INSPEKTOR T., HORÁK J., RŮŽIČKA J. (eds.) *Sborník - Symposium GIS Ostrava 2014* [online]. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. [cit. 2014-11-15]. Dostupné z URL: <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/sbornik/papers/gis2014526faa8a434ef.pdf>.

DVOŘÁK J. 2014 a: Příroda čertova dolu. In : *Krkonoše – Jizerské hory* [online]. 2014, roč. 12, č. 8, s. 11-12 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z URL: <http://krkonose.krnapp.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=12679&Itemid=40>

DVOŘÁK J. 2014 b: Horní Čertův důl. In : *Krkonoše – Jizerské hory*. [online]. 2014, roč. 12, č. 11, s. 22-23 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z URL: <http://krkonose.krnapp.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=12786&Itemid=18>

- FEDRZEL F., 2014. *Ověření přesnosti laserových dat z projektu nového mapování výškopisu České republiky* [rukopis]. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci. Přírodovědecká fakulta. Katedra geoinformatiky, 2014, 67 str., 14 str. příloh. Vedoucí diplomové práce RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.
- GAJSKI D. 2000: Geomorphologic improvement of DTM-s especially as derived from laser scanner data. In : *Geodetski vestnik: Journal of the Association of Surveyors of Slovenia* [online]. 2000 Roč. 44, č. 4, s. 398 – 405 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z URL: <<http://geodetski-vestnik.com/44/gv44-4.pdf>>
- HANČAROVÁ E., PARZÓCH K. 2007: Hydrologie. In : Flousek J., Hartmanová O., Štursa J., Potocki J. (eds) *Krkonoše. Příroda, historie, život*. Nakl. Miloš Uhlíř – Baset, Praha: s. 157 – 165
- HORNÍK S. et al. 1981: *Základy fyzické geografie*, 1. vydání, Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1982, 377 str.
- ILIFFE J., LOTT R. 2000: *DATUMS and MAP PROJECTIONS For Remote Sensing, GIS and Surveying*, 2. přepracované vydání. Whittles Publishing, 2008, unbeath, Scotland, UK, 208 str.
- JAROŠ J. 2010: *Detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování* [rukopis]. Praha : UK. Přírodovědecká fakulta. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, 2011. 76 str., 8 str. příloh. Vedoucí diplomové práce Mgr. Jakub Lysák
- JAROŠ J., LYSÁK J. 2012: Detekce vybraných terénních čar z dat leteckého laserového skenování. In: *Geodetický a kartografický obzor*, 2012, ročník 58, č.11, s. 249 – 256
- KALVODA P. et al. 2004: Kalibrace GPS/IMU snímačů ve fotogrammetrii. In: *Sborník abstraktů konference JUNIORSTAV 2004* [online]. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2004, s. 50 – 56. [cit. 2014-12-15]. Dostupné z URL: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/06_Geodezie%20a%20kartografie/6_0_2_Teoreticke%20aspekty%20geodezie%20a%20kartografie/Kalvoda_Petr.pdf>.
- KAREL W., KRAUS K. 2006: Quality parameters of digital terrain models. In: Seminar on Automated Quality Control of Digital Terrain Models [online]. 2006, na, s. 1 – 15 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z URL: <http://people.plan.aau.dk/~jh/dtm_checking/SpecialContribution.pdf>

- KILIAN J., HAALA N., ENGLISH M. 1996: Capture and evaluation of airborne laser scanner data. In : *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. kongres Vídeň, 2005, roč. 31, č. B3, s. 383 – 388 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/383_XXXI-part3.pdf>.
- KRAUS K., PFEIFER N. 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. In : *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* [online]. 1998, roč. 53, č. 4, s. 193 – 203 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271698000094>>
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. 2001: Advanced DTM generation from lidar data. In : *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. Annapolis : ISPRS, 2001, ročník 34, č. 3/W4, s. 23 – 30 [cit. 2014-06-20]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.150.7055&rep=rep1&type=pdf>>
- LEMMENS, M. 2007: Airborne Lidar Sensors. In : *GIM International* [online]. 2007, ročník 21, č. 2, s. 24 - 27 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z URL: <http://www.gim-international.com/files/productsurvey_v_pdfdocument_11.pdf>
- LEMMENS, M. 2009: Airborne Lidar Sensors. In : *GIM International* [online]. 2009, ročník 23, č. 2, s. 16 – 19 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z URL: <http://www.gim-international.com/files/productsurvey_v_pdfdocument_28.pdf>
- LICHTI D., SKALOUŠ J. 2010: Registration and Calibration. In : VOSELMAN G., MAAS H.G. (eds.) *Airborne and terrestrial laser scanning*, CRC Press, 1. edition, s. 83 – 134
- LOHMANN P. 2003: Segmentation and filtering of laser scanner digital surface models. In : *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* [online]. 2003, roč. 34, č. 30. [cit. 2014-06-20]. Dostupné z URL: <http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/Paper_Xian.pdf>
- LOKVENC T. 2007: Lesní hospodářství. In : Flousek J., Hartmanová O., Štursa J., Potocki J. (eds): *Krkonoše. Příroda, historie, život*. Nakl. Miloš Uhlíř – Baset, Praha: s. 473 – 484
- MENG X., CURRIT N., ZHAO K. 2010: Ground filtering algorithmus for airborne LiDAR data: A review of critical issues. In : *Remote sensing* [online]. 2010, roč. 2, č. 3, s. 833 – 860 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z URL: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/2/3/833>>

MORIN K. W. 2002: *Calibration of Airborne Laser Scanners* [online]. Calgary, Alberta : Department of geomatics engineering, 2002, 125 str., Diploma thesis. University of Calgary. [cit. 2015-01-27]. Dostupné z URL:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.73.5013&rep=rep1&type=pdf>>

O'CALLAGHAN F. J., MARK M. D. 1984: The extraction of drainage networks from digital elevation data. In : *Computer Vision Graphics and Image Processing* [online]. 1984, ročník 28, č. 3, s. 323 – 344 [cit. 2014-06-25]. Dostupné z URL:

<http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Conference_Papers/pdfs/The%20extraction%20of%20drainage%20networks%20from%20digital%20elevation%20data.pdf>

ORŠULÁK T., PACINA J. 2010: *3D modelování a virtuální realita* [online]. Ústí nad Labem : Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny, vydání první, 2010, 64 str [cit. 2015-02-20]. Dostupné z URL: <<http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>>

PASSALACQUA P., BELMONT P., FOUFOULA-GEORGIU E., 2012: Automatic geomorphic feature extraction from lidar in flat and engineered landscapes. In : *Water resources research* [online]. 2012, ročník 48, č.3 [cit. 2014-06-23]. Dostupné z URL:

<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011WR010958/epdf>>

PFEIFER N. 2002: *3D terrain models on the basis of a triangulation*. Dissertation. Wien : Fakultät für Mathematik und Geoinformation, Technische Universität Wien, 2002, 67 str.

PILOUS V. 1989: Geomorfologie vodopádů labského a obřího dolu v Krkonoších. In : *Opera Corcontica* [online]. 1989, roč. 26, s. 5 – 49 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z URL:

<http://opera.krnep.cz/_pdf/26/OC-26-1.pdf>

PILOUS V. 2009: Vodopády: Vodopády na přítocích Bílého Labe. In : *Krkonoše – Jizerské hory* [online]. 2009, roč. 7, č. 11, s. 20 – 21 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z URL:

<http://krkonose.krnep.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=10684&Itemid=32>

PIMPLER E. 2013: *Programming ArcGIS 10.1 with Python Cookbook* [online]. 2013, Packt Publishing. 291 str. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z URL:

<<http://site.ebrary.com/lib/techlib/detail.action?docID=10672351>>

- ROUB R., HEJDUK T., NOVÁK P. 2012: Automating the creation of channel cross section data from aerial laser scanning and hydrological surveying for modeling flood events. In : *Journal of Hydrology and Hydromechanics* [online]. 2012, roč. 60, č. 4, s. 227-241 [cit. 2014-06-27]. Dostupné z URL: <http://147.213.145.2/vc_articles/2012_60_4_Roub_227.pdf>
- SITHOLE G., VOSSelman G. 2004: Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. In : *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* [online]. 2004, roč. 58, č. 1-2, s. 85 – 101 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271604000140>>
- STANKEVICIUS Z. 2011: The land surface break lines determination by fitting the local planes. In : CYGAS D., FROEHNER K. D.: *Environmental engineering 8th ICEE – selected papers*. Vilnius Gediminas Technical University Press „Technika“, 2011, s. 1487 - 1492
- ŠEBESTA J., TREML V. 1976: Glacigenní a nivační modelace údolí a údolních uzávěrů Krkonoš. In : *Opera Corcontica* [online]. 1976, roč. 13, s. 7 – 44 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z URL: <http://opera.krnep.cz/_pdf/13/OC-13-1.pdf>
- ŠÍMA J. 2009: Abeceda leteckého laserového skenování. In : *Geobusiness*, 2009, roč. 8, č. 3, s. 22 – 25
- ŠÍMA, J. 2011: Nové zdroje geoprostorových dat pokrývajících celé území státu od roku 2010 – první výsledky výzkumu jejich kvalitativních parametrů. In: RŮŽIČKA J., PEŠKOVÁ K. (eds.): *Sborník - Symposium GIS Ostrava 2011* [online]. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z URL: <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2011/sbornik/papers/Sima.pdf>.
- ŠTURSA J. [et al] 2012: Horské rúžencové toky v arкто-alpínské tundře Krkonoš, Vysoké Sudety. In : *Opera Corcontica* [online]. 2012, roč. 49, s. 145 – 172 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z URL: <http://opera.krnep.cz/_pdf/49/145-172STURSA.pdf>
- ŠVÁBENSKÝ O., FIXEL J., WEIGEL J. 1995: *Základy GPS a jeho praktické aplikace*. Brno : Vysoké učení technické, 1995, 123 str.
- TOSCANO G. J., GOPALAM U., DEVARAJAN V. 2013: A novel method for automation of 3D hydro break line generation from lidar data using MATLAB. In : *International archives of*

the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences [online]. konference Istanbul, 2013, č. XL-2/W2, s. 99 – 104 [cit. 2015-01-20]. Dostupné z URL: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-2-W2/99/2013/isprsarchives-XL-2-W2-99-2013.pdf>>

VÚGTK. ©2005 – 2015: *Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí* [online]. VÚGTK ©2005 – 2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z URL: <<http://www.vugtk.cz/slovník>>

WEHR A., LOHR U. 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* [online]. 1999, roč. 54 , č. 2/3, s. 68 – s82 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.516&rep=rep1&type=pdf>>

WILD D., KRZYSZEK P., MADANI M. 1996: Automatic Breakline Detection Using an Edge Preserving Filter. In : *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. kongres Vídeň 2005, ročník 31, č. B3, s. 946 – 952. [cit. 2014-06-23]. Dostupné z URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXI/congress/part3/946_XXXI-part3.pdf>

ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD 2010: *Výroční zpráva 2009* [online]. Zeměměřický úřad, Praha. 2010. 34 str. [cit. 2014-06-26]. Dostupné z URL: <<http://www.cuzk.cz/getattachment/41b7fe2f-43ee-4b32-b9db-30120b32ebb2/2009.aspx>>

ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD 2014: *Výroční zpráva 2013* [online]. Zeměměřický úřad, Praha. 2014. 43 str. [cit. 2014-06-26]. Dostupné z URL: <<http://www.cuzk.cz/getattachment/f0bfec28-1d19-492d-abb1-7cd72441749a/2013.aspx>>

Seznam příloh

CD s elektronickou verzí práce a skripty `detekce.py` a `kontrolaB.py`