

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Robert HÁJEK

**VYUŽITÍ DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ
PRO CHARAKTERIZACI VODOPÁDŮ KRKONOŠ**

**CHARACTERISATION OF WATERFALLS IN KRKONOŠE (CZECHIA)
WITH THE USE OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jakub Lysák, Ph.D.

Přeštice 2017

Zadání bakalářské práce

pro Roberta Hájka
obor Fyzická geografie a geoinformatika

Název tématu:

Využití dat leteckého laserového skenování pro charakterizaci vodopádů Krkonoš

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je ověřit/zpřesnit údaje o vybraných vodopádech na území Krkonošského národního parku. Hlavním zdrojem budou data leteckého laserového skenování. Při práci bude využito zejména software ArcGIS.

Dílčí cíle práce jsou následující:

- navrhnout metodiku, jak využít program ArcGIS pro lokalizování vodopádu (nalezení přepadové hrany a paty) z dat leteckého laserového skenování,
- změřit co nejpřesněji polohu a výšku každého zkoumaného vodopádu,
- vypočítat plochu povodí nad vodopádem,
- u vybraných lokalit zkonstruovat podélný profil,
- shromáždit dostupné charakteristiky o zkoumaných vodopádech a porovnat je se zjištěnými údaji,
- na základě zmíněného porovnání vyhodnotit, jestli je metoda úspěšná a zamyslet se, zda by byla v budoucnu využitelná i pro jiné oblasti nebo charakteristiky vodopádů.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

DEMEK, J. 1987. *Obecná geomorfologie*. ACADEMIA, Praha, 476 s.

DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. ISBN 80-7044-575-0.

JEDLIČKA, K., MENTLÍK, P. 2002. Hydrologická analýza a výpočet základních morfometrických charakteristik povodí s využitím GIS. In *Geoinformatika*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2002. s. 46-58.

PÁNOVÁ, P. 2013. *Vodopády v topografických databázích a digitální kartografii*. Praha, 2013. 57 s. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.

PILOUS, V. 1989. Geomorfologie vodopádů Labského a Obřího dolu v Krkonoších. *Opera Corcontica*, roč. 1989, č. 26, s. 5-49.

PILOUS, V. 2009. Vodopády Krkonoš. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 1, s. 22-25.

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jakub Lysák, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 16. 1. 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: červenec 2017

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....
RNDr. Jakub Lysák, Ph.D.
vedoucí bakalářské práce

.....
RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.
vedoucí katedry

V Praze dne 16. 1. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Jsem si vědom 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 Přešticích dne 27. 7. 2017

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce panu RNDr. Jakobovi Lysákovi, Ph.D. za veškerý věnovaný čas a cenné rady, které mi v průběhu tvorby práce poskytoval.

Využití dat leteckého laserového skenování pro charakterizaci vodopádů Krkonoš

Abstrakt

Tato práce se zabývá možností využití dat leteckého laserového skenování k upřesnění údajů o krkonošských vodopádech. Použitá data byla poskytnuta správou Krkonošského národního parku. Jádrem práce je popis postupu, jak určit polohu vodopádu, měřit jeho výšku, spočítat plochu povodí a konstruovat podélný profil. Hlavní metodou výzkumu je analýza digitálního modelu reliéfu, odvozeného z dat LLS. Ta je založena na využití hydrologických nástrojů softwaru ArcGIS 10.4.1 k detekci polohy vodních toků a nalezení vhodných vizualizací pro identifikování přepadových hran a pat vodopádů. Použitím navržené metodiky byly získány údaje o 28 vybraných vodopádech. V závěru práce jsou představeny výsledky a také diskutovány nedostatky použitého postupu.

Klíčová slova: letecké laserové skenování, vodopád, Krkonoše

Characterisation of waterfalls in Krkonoše (Czechia) with the use of airborne laser scanning data

Abstract

This thesis deals with the possible use of airborne laser scanning data for the characterisation of waterfalls in Krkonoše Mountains. Data, which are used, was provided by The Krkonoše mountains national park administration. The objective of the thesis is a description of a new method how to locate the waterfall, measure its height, calculate basin area and create a longitudinal profile. The main research method is the analysis of the digital terrain model, derived from ALS data. The analysis is based on the use of ArcGIS 10.4.1 hydrological tools to detect the position of watercourses and to find optimal visualizations for locating crests and bases of the waterfalls. The characteristics of 28 selected waterfalls were obtained by using the proposed method. The end of the work presents the results and there are also discussed imperfections that were detected during application of the method.

Keywords: airborne laser scanning, waterfall, Krkonoše

Obsah

Seznam obrázků a tabulek.....	8
Seznam použitých zkratk.....	9
1 Úvod a cíle práce.....	10
2 Úvod do problematiky.....	11
2.1 Pojem vodopád a jeho definice.....	11
2.2 Klasifikace vodopádů.....	12
2.3 Parametry vodopádů a jejich určování.....	14
2.3.1 Poloha vodopádu.....	14
2.3.2 Výška vodopádu.....	14
2.3.3 Plocha povodí.....	16
2.4 Letecké laserové skenování.....	17
3 Zájmové území.....	19
4 Data a metodika.....	22
4.1 Příprava dat.....	24
4.1.1 Klasifikované bodové mračno (formát .LAS).....	25
4.1.2 Rastrový DMR.....	26
4.2 Tvorba digitálních modelů reliéfu.....	27
4.2.1 DMR typu TIN.....	27
4.2.2 DMR typu grid (rastr).....	27
4.3 Vizualizace DMR v prostředí ArcMap.....	29
4.4 Detekce polohy a průběhu vodních toků.....	33
4.5 Vymezení přepadových hran a pat vodopádu.....	36
4.6 Plocha povodí vodopádu.....	37
4.7 Určení polohy, výpočet výšky a plochy povodí, konstrukce podélného profilu.....	39
5 Výsledky.....	41
5.1 Polohy vodopádů.....	41
5.2 Výšky vodopádů.....	42
5.3 Plochy povodí.....	43
5.4 Podélné profily.....	44
6 Diskuze.....	48
6.1 Detekce vodních toků.....	48
6.2 Vymezení přepadových hran a pat vodopádů.....	50
6.3 Potenciál pro automatickou detekci.....	53
7 Závěr.....	54
Použitá literatura a zdroje dat.....	55
Seznam příloh.....	59

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1. Typologie a terminologie vodopádů podle sklonových poměrů (Pilous, 2015)	12
Obr. 2. Schéma měření výšky vodopádu (vlastní zpracování).....	15
Obr. 3. Diagram navržené metodiky (vlastní zpracování).....	23
Obr. 4. Letecký laserový skener RIEGL LMS Q-680i (Nordic Geo Center Oy, 2010).....	24
Obr. 5. Přímá vizualizace bodového mračna v oblasti Pančavské jámy (vlastní zpracování).....	25
Obr. 6. Funkce Mosaic To New Raster (ESRI, 2016).....	26
Obr. 7. Nerovnoměrnost hustoty bodového mračna (vlastní zpracování).....	28
Obr. 8. Dvorský potok (sklon osvětlení 45°).....	29
Obr. 9. Hančův ručej (sklon osvětlení 60°).....	29
Obr. 10. Závojevý vodopád.....	30
Obr. 11. Pramenný vodopád – 3D pohled.....	31
Obr. 12. Funkce Fill (ESRI, 2016).....	33
Obr. 13. Funkce Flow Direction (ESRI, 2016).....	33
Obr. 14. Funkce Flow Accumulation (ESRI, 2016).....	34
Obr. 15. Rastr akumulace vody a odvozený rastr vodních toků s prahovou hodnotou 2 (Jedlička, Mentlík, 2002).....	34
Obr. 16. Porovnání funkce Stream To Feature a Raster to Polyline (ESRI, 2016).....	35
Obr. 17. Modrodolský vodopád – 3D pohled.....	37
Obr. 18. Chyby v automatickém výpočtu plochy povodí.....	38
Obr. 19. Funkce Interpolate Shape (ESRI, 2016).....	39
Obr. 20. Vodopád Velký Skok.....	42
Obr. 21. Malý Navorský ručej.....	48
Obr. 22. Doubravův potok – detekce průběhu pod vodopádem.....	49
Obr. 23. Přepadová hrana Horního Úpského vodopádu – rastr sklodu svahů.....	50
Obr. 24. Plotový vodopád – rastr sklonu svahů a 3D pohled.....	51
Obr. 25. Mechový vodopád – rastr sklonu svahů.....	51
Obr. 26. Huťský vodopád – rastr sklonu svahů a hustota bodového mračna.....	52
Obr. 27. Kozelský vodopád – rastr sklonu svahů a hustota bodového mračna.....	53
Tab. 1. Vybrané krkonošské vodopády	21
Tab. 2. Přehled použitých zdrojů polohových souřadnic (Pánová, 2013).....	41
Tab. 3. Polohy vodopádů.....	45
Tab. 4. Výšky vodopádů.....	46
Tab. 5. Plochy povodí vodopádů.....	47

Seznam použitých zkratk

ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DIBAVOD	Digitální báze vodohospodářských dat
DMR	Digitální model reliéfu
GPS	Global positioning system
GNSS	Global navigation satellite system
IDW	Inverse distance weighting
INS	Inertial navigation system
KRNAP	Krkonošský národní park
LLS	Letecké laserové skenování
LRM	Local relief model
TIN	Triangulated irregular network
UTM	Universal transverse Mercator
ZABAGED	Základní báze geografických dat
ZIV	Základní interval vrstevnic

1 Úvod a cíle práce

Podnět pro vznik této bakalářské práce vzešel od RNDr. Jakuba Lysáka, Ph.D. z Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze. Navržené téma „*Využití dat leteckého laserového skenování pro charakterizaci vodopádů Krkonoš*“ nabízelo výzkum atraktivního fyzicko-geografického jevu, pomocí moderních geoinformatických metod. To jednak koresponduje s oborem, jenž studuji (Fyzická geografie a geoinformatika), ale také s oblastmi geografie, ke kterým mám osobní vztah. Fakt, že se jedná o vodopády našeho nejvyššího pohoří, tedy fenomén zajímavý i pro širší veřejnost, evokuje myšlenku, že by závěry této práce mohly najít určité využití i v budoucnu. S ohledem na poměrně husté bodové mračno dostupných dat leteckého laserového skenování (dále jen LLS) je zde také potenciál pro dosažení vysoké přesnosti naměřených hodnot.

Hlavním cílem této práce je navrhnout metodiku, jak data z LLS využít pro získávání informací o vodopádech. Následně ji aplikovat na vybrané krkonošské vodopády a dosažené výsledky měření porovnat s dosud známými údaji.

Bakalářská práce je členěna do několika částí. Úvodní kapitoly se zaměřují na vysvětlení pojmu vodopád a jeho definici, uvádí základní klasifikaci vodopádů a popisují nejpoužívanější parametry a způsoby jejich určování. Krátce je také rozebrána problematika LLS a jeho dosavadní využití při detekování a měření vodopádů. V další části je představeno zájmové území a volba konkrétních lokalit s výskytem vodopádů, včetně zdůvodnění tohoto výběru. Kapitola, která se věnuje metodice, podrobně popisuje postup použitý pro získání požadovaných parametrů o vodopádech. Následuje prezentace dosažených výsledků u zkoumaných vodopádů a jejich porovnání s dosud známými hodnotami, posouzení silných a slabých stránek zvoleného postupu a na závěr nechybí zamyšlení nad jeho případným použitím pro jiné oblasti.

2 Úvod do problematiky

2.1 Pojem vodopád a jeho definice

Vodopády jsou bez pochyby jedním z nejpůsobivějších přírodních jevů a je poněkud překvapivé, jak malá pozornost se jim věnuje především v odborné literatuře. Geomorfologické, geologické, hydrologické a další publikace je obvykle zmiňují jen velmi okrajově. Jednoznačná definice tohoto pojmu prakticky neexistuje, ale nalezneme velmi mnoho různých definic, které se liší nejen napříč obory, ale i napříč státy (Pilous, 2009a).

V encyklopediích i učebnicích jsou definovány vesměs jen velmi obecně jako „voda spadající z výšky“ nebo „stupeň v korytě toku“ (nebo stupeň spádové křivky) apod. (Pilous, 2009a). Dle definice v Digitální bázi vodohospodářských dat Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka (DIBAVOD) se jedná o „*Svislý nebo příkrý stupeň (skalní stěna) v říčním korytě, přes který přepadává vodní tok*“ (VÚV, 2014). Naprosto stejná definice je uvedena také v katalogu objektů ZABAGED (ZÚ, 2016).

Hrdonka (2006) vymezuje na svém rozsáhlém webu, věnovanému vodopádům na území České republiky, další kritéria pro jejich definování. Jedná se o sklon vodopádu, který musí být větší než 45° a součin výšky vodopádu a jeho průměrného ročního průtoku je vyšší než 20 m · l/s. Způsoby definování založené na průtoku mají ale nevýhodu, neboť stanovit průměrný roční průtok bývá zejména na malých vodních tocích poměrně obtížné a je proto nutné jej orientačně určit z údajů o ploše povodí a specifickém odtoku (Pánová, 2013).

Výška stupně není pro definici vodopádu také jednoznačná. Ta se jako určující parametr liší v souvislosti s geografickými podmínkami a četností vodopádů v daném území (Janoška, 2008). Izolovaný 2 m stupeň v nížině je nápadný a bude za vodopád považován spíše než obdobný objekt v horském prostředí, kde se takových vyskytují stovky. Přestože někteří autoři udávají konkrétní hodnoty: minimální výška 1 m (Arsejev, 1987) nebo 2 m u samostatného, izolovaného stupně (Pilous, 2009a), odborné literární prameny se přesné definici výškových charakteristik vodopádů zpravidla vyhýbají.

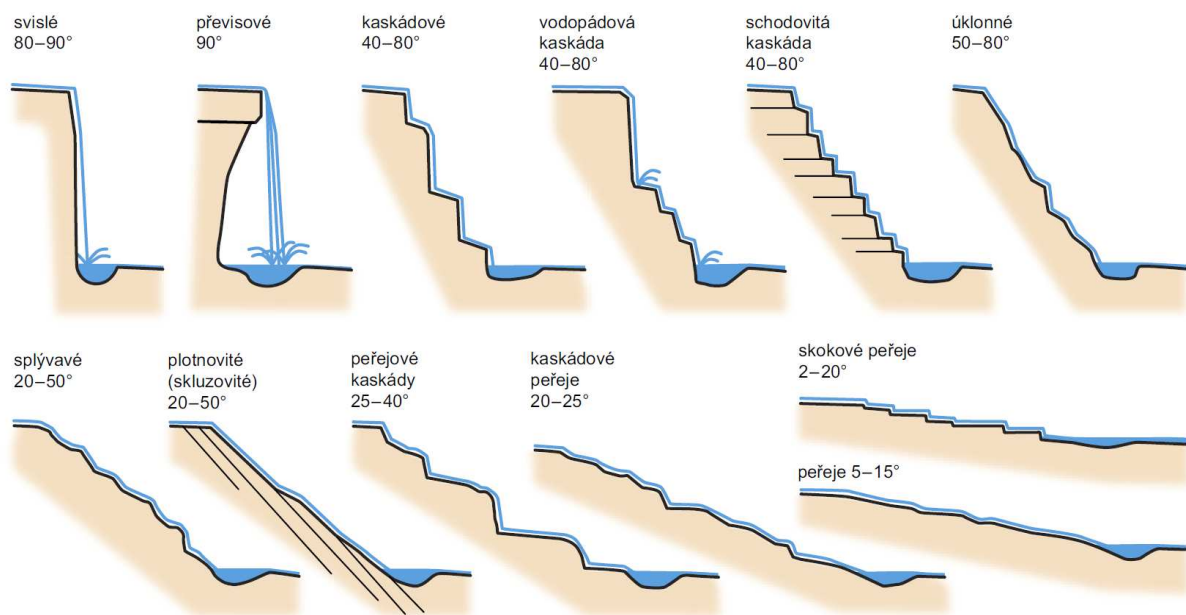
Jedním z nejvýznamnějších odborníků na problematiku vodopádů v Česku je RNDr. Vlastimil Pilous. Ten uvádí, že rozmanitost vodopádů a hlavně subjektivita v jejich chápání znemožňuje jakoukoliv jejich přesnou definici (Pilous, 2009a). Vodopády nejsou izolovaným jevem v krajině, ale souvisí s okolním reliéfem, který vedl k jejich vzniku. Každý potenciální vodopád by se tedy měl posuzovat individuálně a v souvislosti s okolní krajinou (Pánová, 2013).

2.2 Klasifikace vodopádů

Základní důvod vzniku vodopádů podmiňují reliéfové (tj. geomorfologické) poměry v širším okolí, ale konkrétní podoba (typ vodopádu, počet stupňů atd.) je podmíněna lokálními geologickými příčinami. Jedná se především o charakter geologického podloží, sklon podloží, horizontální členitost a dále také o hydrologický charakter toku (Pilous, 2009a). S ohledem na variabilitu zmíněných charakteristik je pravděpodobné, že nenalezneme na světě dva zcela totožné vodopády, ale na základě konkrétních znaků je možné je klasifikovat a systematizovat.

Pilous (2015) uvádí jako nejzákladnější dělení na *destruktivní*, které eroze postupně snižuje a *konstruktivní*, které naopak narůstají (např. na travertinech). *Konstruktivní* vodopády se na území Krkonoš vůbec nevyskytují, a proto jim dále nebude věnována pozornost. *Destruktivní* dále dělíme *konsekventní* (primární) a *subsekventní* (sekundární). *Konsekventní* vznikají na reliéfových stupních vzniklých geologickým vývojem již předem a bez přičinění samotného vodního toku (vodopád tedy jen kopíruje starší reliéf), *subsekventní* naopak vznikají teprve přímou činností samotného vodního toku (např. na kontaktu dvou různě tvrdých hornin rychlejší erozí v té měkčí) (Pilous, 2015). *Konsekventní* i *subsekventní* vodopády lze dále dělit na mnoho dalších typů (viz např. Janoška, 2008 nebo Pilous 2012). V Krkonoších se setkáme s oběma uvedenými typy, a přestože *subsekventní* převládají, nejvyšší vodopády v Labském a Obřím dole se řadí ke *konsekventním* (Pilous, 2015).

Vodopády a také příbuzné jevy (peřeje, kaskády...) můžeme dále rozdělit podle *sklonových poměrů*. Základní typologie a terminologie včetně sklonů je schematicky znázorněna na obr. 1.



Obr. 1. Typologie a terminologie vodopádů podle sklonových poměrů (Pilous, 2015)

Z hlediska *horizontální členitosti* rozlišujeme vodopády celistvé v šířce celého řečiště, vějířovité dolů se rozšiřující, nálevkovité dolů se zužující, tobogánovité esovitě prohnuté, svazkovité s jediným úzkým proudem, žlabovité v úzké skalní průrvě a víceramenné, kdy se vodní proud dělí na stěně na několik ramen, z nichž každé může mít odlišnou podobu (Pilous, 2015).

V horských oblastech je běžné, že vodní tok vytváří delší úsek s celou řadou stupňů a nerovností nejrůznějšího typu. Podle jejich hustoty rozlišujeme *vodopádovou soustavou*, kdy jsou jednotlivé stupně blízko u sebe, oddělené jen krátkými úseky normálního toku (řádově metrů) a *vodopádovou sérií*, kdy jsou stupně od sebe vzdálené desítky až stovky metrů (Pilous, 2009a).

Poslední dělení, které je ale v souvislosti s málo vodnými krkonošskými vodopády důležité zmínit, je dělení hydrologické. Pilous (2015) vymezuje vodopády stálé (celoročně protékané vodou), sezónní (v suchých obdobích se mění do skapovité nebo čůrkovité podoby), periodické (protékané především během tání sněhu), a efemerní (protékané jen výjimečně za extrémních srážkových podmínek).

2.3 Parametry vodopádů a jejich určování

Podobně, jako je tomu u naprosté většiny fyzicko-geografických objektů, mají také vodopády své měřitelné parametry, které je charakterizují. Následující kapitola se zaměřuje na ty, které s účelem práce přímo souvisí a byly z dat leteckého laserového skenování získávány. Jedná se o prostorovou polohu vodopádu, jeho výšku a plochu povodí.

2.3.1 Poloha vodopádu

Za polohu vodopádu je obvykle považována poloha jeho přepadové hrany a běžně se měří pomocí GPS přijímače (v případě vyšších požadavků na přesnost lze použít tzv. geodetických GPS přístrojů). Takové měření může být v praxi obtížně realizovatelné, neboť jej znesnadňuje fakt, že se vodopády velmi často vyskytují ve špatně přístupném a členitém terénu. V komplikovaných případech, kdy se měřič nemůže dostat přímo na hranu vodopádu, lze změřit polohu na pomyslné kolmici a v post-processingu odečíst souřadnice na vodním toku (Pánová, 2013). Problém mohou rovněž představovat úzká údolí, kde je snižená viditelnost družic a slabší signál. Jedná-li se o vodopád, který není výrazně zakrytý vegetací, je v některých případech možné pro jeho lokalizaci využít ortofotomapu.

2.3.2 Výška vodopádu

Jak bylo zmíněno v úvodní kapitole, výška vodopádu není zpravidla parametr, který by jej definoval, přes to se jedná o údaj dosti žádaný. Přesnou definici *výšky vodopádu* překvapivě žádný z nalezených zdrojů neuvádí, ale můžeme ji chápat jako rozdíl nadmořských výšek nejvyššího a nejnižšího bodu, tedy přepadové hrany a paty vodopádu (případně tůně nebo vývařště). Obtížným úkolem však bývá stanovit přesnou polohu těchto dvou míst a tím určit, kde samotný vodopád začíná a kde končí. Úpatí vodopádu může být ukryto pod masou vody a přepadová hrana má často pozvolný nástup (Pánová, 2013). V případech, kdy se vodopád skládá z více částí (stupňů), je nezbytné individuální posouzení a stanovení, zda se nejedná o více menších vodopádů.

Výšku nižších a snadno přístupných vodopádů lze např. zjistit měřením za pomoci pásma. Tato problematika je ale poněkud komplexnější a zabývá se jí např. Cheng (2013), který popisuje pět různých metod:

1. První postup, jako jediný, nevychází z terénního měření, ale z analýzy topografické mapy a odečtení rozdílu nadmořské výšky přepadové hrany a paty vodopádu. Tato metoda vyžaduje velmi podrobnou mapu, s nízkou hodnotou základního intervalu vrstevnic a vyznačenou polohou paty i hrany vodopádu. Její použitelnost je velmi omezená, protože přesnost vrstevnic v topografické mapě je v místech extrémního sklonu nižší (Šíma, Egrmajerová, 2004).
2. Velmi rychlá, ale také málo přesná terénní metoda odhadu výšky je založena na vyfotografování celého vodopádu, společně s objektem, jehož výšku známe (např. postava člověka). Na výsledné fotografii se jejich rozměry porovnají, čímž se odhadne přibližná výška vodopádu.

3. Další způsob využívá jednoduchého fyzikálního vzorce pro výpočet velikosti dráhy volného pádu:

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

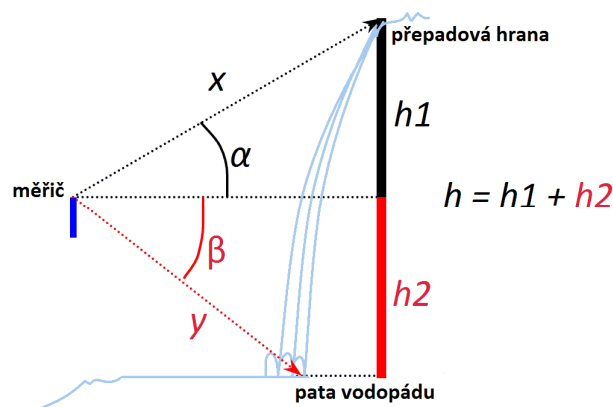
Z přepradové hrany je puštěno těleso o libovolné hmotnosti a měří se čas volného pádu – t , který je dosazen do vzorce. Veličina g reprezentuje tíhové zrychlení, které není na celé Zemi stejné. Na území ČR je jeho hodnota cca $9,81 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$ (VÚGTK, 2010). Proměnná s značí velikost dráhy volného pádu, což je v tomto případě i výška celého vodopádu.

Přesnou hodnotu času volného pádu je při reálném měření velmi obtížné zaručit, a proto se ani v tomto případě nejedná o příliš spolehlivou metodu. Pro měření velmi nízkých vodopádů je naprosto nevhodná.

4. Princip čtvrté metody spočívá ve spuštění tělesa, uvázaného na provaze, z přepradové hrany k patě vodopádu. Ve chvíli, kdy spuštěné závaží dosáhne úpatí, je na provaze označeno místo, odpovídající poloze přepradové hrany. Vzdálenost mezi značkou a místem uvázaného závaží udává výšku vodopádu.

Touto metodou nelze měřit velmi vysoké vodopády a limituje ji i velký průtok (Pánová, 2013). Pomineme-li jednoznačná bezpečnostní rizika třetí i čtvrté metody, nevýhody spočívají také v jejich nepřesnosti a použitelnosti pouze pro svislé a převislé vodopády (viz obr. 1)

5. Poslední metoda neměří výšku vodopádu přímo, ale vypočítává ji pomocí základních trigonometrických vzorců z naměřených hodnot a je nejpřesnější. V terénu se pomocí přístrojů (např. teodolit, laserový dálkoměr, sklonoměr...) změří úhly α , β a vzdálenosti x , y (viz obr. 2).



Obr. 2. Schéma měření výšky vodopádu (vlastní zpracování)

Celková výška se vypočítá dosazením do vzorců:

$$h_1 = x * \sin \alpha$$

$$h_2 = y * \sin \beta$$

$$h = h_1 + h_2$$

Úlohu lze modifikovat pro situace, kdy měřič nestojí uprostřed vodopádu, ale jeho stanoviště je například nad úrovní přepadové hrany (Cheng, 2013).

Z těchto pěti postupů, jak měřit výšku vodopádu, lze pouze poslední považovat za měření. První čtyři metody údaj spíše odhadují, než měří.

2.3.3 Plocha povodí

Jako *povodí* označujeme území, z něhož odtéká voda z atmosférických srážek nebo akumulovaná v ledovcích a ve stálé sněhové pokrývce povrchovou i podzemní cestou do jediného závěrového profilu (Netopil a kol., 1984). Jedná se o základní prostorovou hydrologickou jednotku, která je ohraničena rozvodnicí – pomyslnou čarou vymezující geografickou hranici mezi dvěma povodími. Podle způsobu vymezení rozlišujeme orografické a hydrogeologické povodí i rozvodnice. Orografické povodí je určeno rozvodnicí, která probíhá přes nejvyšší vrcholy a mezi nimi ležící hřebeny a sedla. Hydrologické povodí se často kryje s orografickým, ale v místech se složitější stavbou geologického podloží může podzemní voda odtékat do jiného povodí, než voda povrchová (Netopil a kol., 1984). V těchto případech je průběh orografické a hydrogeologické rozvodnice odlišný.

Již zmíněným závěrovým profilem, tedy místem odkud odtéká veškerá voda z povodí, je v případě vodopádu jeho přepadová hrana. Význam výpočtu plochy povodí, jakožto další charakteristiky vodopádu, spočívá v možnosti alespoň částečně odhadnout jeho průtok, který bývá obtížně měřitelný. Při znalosti plochy povodí a *specifického odtoku* pro danou oblast, můžeme jeho přibližnou hodnotu odvodit. *Specifický odtok* vyjadřuje množství vody odtékající za jednotku času z jednotky plochy povodí a udává se obvykle v litrech za sekundu z plochy 1 km² (Netopil a kol., 1984).

2.4 *Letecké laserové skenování*

Letecké laserové skenování je spolehlivá metoda získávání velmi podrobných informací o zemském povrchu. Technologie laserového skenování byla sice vyvinuta před více než 40 lety, ale LLS zaznamenalo výraznější rozšíření až v souvislosti s uvedením a zdokonalováním navigačního systému GPS (Dolanský, 2004). Rovněž pokrok ve vývoji inerciálních navigačních systémů (INS) a jejich uvolnění pro komerční sféru poskytlo dostatečně přesnou metodu pro měření orientací (Dolanský, 2004).

Na palubě speciálně vybaveného letadla (v dnešní době může být i bezpilotní) je umístěn letecký laserový skener, který vysílá laserové paprsky v podobě krátkých pulzů směrem k zemskému povrchu (Šíma, 2009). Poloha bodu se určí z času mezi vysláním paprsku a jeho dopadem zpět. Svazek laserových paprsků se odráží jednak od terénu, jednak od všech objektů nad terénem, a právě schopnost paprsků proniknout vegetací patří k hlavním výhodám LLS (Lysák, 2016). Prostorová poloha skeneru je měřena pomocí palubní aparatury GNSS, podélný, příčný sklon a pootočení skeneru vůči plánované letové dráze určuje inerciální měřická jednotka (Šíma, 2009). Jelikož je letecký laserový skener aktivním senzorem, nezávislým na slunečním záření, je možné měření provádět za podstatně horších podmínek, než je tomu např. u leteckého snímkování (Dolanský, 2004).

Jako hlavní výhody LLS jmenuje Šíma (2009) získání velkého množství bodů terénu i objektů na něm v krátkém čase, vysokou míru automatizace zpracování dat a vyšší výškovou přesnost v porovnání s fotogrammetrií při stejné relativní výšce letu. Jako nevýhody uvádí značnou počáteční investiční náročnost, laikům obtížně srozumitelný polohopisný obraz území a 2 až 5× nižší polohovou přesnost v porovnání s výškovou (především v terénu s větším sklonem).

Základním výstupem z LLS je tzv. bodové mračno. Jedná se o značné množství nerovnoměrně rozmístěných bodů v prostoru, přičemž každý má souřadnice x , y , z (Potřebová, 2013). Celé mračno lze transformovat do libovolného souřadnicového systému. Získaná data se musí pro další účely zpracovávat: filtrace dat (rozlišení odrazů pocházejících od terénu od mimoterénních odrazů) a klasifikace dat (podrobnější kategorizace bodů) (Lysák, 2016).

Z hlediska uživatelského je asi nejdůležitějším parametrem LLS hustota bodového mračna neboli počet bodů na jednotku plochy. Ta je závislá na výšce a rychlosti letu, frekvenci skeneru a počtu a velikosti překryvů letových pásů nad daným územím (Pícek, 2014). Udává se v bodech na m^2 a čím je její hodnota vyšší, tím jsou zaznamenány detailnější informace o terénu.

Ze zpracovaných dat z LLS se odvozuje digitální model reliéfu, který VÚGTK (2005) definuje jako digitální reprezentaci zemského povrchu v paměti počítače, složenou z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů. DMR může být tvořen buď maticí pravidelně rozmístěných výškových bodů (grid) nebo nepravidelnou trojúhelníkovou sítí reprezentující reliéf (TIN)

(Rapant, 2006). Oba datové modely (grid i TIN) je možné vizualizovat, upravovat a analyzovat ve vhodném počítačovém softwaru.

Data získaná pomocí leteckého laserového skenování mají v dnešní době širokou škálu použití. Z odvětví, kde se hojně využívají, lze jmenovat lesnictví (měření výšek stromů, identifikace dřevin), glaciologii (detekce hranic ledovců), geomorfologii, archeologii, stavebnictví a mnohé další. V přímé souvislosti s měřením vodopádů toho je zatím publikováno jen velmi málo. Částečně se tomuto tématu věnuje Pánová (2013), když z dat LLS měří výšky tří krkonošských vodopádů (Labského, Hančova a Sovího) a porovnává je se známými hodnotami. Přesný popis metodiky měření ale uveden není.

Problematikou nalezení pravděpodobného výskytu vodopádů z dat LLS se zabývá Camposano et al. (2015). Na dvou modelových vodopádech na ostrově Cebu autoři navrhnou metodiku založenou na přípravě DMR, odvození průběhu drenážní sítě a následném nalezení místa v říčním korytě (a jeho nejbližšího okolí), jehož sklon je více než 20° . Bohužel zde zcela chybí testování navrženého postupu na větším množství zkušebních dat.

3 Zájmové území

Výběr Krkonoš, jakožto zájmového území pro tuto práci, nebyl rozhodně náhodný a měl několik objektivních příčin, které se pokusí shrnout následující kapitola.

V Krkonoších se nachází jednoznačně nejvíce vodopádů ze všech našich horopisných celků, navíc nejvyšších a většinou i nejvodnějších (Pilous, 2009a). Důvodem není jejich nejvyšší nadmořská výška (ve světě nalezneme řadu mnohem vyšších pohoří, které jsou prakticky bez vodopádů), ale příznivá kombinace důležitých faktorů pro vznik vodopádů. Jedná se především o geologický vývoj pohoří (mj. jeho stáří) a jeho geologickou stavbu, vlastnosti jednotlivých hornin jako charakter jejich odlučnosti, hustota a směry puklin, u sedimentárních charakter vrstevnatosti (Pilous, 2015). Důležité jsou také klimatické poměry, které tu vládou nejen dnes, ale minimálně po celé čtvrtohory. Tím nejvýznamnějším faktorem bylo bezesporu čtvrtohorní zalednění, nejrozsáhlejší z našich pohoří, kterému Krkonoše vděčí za všechny své nejvyšší vodopády (Pilous, 2009a). Pilous (2015) uvádí, že česká část Krkonoš má dnes evidovaných 78 vodopádů vyšších než 2 m. Ve skutečnosti je jich více než 100, protože u mnohých menších potoků jsou celé soustavy až série označeny jako jediný vodopád.

Druhým důvodem, proč byly vybrány právě krkonošské vodopády, je množství a dostupnost údajů o nich. Tomuto tématu se dlouhodobě a podrobně věnuje dr. Pilous, autor mnoha odborných článků a publikací, zaměřených především na krkonošské a jizerské vodopády. Pro účely této práce byl využit zejména rozsáhlý seriál 36 odborných článků, které postupně vycházely v časopise *Krkonoše – Jizerské hory* v letech 2009 až 2012 (v letech 2014 a 2016 byl ještě doplněn o dva články, popisující dodatečně objevené vodopády). Po obecném úvodu v prvním dílu se autor následně zabývá jednotlivými vodopády a popisuje jejich polohu, genezi, horninové podloží, hydrologické poměry, řadí je ke konkrétním typům a shrnuje mnoho dalších charakteristik, včetně např. zajímavostí z historie. Z topografického hlediska je zásadní, že jsou zde také uvedeny údaje o sklonech a výškách vodopádů, obvykle včetně informací o poloze přepadových hran a úpatí, tedy odkud a kam se měřilo.

Metodika měření výšky vodopádů není ve zmíněných článcích uvedena, ale podle informací od dr. Pilouse byly nižší vodopády (cca do 10 m) měřeny přímo měřicím pásmem, popřípadě pomocí dlouhých tyčí, s korekcí vyplývající ze sklonu. U vysokých vodopádů bylo základní měření provedeno pomocí relativně přesného švýcarského výškoměru Thommen, což ale nevyklučovalo nepřesnost v řádu jednotek metrů. Proto proběhla opakovaná upřesňující měření pomocí skládacího metru, sklonoměru a měřického pásma a z jejich výsledků vypočteny průměry.

Roku 1989 byla v časopise *Opera Corcontica* publikována práce téhož autora, zaměřená na vodopády Labského a Obřího dolu. Pilous (1989) podrobně charakterizuje genezi a geomorfologii tamních vodopádů a mimo jiné se zabývá i konstrukcí podélných profilů většiny z nich. Podélné profily vystihují

sklonové poměry toku a u vodopádových soustav jsou z nich zřetelně patrné jednotlivé stupně vodopádu.

Poslední, ale neméně důležitá, příčina volby vodopádů na území Krkonoš byla existence podrobných dat z leteckého laserového skenování celé plochy Krkonošského národního parku (viz kapitola 4.1). Je zřejmé, že například měření výšek těch nejmenších vodopádů bude velmi záviset na podrobnosti použitých dat.

Kombinace velkého počtu vodopádů, podrobných informací o nich a přesných dat z LLS činí Krkonoše mezi našimi horstvy unikátní. Není však cílem této práce, soustředit se na každý místní vodopád, ve snaze o upřesnění jeho charakteristik. Záměrem je aplikovat navrženou metodiku na různé typy v Krkonoších se vyskytujícími vodopády a zhodnotit její použitelnost. Proto bylo vybráno 28 konkrétních vodopádů, kterým se práce věnuje (viz tab. 1). Při volbě byl kladen důraz na jejich maximální rozmanitost z hlediska vlastností. Ve výběru se proto vyskytují nejvyšší vodopády na našem území (Pančavský, Horní Úpský), ale také velmi malé (Mechový, Velký skok), které by mohly ukázat limity dat LLS. Další zohledněná kritéria jsou např. genetický původ vodopádu (konsekventní i subsekventní typy údolí), viditelnost vodopádu ve smyslu míry jeho zakrytí vegetací, různé šířky říčního koryta nebo prostorové rozmístění mezi všechna tři povodí (Labe, Úpu a Jizeru). Výběr neopomíjí několik periodicky protékaných vodopádů v oblasti Labských jam (v blízkosti Pančavského vdp.), u nichž dosud nebyla ani přesně známa jejich poloha. U delších vodopádů a vodopádových soustav vypovídají mnohé o jejich průběhu podélné profily. Ve výběru je zařazeno šest takových, pro které bude profil konstruován: Dolní Úpský, Dvorský, Hančův, Horní Úpský, Pančavský a Pudlavský. Snahou bylo také nevynechat žádnou turisticky významnou lokalitu, byť toto hledisko je poněkud relativní.

<i>název vodopádu</i>	<i>vodní tok</i>	<i>povodí</i>	<i>genetický původ</i>	<i>zakrytí vegetací</i>	<i>zásobení vodou</i>
Červený	Červený potok	Labe	subsekventní	ano	stálé
Dlouhý	Bílé Labe	Labe	subsekventní	částečně	stálé
Dolní Úpský	Úpa	Úpa	konsekventní	ano	stálé
Doubravův	Doubravův potok	Úpa	subsekventní	částečně	stálé
Dvorský	Dvorský potok	Labe	konsekventní	ano	stálé
Hančův	Hančův ručej	Labe	konsekventní	ne	sezónní
Horní Úpský	Úpa	Úpa	konsekventní	ne	stálé
Huťský	Huťský potok	Jizera	subsekventní	ano	stálé
Jeřábový	Jelení potok	Úpa	subsekventní	částečně	stálé
Koulový	Koulová strouha	Úpa	subsekventní	ano	stálé
Kozelský	Kozelský potok	Jizera	subsekventní	ano	stálé
Křivý	Křivý ručej	Labe	subsekventní	ne	sezónní/periodické
Labský	Labe	Labe	komplikovaný	ne	stálé
Luční	bezejmenný	Labe	subsekventní	ne	stálé
Malý Labský	Labe	Labe	konsekventní	ano	stálé
Malý Navorský	M. Navorský ručej	Labe	subsekventní	ne	sezónní/periodické
Mechový	bezejmenný	Úpa	subsekventní	částečně	stálé
Modrodolský	bezejmenný	Úpa	subsekventní	částečně	stálé
Mumlavský	Mumlava	Jizera	subsekventní	částečně	stálé
Pančavský	Pančava	Labe	konsekventní	ne	stálé
Plotnový	Bílé Labe	Labe	subsekventní	částečně	stálé
Pramenný	Pramenný potok	Labe	subsekventní	ne	stálé
Pudlavský	Pudlava	Labe	konsekventní	ano	stálé
Soví	Soví potok	Úpa	subsekventní	ano	stálé
Tetřeví	Tetřeví strouha	Labe	subsekventní	ano	stálé
Velký	Bílé Labe	Labe	subsekventní	ano	stálé
Velký Skok	Bílé Labe	Labe	subsekventní	částečně	stálé
Závojevý	Dobytčí potok	Úpa	subsekventní	ano	stálé

Tab. 1. Vybrané krkonošské vodopády

Zdroj: Pilous (2009b-2009j, 2010a-2010e, 2011a-2011f)

4 *Data a metodika*

Před samotným návrhem použité metodiky, jakožto klíčového bodu celé práce, bylo nezbytné nahlédnout na problematiku poněkud komplexněji a zodpovědět několik elementárních otázek. První z nich byla: co má být měřeno – neboli, které charakteristiky vodopádů chceme zjistit. Jedná se o čtyři základní údaje:

- poloha vodopádu
- výška vodopádu
- plocha povodí
- podélný profil

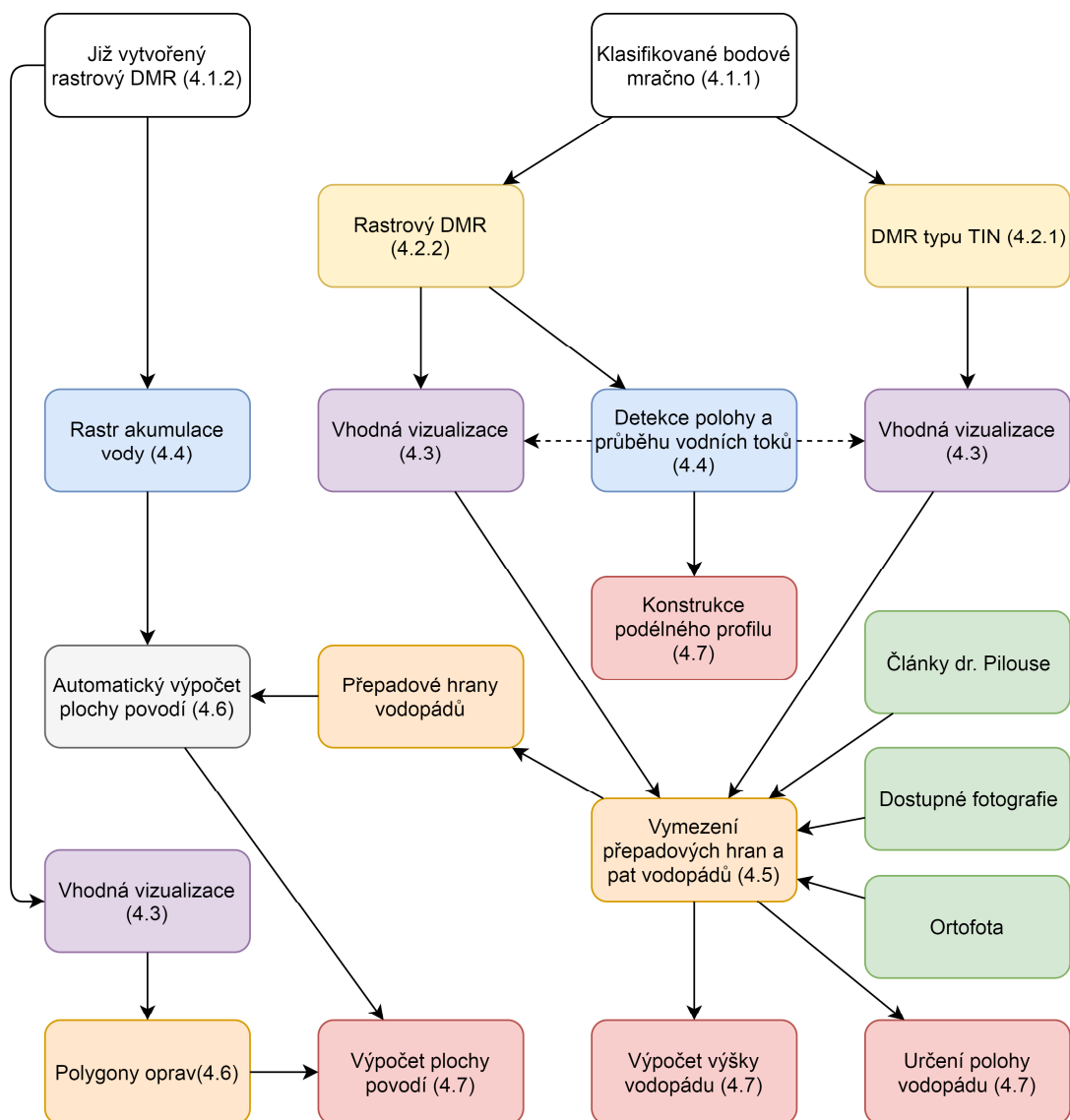
Poté následovala úvaha nad tím, které informace jsou potřebné pro získání těchto údajů. Poloha vodopádu je dána umístěním přepadové hrany a jeho výška rozdílem nadmořských výšek hrany a paty vodopádu. Výpočet plochy povodí vyžaduje pozici závěrového profilu (opět přepadová hrana vodopádu) a vymezení rozvodnice. Pro konstrukci podélného profilu je nutná znalost průběhu vodního toku v místě vodopádu. Ze vstupních dat je tedy nutné získat:

- polohu a nadmořskou výšku přepadových hran vodopádů
- polohu a nadmořskou výšku pat vodopádů
- pozice rozvodnic
- polohu a průběh vodních toků

Nyní již mohl začít návrh postupu, jak potřebné informace z dostupných dat získat. Byla sestavena posloupnost sedmi navazujících dílčích kroků k dosažení tohoto cíle:

1. Příprava dat
2. Tvorba digitálních modelů reliéfu
3. Vizualizace DMR v prostředí ArcMap
4. Detekce polohy a průběhu vodních toků
5. Vymezení přepadových hran a pat vodopádu
6. Plocha povodí vodopádu
7. Určení polohy, výpočet výšky a plochy povodí, konstrukce podélného profilu

Každý z těchto kroků je podrobně popsán v samostatné části této kapitoly. Přestože je jejich vzájemná provázanost a důležitost stanoveného pořadí poněkud složitější a nejlépe ji ilustruje diagram na obr. 3, je vhodné nastínit na úvod alespoň stručnou charakteristiku celého postupu.



Obr. 3. Diagram navržené metodiky (vlastní zpracování)

Poznámka: červené obdélníky označují požadované výstupy; čísla v závorkách odpovídají kapitolám, kde je daný úkol popsán

Ze vstupních dat byly generovány digitální modely reliéfu, které byly následně vhodně vizualizovány, za účelem vymezení přepadových hran a pat vodopádů.

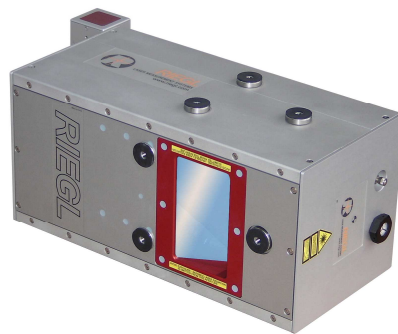
Detekce polohy a průběhu vodních toků, pro doplnění vizualizací a nezbytný prvek konstrukce podélných profilů, proběhla na vytvořených rastrových DMR pomocí dostupných hydrologických funkcí softwaru ArcGIS.

Z určitého úhlu pohledu samostatnou větví procesu je výpočet plochy povodí, neboť využívá jiná vstupní data. Pojítkem mezi oběma částmi je použití naměřených přepadových hran, jako závěrových profilů výpočtu plochy.

4.1 Příprava dat

Hlavním využitým zdrojem byla data pořízená během lokálního leteckého laserového skenování Krkonošského národního parku v průběhu roku 2012. Skenování bylo jednou ze čtyř částí projektu „*KRKONOŠE v INSPIRE – společný GIS pro ochranu přírody*“ a realizovala jej společnost GEODIS. Cílem tohoto projektu bylo získání geoprostorových dat pro území KRNAPu (cca 550 km²) a také jejich vyhodnocení (Puchrik, Nýdrle, 2013).

Leteckým laserovým skenerem se záznamem kompletní informace o odražené světelné vlně RIEGL LMS Q-680i (viz obr. 4) bylo v průběhu více než dvou týdnů naskenováno 553 letových řad (Puchrik, Nýdrle, 2013). Průměrná hustota bodového mračka dosahovala hodnoty 5 bodů/m², což pro srovnání převyšuje hodnoty Digitálního modelu reliéfu 5. generace více než trojnásobně (Brázdil, 2012).



Obr. 4. Letecký laserový skener RIEGL LMS Q-680i (Nordic Geo Center Oy, 2010)

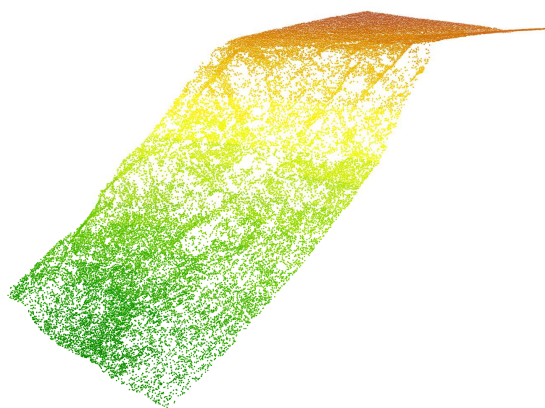
Data z leteckého laserového skenování, poskytnutá Správou KRNAP, jsou dvojího druhu:

4.1.1 Klasifikované bodové mračno (formát .LAS)

Data uložená v tomto formátu v sobě nesou informaci o prostorových souřadnicích x , y , z všech bodů terénu. S ohledem na jejich značný objem a výpočetní náročnost při zpracování jsou rozdělena do čtverců o velikosti strany 250 m. Pojmenování jednotlivých souborů odpovídá souřadnicím levého dolního rohu příslušného čtverce v UTM zóně 33. Pro účely této práce bylo vybráno celkem 53 čtverců tak, aby bezpečně pokrývaly určené lokality.

Poznámka: Pro výběr potřebných čtverců byla použita příloha číslo pět z bakalářské práce P. Pánové (2013). Jedná se o „tabulku s informacemi o vodopádech ve formátu .xlsx“, která mimo jiné obsahuje souřadnice vodopádů na území ČR.

Další zpracování probíhalo v programu ArcMap 10.4.1. Ten umožňuje vytvořit *LAS dataset*, což je datová sada obsahující odkazy na libovolné množství *.las* souborů (ESRI, 2016). Prostřednictvím těchto sad lze data z LLS do programu importovat, vytvářet základní vizualizace (viz obr. 5) a dále s nimi také pracovat, především z nich generovat digitální modely reliéfu. Původních 53 *.las* souborů bylo vhodně seskupeno do 25 vytvořených datových sad, reprezentujících území se zkoumanými vodopády. Software rovněž nabízí nástroje pro zjištění statistických údajů o vstupních datech (bodovém mračnu). Dle výpočtů provedených nad použitými daty je průměrná hustota bodového mračna 6,66 bodů/m² a střední vzdálenost mezi body se pohybuje v rozmezí 24,7-49,7 cm. Tato čísla jsou důležitým vodítkem při následné tvorbě DMR.



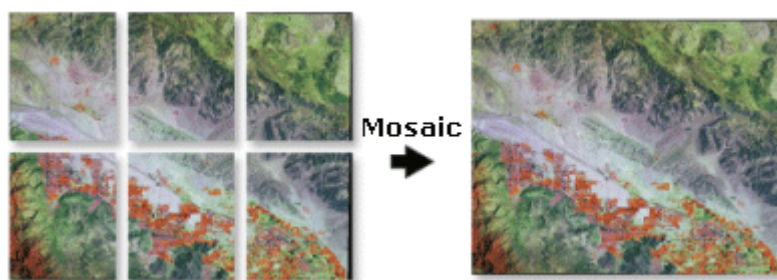
Obr. 5. Přímá vizualizace bodového mračna v oblasti Pančavské jámy (vlastní zpracování)

4.1.2 Rastrový DMR

Druhým typem poskytnutých dat byl již vytvořený rastrový DMR s velikostí pixelu 1 m. Při jeho vzniku byl z bodového mračna vytvořen TIN, který se následně převedl na rastr (Lysák, 2013).

Již připravený DMR byl použit výhradně pro výpočet plochy povodí jednotlivých vodopádů. Důvodem této volby byl fakt, že plocha povodí některých níže položených vodopádů (Mumlavský, Bílé Labe) je více než 10 km². Vytvářet nové, takto plošně rozsáhlé, modely reliéfu z originálních *.las* souborů o straně 250 m by bylo časově i hardwarově velmi náročné a ani by nedávalo velký smysl. S ohledem na rozlohy jednotlivých povodí v řádech desítek hektarů až jednotek km² je prostorové rozlišení 1 m naprosto dostatečné.

Poskytnutý rastrový DMR ve formátu *.asc* byl rozdělen na čtverce o straně 1 km. Výpočet plochy povodí vyžaduje, aby vstupní digitální model reliéfu bezpečně pokrýval celé povodí daného vodopádu. Opakovaným použitím funkce *Mosaic To New Raster (Data Management Tools)*, která spojuje několik rastrů do nového celistvého rastrového datasetu, byla vytvořena série nových rastrů, které této podmínce vyhovují. Princip funkce *Mosaic To New Raster* naznačuje obr. 6. Výběr potřebných čtverců probíhal na základě vizuální kontroly vrstevnic Základní mapy ČR 1:10 000 (ČÚZK, 2017b).



Obr. 6. Funkce *Mosaic To New Raster* (ESRI, 2016)

4.2 Tvorba digitálních modelů reliéfu

Editace a tvorba analýz nad daty bodového mračka je sice v programu ArcMap do určité míry možná, ale mnohem běžnější a výhodnější je odvodit z dat LLS digitální model reliéfu. Základní myšlenka tvorby DMR spočívá ve využití dostupných výškopisných dat zájmové oblasti. Pro vytvoření spojitě reprezentace povrchu, tedy dopočtení výšek mezilehlých bodů, se použije interpolačních metod, které hodnoty odvozují od okolních bodů (Rapant, 2006). Software ArcMap (ale i konkurenční programy zaměřené na práci s prostorovými daty) nabízí řadu nástrojů pro vizualizaci, úpravy i analýzu DMR.

Dva nejběžněji používané datové modely DMR jsou TIN a grid (rastr). Oba byly v průběhu zpracování využívány.

4.2.1 DMR typu TIN

TIN (Triangular irregular network) je nepravidelná trojúhelníková síť, kde body LLS představují vrcholy trojúhelníků a mezi nimi jsou lineární plochy. Při konstrukci sítě se často používá Delaunayova triangulace, která vytváří co možná nejrovnostřednější trojúhelníky (Lysák, 2016). TIN je datově relativně úsporný, velmi věrně reprezentuje povrch jako celek, ale je poněkud obtížnější na něm realizovat některé analýzy (např. výpočet křivosti).

TIN se z *LAS dataset* v ArcMap vytváří pomocí funkce *LAS Dataset To TIN* ze sady *3D Analyst Tools* a pro účely této práce bylo ze všech připravených datových sad vytvořeno celkem 25 DMR tohoto typu.

4.2.2 DMR typu grid (rastr)

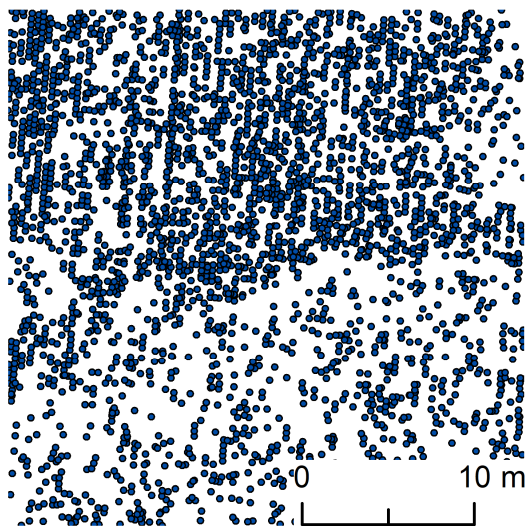
Základní stavební prvky rastrové struktury jsou buňky, uspořádané do pravidelné mřížky. Nejčastěji se setkáme s pravidelným čtvercovým rastrem, protože tato reprezentace je jednoduchá a je orientovaná v souladu s kartézským souřadnicovým systémem. (Oršulák, Pacina, 2012). Jednotlivé buňky obsahují hodnoty zobrazovaného jevu, v případě DMR tedy nadmořskou výšku. Při tvorbě rastru se používá řada interpolačních metod: *lineární* (pracuje se 3 body definující trojúhelníkovou plošku), *IDW* (datům je přiřazena váha na základě vzdálenosti bodů), *Kriging* a další (Píček, 2014). Rastrové modely jsou ve srovnání s TIN vhodnější k některým analýzám a odvozování dalších produktů (Lysák, 2016).

Klíčovým parametrem rastru je velikost jednoho pixelu (buňky) a z ní vyplývající prostorové rozlišení. Čím je velikost buňky menší, tím detailnější informace o terénu máme, ale zároveň tím roste objem dat. Pro stanovení ideální hodnoty je rozumné zohlednit hustotu bodového mračka z dat LLS, resp. střední vzdálenost mezi body. Hengl (2006) problematiku rozebírá a uzavírá konstatováním, že neexistuje jednoznačná správná hodnota a volba velikosti závisí na účelu vytvářeného rastru, nicméně doporučen je dvojnásobek až trojnásobek střední vzdálenosti bodů. Ta se u použitých dat pohybuje mezi 24,7 a 49,7 cm, tudíž velikost jedné buňky by měla být cca 50-150 cm.

Toto doporučení bylo při tvorbě rastrových DMR respektováno jen částečně a pro další zpracování bylo z každého *LAS datasetu* vytvořeno pět rastrových DMR s různými velikostmi buněk (10, 20, 25, 50 a 100 cm). Celkově se tedy jedná o 125 modelů, pro každou lokalitu pět, s různým rozlišením.

Důvod tohoto kroku je v souladu s jedním z cílů metodické části, popsaným v úvodu celé kapitoly, a to detekcí polohy a průběhu vodních toků. Realizace výpočtu nad větším množstvím různých rastrů na jednom území umožní získat více potenciálních průběhů a dosažené výsledky porovnávat.

Příčina použití nízké hodnoty velikosti pixelů (až 10 cm) vychází z vlastností dat LLS. Body jsou v původním mračnu rozmístěny nerovnoměrně, a přestože umíme spočítat jejich průměrnou hustotu, je jisté, že se budou v mračnu vyskytovat místa, kde je podstatně vyšší (viz obr. 7). Cílem bylo získat nejpřesnější možný rastrový DMR a to i s vědomím, že bude obsahovat mnoho dat (z míst kde je naopak hustota nízká), která budou pouze navyšovat objem, ale nepřinesou žádnou další informaci.



Obr. 7. Nerovnoměrnost hustoty bodového mračna (vlastní zpracování)

Rastrový DMR je v prostředí ArcMap možné vytvářet dvěma způsoby. Buď přímo z *LAS dataset* funkcí *LAS Dataset To Raster* ze sady *Conversion Tools* nebo z již připravených TIN pomocí funkce *TIN To Raster* (*3D Analyst Tools*).

4.3 Vizualizace DMR v prostředí ArcMap

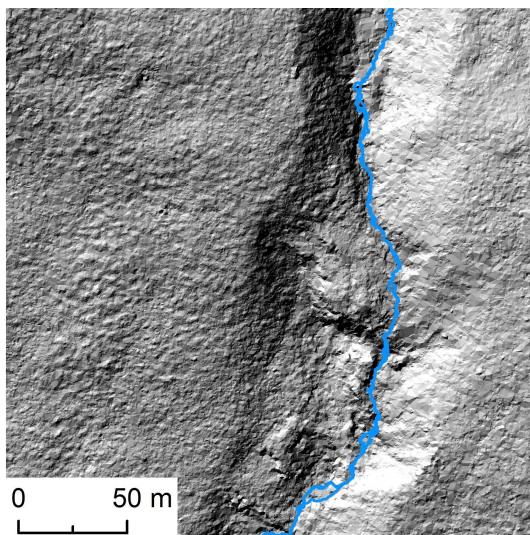
Pro efektivní využití prostorových dat je nezbytná jejich vhodná vizualizace. Ta usnadní jejich interpretaci a umožní detekovat takové objekty, které jsou pro zkoumaný jev zásadní. Software ArcMap nabízí řadu možností, jak vizualizovat DMR. V následující kapitole je věnována pozornost hlavně nástrojům, které se ukázaly jako relevantní pro posuzování řešené problematiky.

Stínovaný reliéf

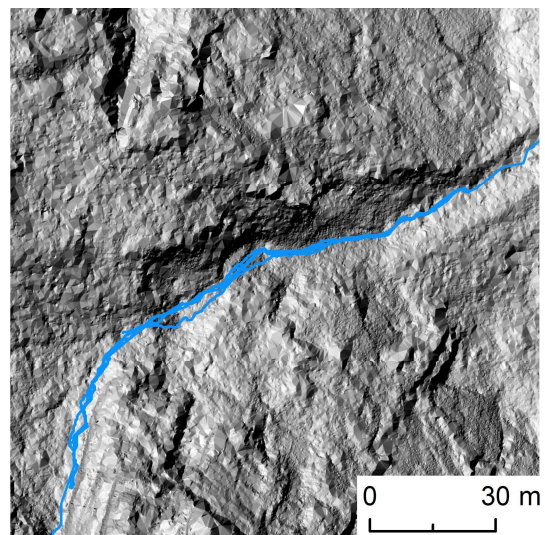
Stínovaný reliéf je běžná kartografická metoda vyjádření výškopisu, vhodná zejména pro hornatá území. Principem metody je představa, že na reliéf dopadají světelné paprsky z jednoho směru a vytvářejí rozdíly v osvětlení. Místa, kam dopadají kolmo, jsou světlá a místa, kam nedopadají vůbec, jsou tmavá (Čapek a kol., 1992). Stínovaný reliéf působí plasticky, je snadné se v něm orientovat a udělat si základní představu o tvaru zemského povrchu.

Funkce *Hillshade* (*Spatial Analyst Tools* nebo *3D Analyst Tools*) vyžaduje na vstupu informaci o azimutu směru osvětlení a úhlu dopadajících paprsků. Pro vodopády ve velmi členitém reliéfu (např. Labský důl) se osvědčilo volit úhel 60° , pro ty ostatní 45° . Azimut směru osvětlení byl otestován pro 8 různých směrů, ale výsledky nepřinášely prakticky žádný posun, a proto byla ponechána výchozí hodnota 315° – severozápadní směr.

Přínos stínovaného reliéfu spočíval hlavně při všeobecné orientaci v terénu, primárním lokalizování poloh vodopádů a kontrole dráhy modelovaných vodních toků. Pro přesné určení místa přepadové hrany nebo paty vodopádu nedostačoval. Na obr. 8 a 9 je vizualizace stínovaného reliéfu, doplněného o modelované průběhy vodních toků v místě Dvorského a Hančova vodopádu.



Obr. 8. Dvorský potok (sklon osvětlení 45°)



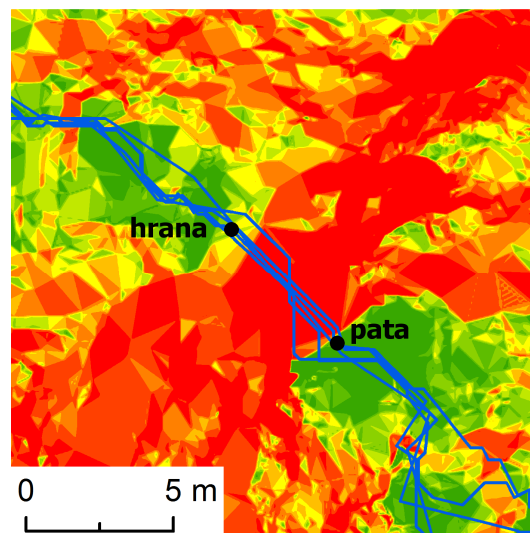
Obr. 9. Hančův ručeje (sklon osvětlení 60°)

Sklon

Sklon svahů přináší informaci o svažitosti terénu a je důležitým morfometrickým ukazatelem, určující míru intenzity geomorfologických projevů (Demek, 1987). U rastrových reprezentací se počítá jako maximální změna výšky sousedních buněk, přičemž je zohledněna také vzdálenost jejich středů (ESRI, 2016). Program ArcGIS využívá pro výpočet sklonu tzv. Hornovu metodu, která bere informace z hodnot v 8 nejbližších buňkách, kterým je přiřazena určitá váha (Picek, 2014).

Rastr sklonu svahů se tvoří funkcí *Slope (Spatial Analyst Tools* nebo *3D Analyst Tools*) a volitelným parametrem výstupu jsou jednotky hodnoty sklonu. Volit můžeme stupně nebo procenta. Většina dostupných literárních i internetových pramenů, které se zaměřují na vodopády, preferuje stupně, a proto byly také upřednostněny.

Konečná podoba vizualizace vytvořeného rastru se nastaví úpravou symbologie ve vlastnostech vrstvy. Obvykle se volí barevná škála (zelená – žlutá – červená). Vzhledem k charakteru krkonošských vodopádů a jejich nejbližšího okolí, se jako optimální (ve většině případů) ukázalo vymezit 10 intervalů. Devět po pěti stupních v rozmezí 0-45° a jeden pro sklon nad 45°. Sklon svahů splnil do značné míry očekávání a ukázal se jako nejvhodnější pro určování hran/pat ze všech vizualizací nad rastrovými DMR. Na obr. 10 je zachycen Závojevý vodopád i s určenou přepadovou hranou a patou.



Obr. 10. Závojevý vodopád

Poznámka: pravidelnost plošek, značících konkrétní hodnoty sklonu ukazuje na jemnost použitého rastru (strana buňky 10cm). Při této hodnotě jsou již patrné některé body klasifikovaného mračna.

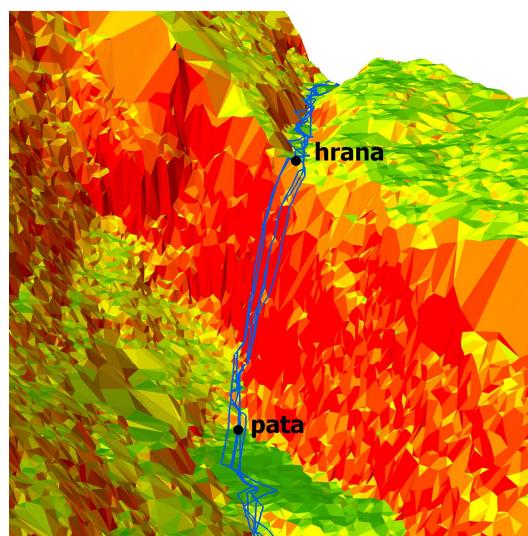
Vrstevnice

Zobrazení výškopisu pomocí vrstevnic je tradiční a často používaný způsob. Odvození vrstevnic ze vstupního DMR zajišťuje funkce *Contour* (*Spatial Analyst Tools* nebo *3D Analyst Tools*) a jediným povinným parametrem je základní interval vrstevnic. ZIV o hodnotě 50 cm (nebo méně) už do určité míry umožňoval odhadovat pravděpodobné začátky/konce vodopádů, ale efektivnější byl pro tento účel rastr sklonu svahů s kvalitně nastavenými intervaly. Potenciál využití vrstevnic se naplno projevil při vizuální kontrole správnosti automatického výpočtu hranic povodí.

Vizualizace ve 3D

Pro vizualizaci výškopisných dat existuje celá řada nástrojů. Některé z nich se zaměřují na projekci dat v trojrozměrném prostoru. V ArcGIS je to aplikace ArcScene. Zobrazená data lze podle potřeby otáčet a nahlížet na ně z libovolného úhlu, měnit hodnotu převýšení pro zvýraznění některých jevů, přibližovat atd. Vizualizovat můžeme běžná vektorová data (body, linie i polygony), rastry, ale také DMR typu TIN.

Model TIN velmi věrně zobrazuje data získaná z LLS, obecně je však složitější pro výpočet některých analytických úkolů. To ale neplatí u sklonu svahů, neboť pro jednotlivé trojúhelníky TIN je informace o sklonu dána ze souřadnic bodů definujících daný trojúhelník a můžeme říci, že tuto informaci obsahují implicitně a není ji nutné počítat (Oršulák, Pacina, 2012). ArcScene takovou vizualizaci nabízí (*Layer Properties – Symbology – Add Renderer – Face slope with graduated color ramp*) a 3D projekce takto „obarveného“ TIN byla nejsilnějším nástrojem při podrobném zkoumání tvaru jednotlivých vodopádů. Na obrázku 11 je tato vizualizace pro lokalitu Pramenného vodopádu.



Obr. 11. Pramenný vodopád – 3D pohled

Ostatní testované metody

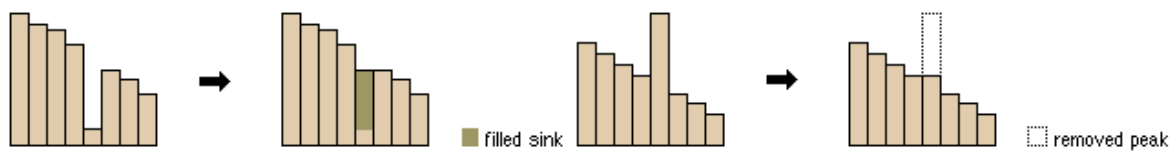
Ve snaze o získání nejpřesnějších možných informací byly prověřovány i další známé metody vizualizace DMR. Testování *lokálního reliéfu* (LRM), *křivosti* (konvexnost × konkávnost) a *barevné hypsometrie* ale nepřineslo žádnou přidanou hodnotu, a to ani přes opakované změny nastavených parametrů při tvorbě. Pouze *barevná hypsometrie*, v kombinaci se symbologií diskrétních barev, odkryla určité detaily, ale totéž bylo možné vyčíst z vytvořených vrstevnic.

4.4 Detekce polohy a průběhu vodních toků

V úvodu metodické části byla vysvětlena důležitost určení přesné polohy vodního toku s vodopádem. Poslouží jednak pro doplnění vizualizací a také je nezbytná pro konstrukci podélných profilů. Použita byla posloupnost několika funkcí, které software nabízí v kombinaci s manuálními korekcemi. Dále nastíněný postup byl aplikován nad vytvořenými rastrovými DMR

1. Vyplnění sníženin v rastrovém modelu

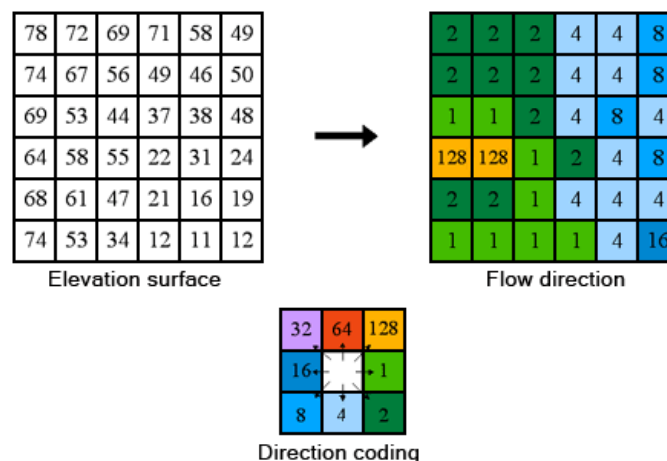
Při generování DMR dochází ke vzniku terénních depresí (nebo elevací), které vytváří v modelu bezodtoké oblasti a způsobují přerušování říční sítě. Odstranit je a zajistit tím spojitost rastru umožňuje funkce *Fill* (*Spatial Analyst Tools*). Na obr. 12 je ukázáno, jak tato funkce pracuje.



Obr. 12. Funkce *Fill* (ESRI, 2016)

2. Výpočet rastru směrů odtoku z buňky

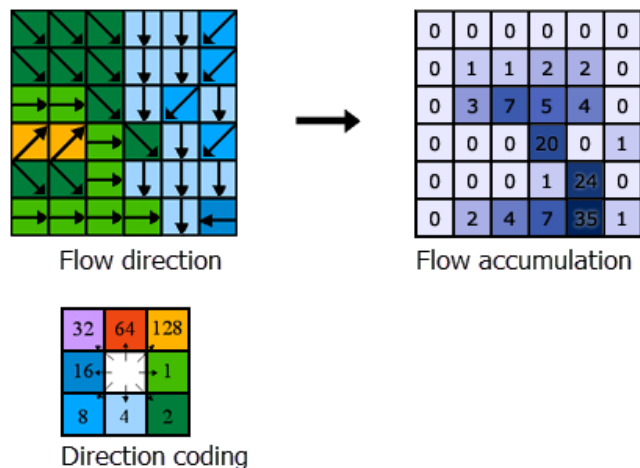
Funkce *Flow Direction* (*Spatial Analyst Tools*) spočítá pro každou buňku vstupního rastru směr odtoku z ní. Pro buňku je hodnoceno její okolí, tedy osm sousedních buněk. Algoritmus hledá, kterým z osmi potenciálních směrů voda odtéká tak, že porovnává sklony mezi buňkami a vybere ten nejvyšší. Aby byl výpočet sklonu korektní, nehodnotí se prostý rozdíl nadmořských výšek sousedních buněk, ale zohledňuje se i vzdáleností jejich středů (1 u buněk dotýkajících se hranou, $\sqrt{2}$ u dotýkajících se rohem) (ESRI, 2016). Takto je každé z buněk přiřazena celočíselná hodnota, reprezentující jeden z osmi směrů (viz obr. 13).



Obr. 13. Funkce *Flow Direction* (ESRI, 2016)

3. Výpočet rastru akumulace vody

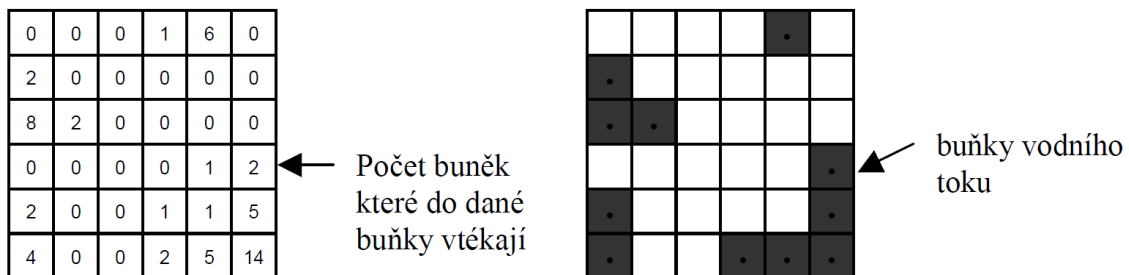
Funkce *Flow Accumulation* (*Spatial Analyst Tools*) vytvoří pomocí rastru směrů odtoků rastru akumulace vody. Výpočet probíhá tak, že je pro každou buňku nově vznikajícího rastru zjišťováno, kolik buněk rastru směrů odtoků do ní vtéká (viz obr. 14). Čím je hodnota buňky ve výsledném rastru vyšší, tím více vody do ní přitéká, přesněji řečeno – je sbírána z větší plochy (v případě, že nezohledňujeme váhy jednotlivých buněk).



Obr. 14. Funkce *Flow Accumulation* (ESRI, 2016)

4. Prahování a odvození rastru vodních toků

Tento krok již vyžadoval uživatelský zásah, na rozdíl od prvních tří, které byly zcela automatické. Prahováním je myšleno rozdělení hodnot v rastru akumulace vody do dvou intervalů podle stanovené, prahové hodnoty (Jedlička, Mentlík, 2002). Cílem je rozhodnout, která buňka bude považována za vodní tok a která nikoli, a to na základě určení minimálního množství dalších buněk, které do ní přitékají (viz obr. 15).



Obr. 15. Rastr akumulace vody a odvozený rastr vodních toků s prahovou hodnotou 2 (Jedlička, Mentlík, 2002)

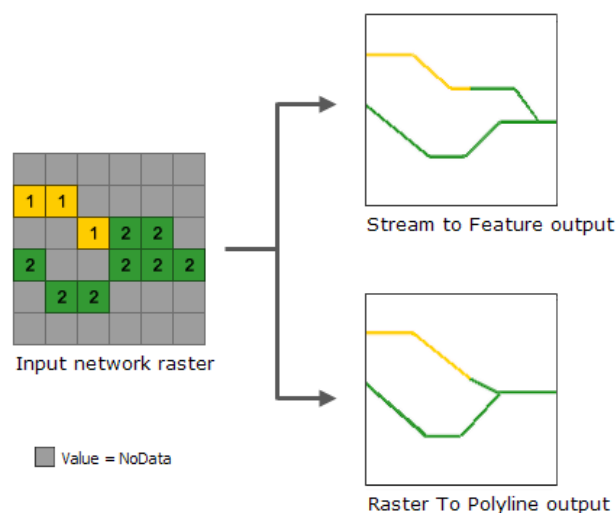
Hodnota tohoto prahu je u každého rastru zcela individuální a obvykle se stanovuje jako určité procento celkového počtu buněk v něm. Jestliže by bylo úkolem vytvořit co nejvěrnější model reálné říční sítě, jednalo by se spíše o otázku hydrologickou, než o geoinformatickou a ke stanovení konkrétního čísla by mohl napomoci například údaj o specifickém odtoku zájmového území. Pro účely této práce bylo ale zcela postačující stanovit hodnotu tak, aby jako vodní tok byly určeny pixely (buňky), které „protékají“ příslušným vodopádem (a také v blízkém prostoru nad a pod ním).

Při zpracování bylo takto posuzováno více než 120 rastrů (úpravou symbologie *rastru akumulace vody*) a minimální hodnota buňky, považované za vodní tok, se obvykle pohybovala mezi 5 a 15 % ve srovnání s buňkou o nejvyšší hodnotě celého rastru.

Po rozhodnutí o hodnotě prahu následovalo vytvoření *rastru vodních toků* pomocí funkce *Reclassify (Spatial Analyst Tools* nebo *3D Analyst Tools*). Tato funkce umožňuje měnit hodnoty buněk na alternativní za použití řady metod (ESRI, 2016). V tomto případě reklasifikace znamenala, že intervalu buněk určených jako vodní tok byla přiřazena hodnota 1 a zbytku 0. Buňky ve výsledném rastru tak nabývaly pouze dvou hodnot.

5. Vytvoření vektorové vrstvy vodních toků

Závěrečným krokem bylo převedení rastru vodních toků do vektorové podoby využitím funkce *Stream To Feature (Spatial Analyst Tools)*. Algoritmus vytvoří vektorové linie v místech výskytu buněk *rastru vodních toků*, které mají hodnotu rovnu 1. Jako druhý vstup do funkce je požadován *rastr směrů odtoku*. Alternativu tohoto způsobu vektorizace představuje použití funkce *Raster to Polyline (Conversion Tools)*, pro které je typická větší míra generalizace v místech napojování linií (viz obr. 16).



Obr. 16. Porovnání funkce *Stream To Feature* a *Raster to Polyline* (ESRI, 2016)

Nově vytvořené vrstvy byly na závěr upraveny v editoru – vymazání nepotřebných vodních toků a ve výjimečných případech spojení více linií v jednu (pokud byl tok s vodopádem přerušen přítokem v jeho bezprostřední blízkosti).

Aplikování popsané posloupnosti na všechny vytvořené DMR (s různými velikostmi buněk) mělo za následek vznik pěti více či méně rozdílných linií, procházejících každým vodopádem a reprezentujících polohu vodního toku.

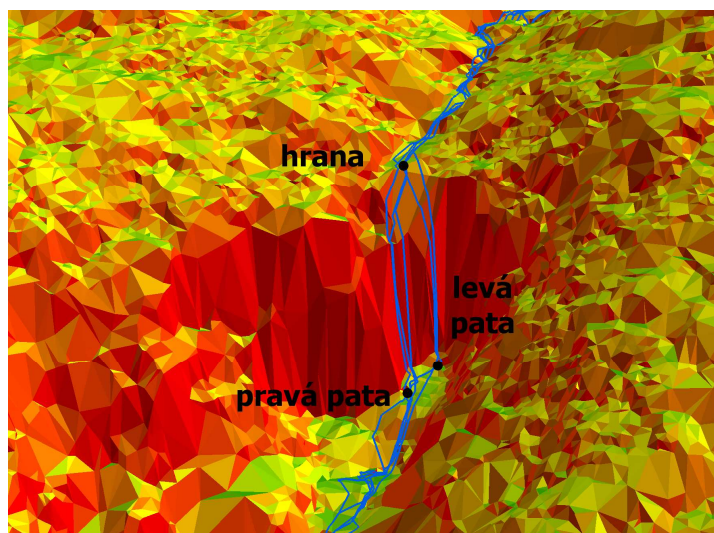
Pro zrychlení celého procesu se nabízí použití nástroje *ModelBuilder*, k čemuž ale nakonec nedošlo z důvodu nutnosti individuálního stanovení prahové hodnoty ve čtvrtém kroku, a to na základě vizuální kontroly *rastru akumulace vody*.

4.5 Vymezení přepadových hran a pat vodopádu

Určení přepadových hran a pat vodopádů bylo klíčovým a nejnáročnějším bodem celého postupu. Problém s jejich přesným označením často nastává i při terénním měření reálného vodopádu, neboť přepadové hrany mohou být nejednoznačné, s pozvolným náběhem a úpatní tůň/vývařiště nemusí vůbec existovat (voda např. mizí v ostrohranných sutích). Proto bylo při jejich lokalizování použito maximální množství zdrojů, ve snaze dosáhnout nejpřesnějších možných výsledků. Jednalo se o pět zdrojů, ze kterých byly, s ohledem na cíl práce, zohledňovány nejvíce první dva:

- Vizualizace rastrových DMR – především *sklon svahů*, doplněný o vytvořené liniové vrstvy *polohy a průběhu vodních toků*
- *3D projekci TIN* v prostředí ArcScene – barvy jednotlivých trojúhelníků reprezentovaly *sklon svahu*; doplněno o *vrstevnice* a vytvořené liniové vrstvy *polohy a průběhu vodních toků*
- Informace z článků dr. Pilouse
- Dostupné fotografie
- Ortofota

Během procesu lokalizace byla vytvářena nová bodová vrstva, do níž se zanášely polohy jednotlivých přepadových hran a pat vodopádů. Atributová tabulka obsahovala tři sloupce, pro pozdější identifikaci objektů při výpočtu: *jméno vodopádu*, *druh objektu* (hrana/pata) a *poznámka*. Třetí sloupec se uplatnil u „složitějších“ vodopádů, kde nedostačovalo pouhé vymezení jedné hrany a jedné paty. Příkladem může být Modrodolský vodopád, který má ukloněné úpatí a díky tomu nestejnou výšku v celé své šířce (viz obr. 17). U vodopádových soustav byla situace obdobná, neboť se přeměřovaly i jednotlivé stupně celé soustavy. Na 28 vybraných vodopádech bylo takto označeno celkem 106 přepadových hran a pat.



Obr. 17. Modrodolský vodopád – 3D pohled

4.6 Plocha povodí vodopádu

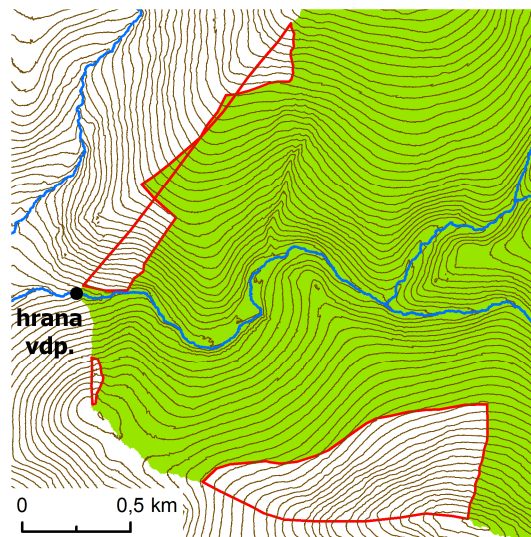
Metodika výpočtu plochy povodí byla v prvních třech krocích totožná s postupem při *detekci polohy a průběhu vodních toků*. Rozdíl spočíval pouze ve výběru vstupních dat (viz kapitola 4.1.2). Na připravené rastrové DMR se použily hydrologické nástroje *Fill*, *Flow Direction* a *Flow Accumulation* (vše *Spatial Analyst Tools*) v tomto pořadí. Funkce *Flow Accumulation* generuje rastr, kde hodnota každé buňky znamená součet počtu buněk, ze kterých do ní přitéká voda. Využitím této vlastnosti, v kombinaci se znalostí velikosti plochy buňky (v tomto případě 1 m²), lze relativně snadno zjistit plochu povodí (v m²) libovolného bodu rastru. Rozloha povodí vodopádu je rovna hodnotě pixelu (buňky) v *rastru akumulace vody*, který svou polohou odpovídá detekované přepadové hraně.

V úvodu metodické části bylo zmíněno, že výpočet plochy povodí vyžaduje pozici rozvodnice. Popsané řešení ji sice zdánlivě přehlíží, ale není tomu tak. *Rastr směrů odtoku z buňky*, který ve výpočtu figuruje, v sobě tuto informaci jednoznačně má, což vychází z principu, jak funkce *Flow Direction* pracuje (viz kap. 4.4).

Aby navržený postup skutečně fungoval, musí použitý DMR pokrývat naprosto celou plochu povodí. To může být při letmé vizuální kontrole rozlehlejších povodí obtížně odhadnutelné. Tento kontrolní proces výrazně usnadní funkce *Watershed* (*Spatial Analyst Tools*), která pro vybranou buňku vygeneruje povodí, tedy území, z něž voda do daného bodu doteče. Nutný mezikrok je příprava další rastrové vrstvy, která definuje buňky, pro něž chceme výpočet provádět. K tomu slouží funkce *Snap Pour Point* (*Spatial Analyst Tools*), požadující na vstupu *rastr akumulace vody* a bodovou vrstvu přepadových hran vodopádů. Tato funkce vytváří rastr, ve kterém jsou jednoznačně identifikovány pixely (každý má jedinečnou hodnotu *value*), jejichž pozice je co nejbližší bodům ze vstupní vektorové vrstvy a zároveň mají vysokou hodnotu v *rastru akumulace vody* (ESRI, 2016). Výstupní rastr má totožné rozlišení jako

rastr akumulace vody a všechny ostatní buňky, s výjimkou těch identifikovaných, nenesou žádnou informaci. Do již zmíněné funkce *Watershed* pak vstupuje výsledný rastr ze *Snap Pour Point* a *rastr směrů odtoku z buňky*.

Problém pro tento automatický a poměrně rychlý způsob zjištění plochy povodí představují antropogenní prvky (zejména silnice a lesní cesty). Ty mohou při výpočtu vytvářet neexistující vodní toky a měnit skutečné hranice i rozlohy povodí tím, že odvádějí vodu do povodí sousedních. Na takto ovlivněných lokalitách bylo nutné manuálně vytvořit *polygony oprav* a jejich rozlohy následně přičíst nebo odečíst od automaticky vypočtené plochy pro příslušný vodopád. Na obrázku 18 je zachycena tato situace na části povodí Mumlavského vodopádu.



Obr. 18. Chyby v automatickém výpočtu plochy povodí

Poznámka: zelená – automaticky odvozené povodí, červená – polygony oprav; ZIV vrstevnic 10 m

4.7 Určení polohy, výpočet výšky a plochy povodí, konstrukce podélného profilu

V této fázi byla již všechna potřebná data připravena a následoval výpočet charakteristik.

Určení polohy

Z vytvořené vrstvy hran a pat vodopádů byly vyexportovány body, reprezentující přepadové hrany. U vodopádových soustav s větším množstvím přepadových hran se obvykle volila hrana prvního (nejvýše položeného) stupně nebo hrana stupně nejvyššího (viz tab. 3). Následovalo doplnění souřadnic polohy vodopádu do atributové tabulky pomocí funkce *Add XY Coordinates (Data Management Tools)*.

Výpočet výšky

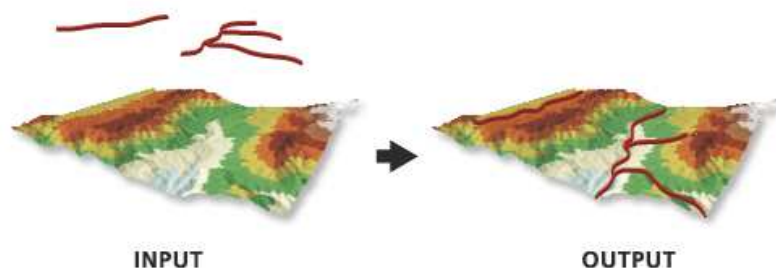
Funkce *Extract Values to Points (Spatial Analyst Tools)* zapisuje do atributové tabulky bodové vrstvy hodnoty polohově odpovídajících pixelů v rastru. Do vrstvy obsahující paty a hrany vodopádů byly tímto způsobem importovány hodnoty z vytvořených rastrových DMR s nejvyšším rozlišením (10 cm). Po vyexportování takto doplněné atributové tabulky proběhlo závěrečné párování odpovídajících si pat a hran, stejně jako výpočet výšek, v programu Microsoft Excel.

Výpočet plochy povodí

Použitím funkce *Extract Values to Points* byla atributová tabulka vrstvy přepadových hran doplněna o hodnoty *rastru akumulace vody* a vyexportována. V programu Microsoft Excel proběhla korekce těchto hodnot přičtením nebo odečtením rozlohy odpovídajících objektů *polygonů oprav*.

Konstrukce podélného profilu

U šesti vodopádů, určených pro konstrukci podélného profilu (viz kapitola 3), byla vybrána linie představující průběh vodního toku a pomocí funkce *Interpolate Shape (3D Analyst Tools)* doplněna o informaci o nadmořských výškách v celé své délce. Tato funkce vytváří ze vstupní vektorové vrstvy (body, linie i polygony) tzv. *3D feature class* tím, že z DMR (rastrového, TIN nebo terrain dataset) do ní interpoluje z-hodnoty (ESRI, 2016).



Obr. 19. Funkce *Interpolate Shape* (ESRI, 2016)

Určitou výjimkou byl Pančavský vodopád, který má ve své spodní části stálé severní, ale také sezónní jižní rameno, které je protékané pouze při dostatku vody. Protože bylo žádoucí zobrazit v podélném profilu obě tato ramena, nebyla při jeho konstrukci použita jedna linie, jako u zbylé pětice vodopádů, ale dvě.

Nástrojem *3D Analyst – Profile Graph* byla data z vytvořených *3D feature class* vyexportována a konstrukce podélných profilů probíhala v softwaru Microsoft Excel.

5 Výsledky

Hlavním výsledkem práce jsou tabulky prezentující zjištěné charakteristiky vybraných krkonošských vodopádů a sestrojené podélné profily šesti z nich. Uváděné hodnoty byly získány s využitím výše popsaného postupu. Komentář k výsledkům je shrnut v následující kapitole.

5.1 Polohy vodopádů

Kapitola 2.3.1 definuje tento pojem jako polohu přepadové hrany. Vodopádové soustavy mají takových hran více, a proto tabulka s výsledky (viz tab. 3) vždy uvádí, které místo je za polohu příslušného vodopádu považováno. Použit je souřadnicový systém UTM zóna 33.

Zaměřené polohy jsou porovnávány se závěry bakalářské práce Pavly Pánové. Pánová (2013) se zabývá zjišťováním poloh vodopádů z dostupných zdrojů a na základě jejich množství a kvality vymezuje šest kategorií polohové přesnosti (viz tab. 2). Tento údaj je u každého vodopádu uveden a lze tak posoudit, nakolik jsou jeho prostorové souřadnice přesné.

<i>přesnost</i>	<i>zdroj</i>
0	kniha M. Janošky, články V. Pilouse
1	www.kudykam.com, www.zajimavamista.cz, cs.wikipedia.org, www.toulavakamera.ceskatelevize.cz
2	www.vodopady.info, www.geology.cz
3	ZABAGED, www.vodopady.info
4	ZABAGED, www.mapy.cz, www.vodopady.info
5	ZABAGED, www.mapy.cz, www.vodopady.info, vlastní měření

Tab. 2. Přehled použitých zdrojů polohových souřadnic (Pánová, 2013)

Při porovnávání zaznamenaných poloh zaujme především markantní rozdíl u Velkého vodopádu na Bílém Labi. Podle měření z dat LLS je umístěn o 269 m severovýchodněji, proti proudu řeky. Pilous (2009i) uvádí, že je tento vodopád vzdálen 125 m od ústí Černého potoka, což zcela souhlasí s nově zaměřenou polohou. Ortofota (KRNAP, 2012a) a (ČÚZK, 2017a) to rovněž potvrzují.

U ostatních vodopádů se takto velké odchylky již nevyskytují a rozdíly v polohách jsou obvykle v řádu metrů až desítek metrů. Za zmínku stojí ještě dva vodopády. Více než padesátimetrová vzdálenost u Dvorského je s vysokou pravděpodobností způsobena tím, že se jedná o vodopádovou soustavu (navíc poměrně dlouhou). Jak bylo již popsáno, soustava má mnoho přepadových hran a z dat Pánové (2013) není zřejmé, která z nich je jako poloha vodopádu míněna. Tím druhým je Malý Labský vodopád. Všechny vodopády, jejichž udávaná přesnost je 4, mají rozdíly v polohách maximálně 11 metrů, zatímco Malý Labský skoro 40 m. I v tomto případě se jedná o soustavu, která má dva výrazné vodopádové stupně. Z dat LLS byl pro určení polohy vybrán střed přepadové hrany nejvyššího stupně, podle Pilouse

(2009c) Malý Labský vodopád v užším slova smyslu. Poloha, kterou udává Pánová (2013) se nachází mezi oběma nejvýraznějšími stupni, blíže k tomu spodnímu (nižšímu).

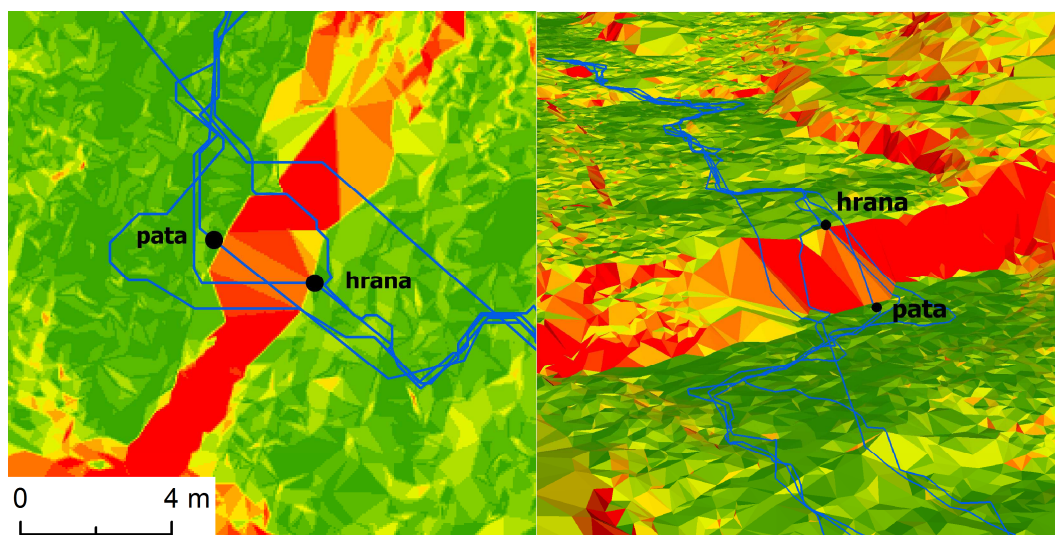
Průměrná hodnota vzdálenosti mezi nově zjištěnými a známými polohami je 27,4 m, vynecháme-li z výpočtu zjevně chybný údaj o Velkém vodopádu, je to 17,7 m.

5.2 Výšky vodopádů

Měření výšek vycházelo z definovaných poloh přepadových hran a pat jednotlivých vodopádů a jejich nadmořských výšek. Úskalí výběru těchto míst jsou detailně popsána v diskuzní části práce (kap. 6.2), následující kapitola představuje komentář ke změřeným hodnotám.

Výšky vodopádů shrnuje tabulka 4. Jestliže se jedná o vodopádovou soustavu a podařilo se změřit i její dílčí stupně, jsou uvedeny rovněž (např. Pančavský vodopád). Některé vodopády mají kvůli ukloněné hraně nebo patě nestejnou výšku v celém svém profilu (Modrodolský, Velký...), a proto je u nich rozlišena na pravou a levou část. Naměřené výšky je možné porovnat s údaji ze seriálu článků dr. Pilouse.

Měření potvrdila pozici Pančavského vodopádu, jako nejvyššího v Krkonoších (a také v ČR). Celková výška 148,3 m se velmi blíží údaji 148 m, který uvádí Pilous (2009d). Započítáme-li sezónní jižní rameno, dostaneme se na 160,2 m. Dle Pilouse (2009d) je to 162 m. Opačným případem jsou velmi nízké vodopády, které ve výběru rovněž figurují a měly ukázat limity dat LLS. Vhodným příkladem je vodopád Velký Skok s udávanou výškou 2-2,1 m (Pilous, 2009i). Z obr. 20 je zřetelné, že se jej podařilo identifikovat i určit polohu přepadové hrany a paty. Naměřená výška z dat LLS byla 2,12 m.



Obr. 20. Vodopád Velký Skok

Poznámka: vlevo rastr sklonu svahů; vpravo 3D pohled

Postupnou kontrolou a porovnáváním výšek měřených vodopádů lze vypořádat, že většina zjištěných hodnot se od měření dr. Pilouse zásadně neliší. To ukazuje na velkou preciznost, se kterou byla měření v průběhu 80. let provedena.

Výraznější rozdíly ve výškách jednotlivých vodopádů lze ale také najít. Při hledání možných příčin je nutné zohlednit několik faktorů. Vodopád není neměnný objekt a jeho tvar i rozměry se v čase vyvíjí. Dynamické přírodní procesy (eroze materiálu nebo jeho akumulace) na něj neustále působí a přetváří jeho podobu. Během cca 30 let, které dělí měření dr. Pilouse a realizaci LLS, proběhlo v zájmovém území několik povodní, jež mohly výšky vodopádů pozměnit. Vyloučit zcela nelze ani chyby měření dr. Pilouse a také nesprávné určení polohy přepadových hran a pat vodopádů v této práci. Tato problematika je blíže popsána v kapitole 6.2.

5.3 Plochy povodí

Hodnota plochy povodí byla u každého vodopádu počítána pro stejnou přepadovou hranu, která je určující pro stanovení jeho polohy (viz kap. 5.1). Údaj, vycházející z výpočtu *rastru akumulace vody*, bylo nutné u 21 vodopádů korigovat, neboť byl zkreslen vlivem antropogenních prvků (silnice a lesní cesty).

Kompletní výčet ploch povodí shrnuje tabulka 5, která obsahuje také hodnoty automatického výpočtu a rozlohy polygonů oprav. Při porovnání opravených hodnot ploch povodí s těmi spočítanými automaticky (pouze z *rastru akumulace vody*), lze pozorovat, že maximální rozdíly se pohybují v řádu jednotek procent. Relativně nejvíce byla výpočtem podhodnocena plocha povodí Pudlavského vodopádu (o 8,72 %) a naopak nadhodnocena u Pančavského (o 6,99 %). V absolutních číslech byl nejvyšší rozdíl u Mumlavského vodopádu (cca 0,656 km²), což je ale dáno jeho jednoznačně největší celkovou plochou povodí, téměř 17 km². Průměrnou hodnotu relativního rozdílu 2,27 % lze označit za naprosto uspokojivou. Proto můžeme i výsledky, které jsou přímo odvozené z *rastru akumulace vody*, využít pro dobrý odhad celkové plochy povodí.

Jestliže porovnáme naměřené hodnoty s údaji dr. Pilouse, je opět nutné konstatovat, že je ve svých výpočtech velmi přesný. Absolutní rozdíly jsou do 0,3 km². Jedinou výjimku v tomto směru představuje Mumlavský vodopád. Jak již bylo zmíněno, jedná se o nejrozlehlejší povodí ve výběru, což může být jedna z příčin, ale i přes to je hodnota rozdílu 2 km² poměrně vysoká. Vymezení průběhu rozvodnice bylo z tohoto důvodu ještě jednou překontrolováno, ale ani tato revize žádné pochybení při tvorbě *polygonů oprav* neodhalila. Příčinu nezanedbatelného rozdílu plochy povodí tohoto vodopádu se bohužel objasnit nepodařilo.

Je důležité doplnit, že všechny údaje o plochách povodí, které byly pomocí výše popsané metodiky změřeny, se vztahují k povodím orografickým (viz kap. 2.3.3). Výpočty vychází z digitálních modelů reliéfu a není tedy zohledněno geologické podloží. Odtok podzemní vody a průběh hydrogeologických

rozvodnic proto může být odlišný. Tento fakt má větší význam pro vodopády s velmi malou plochou povodí (např. Mechový), neboť změna průběhu rozvodnice (a tím i plochy) může znatelně ovlivnit jejich průtok. S rostoucí plochou povodí je relativní rozdíl mezi plochami hydrogeologického a orografického povodí zanedbatelný.

5.4 Podélné profily

Z linií představující průběh vodního toku byl pro šest vybraných vodopádů zkonstruován jejich podélný profil. Ve všech případech se jedná o významné delší vodopády nebo vodopádové soustavy. Podélné profily se řadí mezi základní morfometrické nástroje, které umožňují analyzovat sklonové poměry průběhu vodopádu.

Příloha 2 obsahuje profily Pančavského a Dolního Úpského vodopádu. Profil Pančavského vodopádu se pod patou třetího stupně větví a zobrazuje průběh stálého ramene se 4. stupněm i sezónně protékaného jižního ramene. Proto jsou u výšky vodopádu dvě hodnoty. U cca 150 m dlouhé soustavy Dolních Úpských vodopádů se podařilo identifikovat její začátek i konec a také dva výrazné stupně přibližně v polovině její délky. Zatímco nejstrmější a nejvyšší stupeň soustavy (označen jako 1. stupeň) je i z profilu velmi dobře zřetelný, hrana nižšího (3,2 m) stupně, která se nachází 10 metrů dále po proudu, příliš nevyniká a vymezit ji pouze na základě podélného profilu by bylo dosti obtížné.

Dvorský a Pudlavský vodopád (viz příloha 3) mají mnoho společných rysů. V obou případech se jedná o dlouhé kaskádové soustavy, začínající peřejemi na jen mírně ukloněných skalních plotnách, a proto je jejich přesný začátek problematický (Pilous, 2009g). Tato místa se bohužel ani u jednoho z nich nepodařilo uspokojivě lokalizovat, ale jejich hlavní stupně ano. Podélné profily byly záměrně konstruovány pro celou soustavu, přestože není vyznačený její přesný začátek a v obou případech jsou pro zvýšení názornosti 2× převýšeny. Jednoznačně lze rozeznat tři stupně Dvorského vodopádu, hlavní stupeň Pudlavského, podle Pilouse (2009f) Pudlavský vodopád v užším smyslu, a také menší (3,9 m) stupeň nad ním.

Z podélných profilů Hančova vodopádu a v ČR nejvýše položeného Horního Úpského vodopádu je viditelné, že ani zde nebylo určení přepadových hran jednoduché (viz příloha 4). Tato problematika je popsána v kapitole 6.2.

název vodopádu	souřadnice [UTM]		dosud známé souřadnice [UTM]		přesnost známých souřadnic	rozdíl [m]	poznámka
	x	y	x	y			
Červený	543146,8	5622145,1	543144,3	5622143,6	3	2,9	hrana vyššího, druhého vdp.
Dlouhý	545112,8	5621232,7	545081,4	5621244,0	2	33,4	hrana prvního stupně
Dolní Úpský	551307,5	5620121,5	551306,4	5620125,0	4	3,7	hrana nejvyššího stupně
Doubravův	555267,2	5620507,1	555280,8	5620503,9	3	14,0	hrana prvního stupně
Dvorský	541181,9	5622500,2	541175,2	5622552,3	3	52,5	hrana nejvyššího stupně
Hančův	538595,0	5623205,0	538604,0	5623212,3	4	11,6	
Horní Úpský	550580,6	5620710,5	550589,4	5620710,2	4	8,8	
Huťský	535075,6	5620767,9	535081,7	5620770,6	3	6,7	začátek celé soustavy
Jeřabový	553920,5	5620328,8	553916,1	5620325,7	3	5,4	
Koulový	553134,9	5619869,9	553131,7	5619877,1	3	8,0	hrana prvního stupně
Kozelský	536486,1	5620015,0	536485,4	5620058,8	1	43,7	
Křivý	538600,9	5623291,0	neuvádí	neuvádí	neuvádí	-	
Labský	538675,1	5624499,5	538674,8	5624499,6	4	0,3	
Luční	547336,7	5619447,0	547334,2	5619433,9	0	13,3	
Malý Labský	540232,5	5622714,4	540256,1	5622682,9	4	39,3	hrana nejvyššího stupně
Malý Navorský	538728,4	5624116,0	neuvádí	neuvádí	neuvádí	-	
Mechový	548960,6	5618729,4	548999,0	5618721,8	0	39,2	
Modrodolský	548985,9	5618730,5	549019,9	5618723,5	1	34,8	
Mumlavský	531973,7	5624419,9	531966,1	5624422,1	4	7,9	
Pančavský	538453,8	5623399,8	538444,2	5623395,2	4	10,6	
Plotnový	545376,0	5621204,7	545358,4	5621206,4	3	17,7	
Pramenný	547360,5	5619435,1	547356,5	5619432,8	1	4,6	
Pudlavský	540065,1	5623180,0	540062,7	5623187,0	3	7,3	hrana 1. stupně (výška 4 m)
Soví	555785,2	5621022,2	555791,6	5621002,6	3	20,6	
Tetřeví	545799,9	5619725,8	545782,9	5619706,3	1	25,8	
Velký	543409,8	5622006,4	543238,4	5621799,0	2	269,1	
Velký Skok	544266,3	5621921,3	544272,7	5621922,2	2	6,4	
Závojevý	555494,3	5620828,1	555518,0	5620820,0	3	25,1	

Tab. 3. Polohy vodopádů

Zdroj porovnávaných souřadnic a jejich přesností: Pánová (2013)

název	výška [m]							výšky podle dr. Pilouse [m]	
	vodopádu nebo soustavy	1. stupeň		2. stupeň		3. stupeň			4. stupeň
		levá	pravá	levá	pravá	levá	pravá		
Červený	11,29	3,57		5,24				11,2 (3,6 a 5,6)	
Dlouhý		2,04	2,76	2,39	3,51	1,85	1,52	2,9; 3,0; 2,0; 1,8	
Dolní Úpský	46,00	6,64		3,18				45 (7; neuvádí)	
Doubravův	9,81	2,77		1,60		3,00		8,4 (3,2; 2,0; 2,5)	
Dvorský		8,46		5,75		8,41	8,44	10,0; 5,2-5,6; 8,5-9,5	
Hančův	77,81							cca 75	
Horní Úpský	129,29							129	
Huťský	17,18	5,68						16,6 (6,8)	
Jeřábový	3,03							3,3	
Koulový		3,83		1,94				4,8; 1,1	
Kozelský	3,17							3,5	
Křivý	20,46							cca 25	
Labský	31,97							34,5	
Luční	11,53							11,7	
Malý Labský		5,03	4,39	2,66				5,3; 3-3,5	
Malý Navorský	27,61							24,5	
Mechový	5,28 (4,13)							3,9	
Modrodolský		9,20	10,25					9-10,5	
Mumlavský	8,34							8,5-9,2	
Pančavský	148,28 (160,16)	38,26		36,44		22,78	20,36	148;162 (36; 39; 23; 20)	
Plotnový	4,69							5,3	
Pramenný	9,27							7,8	
Pudlavský		3,94		24,14	31,15			4,0; 30-33	
Soví	4,27							4,1-4,3	
Tetřeví	32,27							32	
Velký		4,26	4,23					3,8-4,0	
Velký Skok	2,12							2,0-2,1	
Závojevý	8,10							8,2	

Tab. 4. Výšky vodopádů

Zdroje porovnávaných výšek: Pilous (2009b-2009j, 2010a-2010e, 2011a-2011f)

Poznámka: U dlouhých vodopádových soustav (Dvorský vodopád a Pudlavský vodopád) je nutné interpretovat pořadí dílčích stupňů poněkud volněji. Měření byly hlavní vodopádové stupně s nejvyšším sklonem, a proto označení „1. stupeň“ nezbytně neznamená, že se jedná o ten úplně první (pravděpodobně velmi nevýrazný) v celé soustavě, ale první z měřených stupňů. Totéž platí pro Huťský vodopád, kde je výškou 1. stupně míněna výška hlavního, a jediného výrazného, stupně.

Poznámka II: Dvě udávané výšky Pančavského vodopádu jsou vysvětleny v kapitole 5.2, Mechového v kapitole 6.2

<i>název vodopádu</i>	<i>automatický výpočet plochy povodí [m²]</i>	<i>nutnost polygonů oprav</i>	<i>oprava [m²]</i>	<i>rozdíl automat. × po opravě [%]</i>	<i>plocha povodí [km²]</i>	<i>hodnoty podle dr. Pilouse [km²]</i>
Červený	3517522	ano	42044	1,20	3,560	3,5
Dlouhý	10591980	ano	63421	0,60	10,655	neuvádí
Dolní Úpský	1989184	ano	56108	2,82	2,045	1,9
Doubravův	339245	ano	-7062	-2,08	0,332	0,4
Dvorský	1863215	ano	-72987	-3,92	1,790	1,8
Hančův	104482	ano	7544	7,22	0,112	neuvádí
Horní Úpský	329774	ne	0	0	0,330	0,3
Huťský	1089715	ano	87082	7,99	1,177	1,2
Jeřabový	1740846	ano	14062	0,81	1,755	neuvádí
Koulový	875947	ne	0	0	0,876	0,8
Kozelský	2660801	ano	-75943	-2,85	2,585	2,5
Křivý	48077	ne	0	0	0,048	neuvádí
Labský	1264750	ano	28636	2,26	1,293	1
Luční	97036	ne	0	0	0,097	0,08
Malý Labský	7549809	ano	34955	0,46	7,585	neuvádí
Malý Navorský	84553	ne	0	0	0,085	neuvádí
Mechový	83159	ano	4584	5,51	0,088	neuvádí
Modrodolský	149262	ano	-122	-0,08	0,149	0,1
Mumlavský	16253870	ano	656152	4,04	16,910	19
Pančavský	856675	ano	-59839	-6,99	0,797	0,7
Plotnový	10389114	ano	11397	0,11	10,401	neuvádí
Pramenný	361553	ne	0	0	0,362	0,25
Pudlavský	836752	ano	72987	8,72	0,910	1,2
Soví	472178	ano	7031	1,49	0,479	0,6
Tetřeví	265427	ne	0	0	0,265	0,3
Velký	15729811	ano	85870	0,55	15,816	neuvádí
Velký Skok	12655967	ano	-88792	-0,70	12,567	neuvádí
Závojevý	511103	ano	15755	3,08	0,527	0,7

Tab. 5. Plochy povodí vodopádů

Zdroje porovnávaných ploch povodí: Pilous (2009b-2009j, 2010a-2010e, 2011a-2011f)

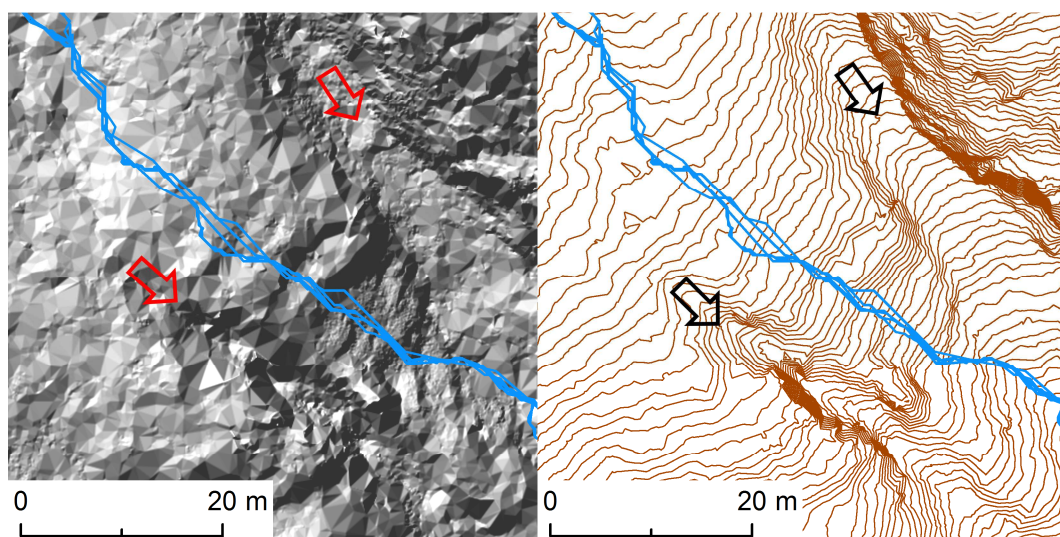
6 Diskuze

Následující kapitola komentuje dvě klíčové části metodiky práce a popisuje jejich silné a slabé stránky. Zmíněna jsou také úskalí, zjištěná při její aplikaci na konkrétní vodopády, a jejich řešení.

6.1 Detekce vodních toků

Detekce polohy a průběhu vodních toků byla důležitou částí celé metodiky. Postup se skládal z pěti jednotlivých navazujících kroků, vedoucích k vytvoření liniové vektorové vrstvy vodních toků, z rastrového DMR.

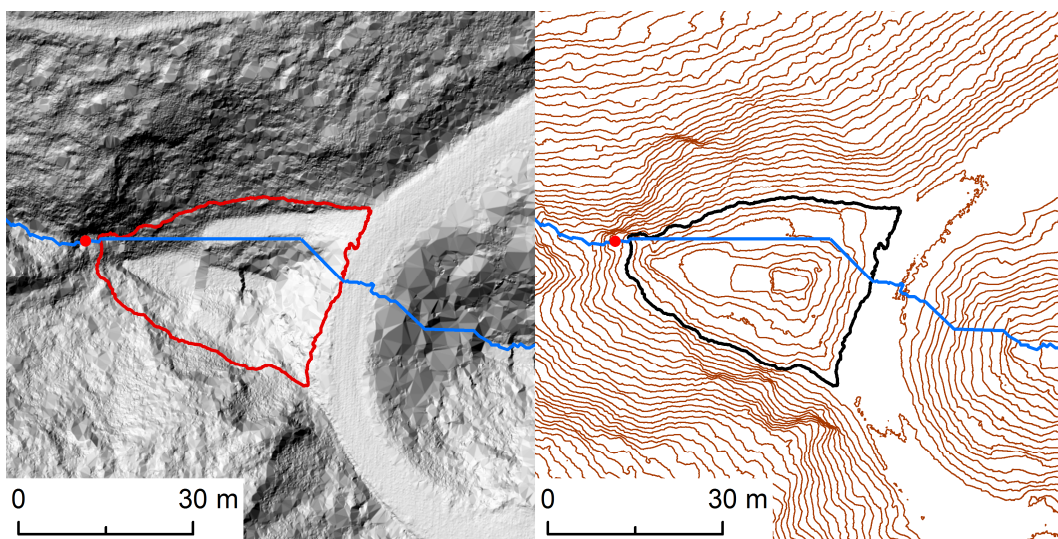
Ukázalo se, že proces generuje velmi kvalitní výsledky, vhodné i pro konstrukci podélného profilu vodopádu. Vodní toky byly bez problémů identifikovány nejen v místech výrazných a širokých říčních koryt, kterými je např. Bílé Labe nebo Mumlava, ale také v lokalitách, kde vodopád není oproti svému bezprostřednímu okolí vůbec zahloubený a je v úrovni okolního skalnatého svahu (např. Labský vodopád). Za nejnáročnější zkoušku celé metody lze považovat vymezení polohy vodních toků v oblasti Labských jam s periodicky protékanými vodopády. U všech testovaných případů byl vodní tok vymezen korektně. Asi nejkomplikovanější situaci představoval Malý Navorský ručej se stejnojmenným vodopádem, který je neobvyklý svou polohou, neboť nestéká v zahloubeném korytě, jako tomu obvykle bývá, ale naopak po mírně vypuklé skalní stěně, která je z obou stran ohraničena vidlicovitě se sbíhajícími zářezy Navorské rokle a Navorské průrvy (Pilous, 2009e). Jak je patrné z obr. 21, všechny modelované polohy toku, pro různé rozlišení rastrů, vedou skutečně mezi oběma zářezy a „správně“ do nich nestékají.



Obr. 21. Malý Navorský ručej

Poznámka: vlevo stínovaný reliéf (sklon osvětlení 60°), vpravo vrstevnice (ZIV 1 m); šipky naznačují očekávatelnou dráhu toku skrz okolní rokle

Poloha byla počítána pro 28 vodních toků s vodopády a pouze v jediném případě výpočet nezafungoval správně. Týkalo se to Doubravova potoka, těsně pod posledním stupněm měřeného vodopádu. Dle Pilouse (2011b) bývalo v tomto místě mělké kamenité vývažiště, které je ale pozměněné umělými úpravami. Dnes je zde kamenná protierozní přehrádka a pravý zvětralínový svah amfiteátru je uměle zpevněný drátokoši až k patě vodopádu, i když ten samotný úpravami poškozený není (Pilous, 2011b). Z obr. 22, na kterém je červeným bodem vyznačena pata posledního vodopádového stupně, je zřetelné, že modelovaná dráha vodního toku je až do tohoto místa přirozená a v souladu s průběhem vrstevnic, zatímco dále po proudu algoritmus vypočítal naprosto nereálný průběh toku. Ten připomíná tvarem lomenou úsečku a vůbec nerespektuje vrstevnice. Stejných výsledků bylo dosahováno bez ohledu na velikost buňky vstupního rastru DMR. Příčinou tohoto průběhu je použití funkce *Fill*, která na DMR vyplňuje terénní deprese. Z umělé protierozní nádrže voda odtéká propustkem pod nedalekou lesní cestou, a proto se celý prostor mezi touto cestou a patou vodopádu chová jako bezodtoká oblast. Ta je funkcí *Fill* zarovnána, což způsobuje neobvyklou trajektorii vodního toku v krátkém úseku, než se voda vrátí zpět do svého koryta. Měření na vodopádu tento jev neovlivnil, neboť nastal až pod jeho úpatím.



Obr. 22. Doubravův potok – detekce průběhu pod vodopádem

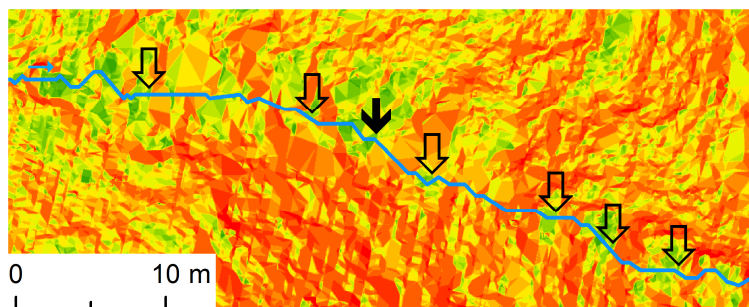
*Poznámka: vlevo stínovaný reliéf (sklon osvětlení 60°), vpravo vrstevnice (ZIV 1 m);
červený bod – pata vodopádu; označená vrstevnice – bezodtoká oblast*

6.2 Vymezení přepadových hran a pat vodopádů

Pro určování poloh hran a pat vodopádů byly využity zejména rastry sklonu svahů a 3D vizualizace v ArcScene (v obou případech s vyznačeným průběhem vodních toků). Cenné doplňující informace o konkrétní podobě hledaných míst poskytly také články dr. Pilouse z časopisu Krkonoše – Jizerské hory a dostupné fotografie.

V metodické části práce byla zmínka, že se jednalo o nejnáročnější bod celého postupu. Primárním důvodem obtíží je samotný charakter vodopádů na území Krkonoš. Jejich přepadové hrany jsou vesměs velmi pozvolné a úpatí má jen málokdy podobu jednoznačného vývařiště a voda častěji mizí v kamenitých nánosech (mnohdy ještě ukloněných). Přesné určení bodu, kde vodopád začíná a kde končí, je proto dosti subjektivní a zvažíme-li, že je to nejednoznačné už u samotného vodopádu (ve smyslu reálného objektu v přírodě), je řešení stejného úkolu nad digitálním modelem reliéfu mnohdy ještě komplikovanější.

Lokalizace pat vodopádů rozhodně nebyla v některých situacích jednoduchá, ale větší problémy nastávaly při „hledání“ nástupních hran. Typickým příkladem složitého vymezení polohy přepadové hrany je Horní Úpský vodopád. Pilous (2010c) hodnotí horní začátek vodopádu jako obtížně stanovitelný a dodává, že se subjektivní pojetí může lišit o celé metry. Při vizualizaci pomocí rastru sklonu svahů je patrných hned několik míst, kde skokově vzroste v korytě toku sklon a situace připomíná kaskádu (nebo přejevou kaskádu) s mnoha stupni a obtížnou volbou přesného začátku. Na obr. 23 jsou tato místa naznačena.

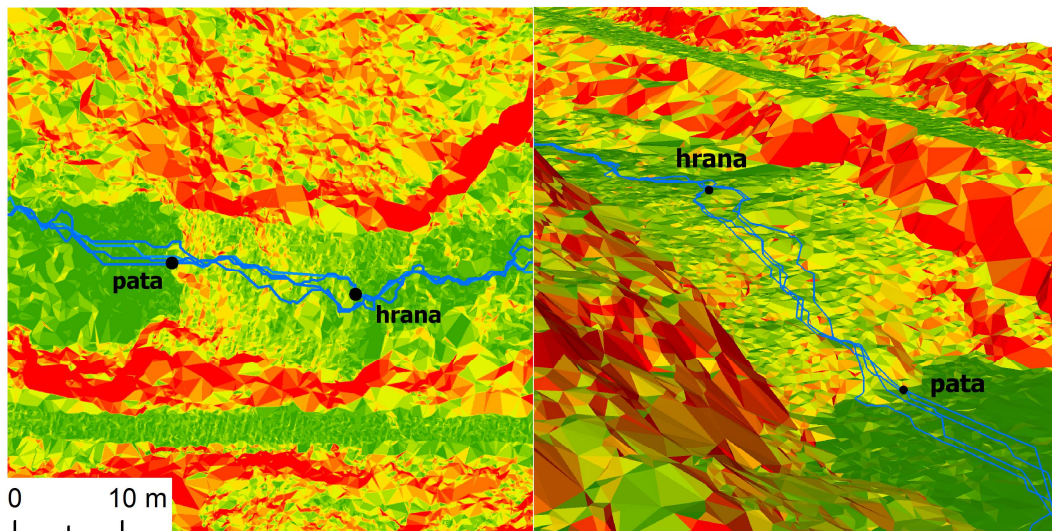


Obr. 23. Přepadová hrana Horního Úpského vodopádu – rastr sklonu svahů

Poznámka: plná šipka symbolizuje vybranou polohu začátku vodopádu, ostatní šipky alternativní umístění

Druhým typem sporných situací jsou vodopády s velmi pozvolným náběhem horní hrany a malým sklonem. Exemplární je v tomto směru Plotnový vodopád na Bílém Labi. Jak lze vyčíst z obr. 24, zaměřit patu nepředstavovalo větší potíže, naproti tomu poloha hrany se musela do jisté míry odhadnout. Na témže obrázku jsou pro zajímavost ponechány i vypočtené dráhy vodních toků pro všechny použité velikosti rastrů. Zobrazení těchto linií obvykle velmi napomohlo při lokalizaci hran a pat vodopádu, ale vyskytlo se i několik případů, kdy bylo říční koryto naprosto jednoznačné. U těchto situací nebyla

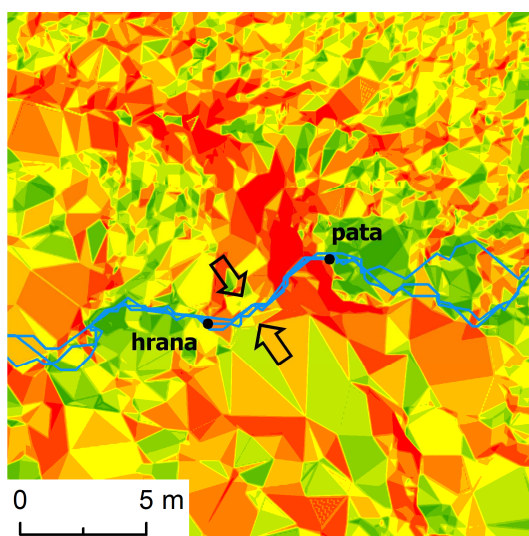
hrana/pata vždy striktně umístována přímo na linii detekovaného vodního toku, protože bylo zřejmé, že řeka neprotéká pouze po takto úzké lince. Podle očekávání se jednalo o vodopády v nižších nadmořských výškách, se širším říčním korytem, větší plochou povodí a průtokem (Mumlavský, Malý Labský a všechny čtyři na Bílém Labi).



Obr. 24. Plotový vodopád – rastr sklonu svahů a 3D pohled

Obdobné situace, které vycházejí z geomorfologických vlastností jednotlivých vodopádů, bylo nutné ve větší či menší míře řešit také u dalších vodopádů (Hančův, jednotlivé stupně Pančavského...).

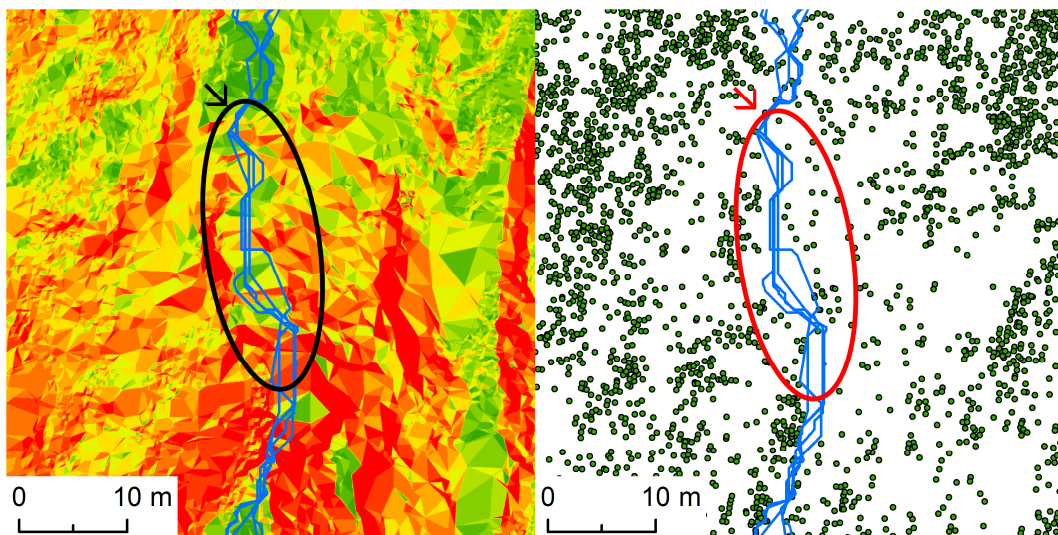
Tabulka 4 uvádí u Mechového vodopádu dvě hodnoty jeho výšky. Ani zde nebylo stanovení polohy přepadové hrany zcela jednoznačné. V úseku, který je na obr. 25 označený šipkami, je na dráze toku viditelný pokles sklonu. Nachází-li se přepadová hrana v tomto místě, je skutečná výška vodopádu o 1,15 m nižší.



Obr. 25. Mechový vodopád – rastr sklonu svahů

V některých případech stav ještě zkomplikovala snížená kvalita vstupních dat. Kapitola 4.1 rozebírá průměrnou hustotu klasifikovaného bodového mračka (5 bodů/m²; pro 53 použitých čtverců 6,66 bodů/m²). Nerovnoměrné rozložení bodů, které je dáno konstrukcí skeneru a samozřejmě také topografií terénu, způsobuje lokální rozdíly v míře dostupných detailů. U použitých dat klesala hustota bodů s rostoucím sklonem a mírou zakrytí vegetačním pokryvem, což může být způsobeno využitím automaticky klasifikovaných dat. Klasifikační algoritmy mají největší problémy právě v zalesněném strmém terénu.

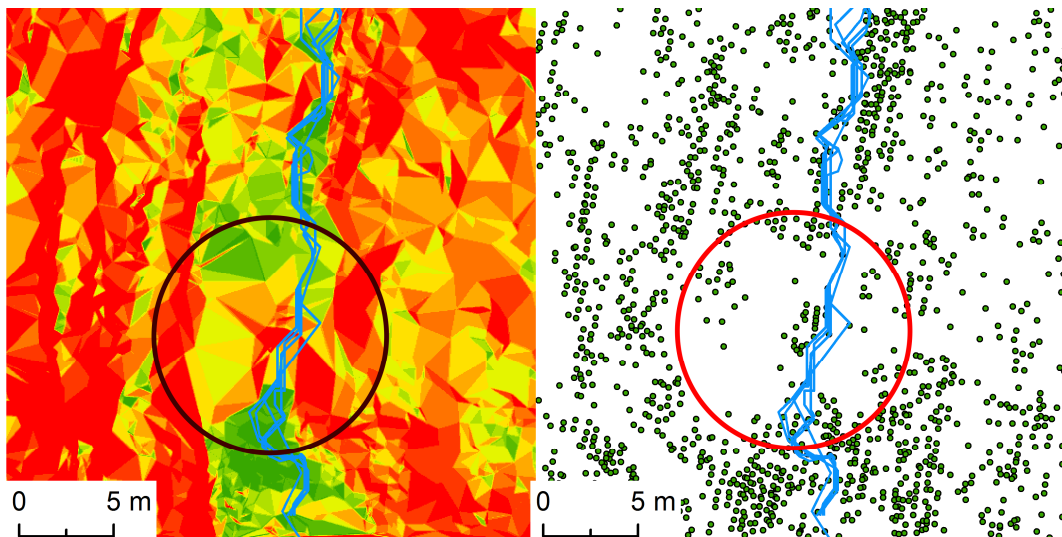
Demonstrovat kombinaci nižší hustoty mračka a pozvolného náběhu hrany vodopádu lze na příkladu Huťského vodopádu (viz obr. 26). Již na rastru sklonu svahů můžeme v horní části vodopádu snadno identifikovat trojúhelníkové plošky, indikující větší střední vzdálenost bodů. Tomu nasvědčuje i průběh generovaných vodních toků. Ten je v tomto prostoru reprezentován liniemi, které lámou svoji dráhu po velmi dlouhých úsecích.



Obr. 26. Huťský vodopád – rastr sklonu svahů a hustota bodového mračka

Poznámka: šipka označuje místo začátku vodopádu; elipsa jeho horní část s nízkou hustotou bodů.

Při označování hran/pat vodopádů byl problém výrazného poklesu hustoty mračka bodů zaznamenán ještě v jednom případě. Jednalo se o nedaleký a relativně malý Kozelský vodopád, kde je nižší hustota bodů prakticky v celém prostoru vodopádu (viz obr. 27).



Obr. 27. Kozelský vodopád – rastr sklonu svahů a hustota bodového mračna

Poznámka: kružnice ohraničuje celý prostor s vodopádem

6.3 Potenciál pro automatickou detekci

Analýzou vybraných vodopádů se prokázalo, že je při hledání jejich přepadových hran a pat nezbytná pečlivost a také individuální přístup. Každý zkoumaný objekt má svá specifika a mnohdy bylo velmi obtížné, definitivně rozhodnout o stanovené poloze. Z tohoto důvodu je těžko představitelné, že by bylo možné tento proces zcela automatizovat, podobně jako u detekce polohy vodního toku. Nabízí se úvaha, vyhledávat na již připraveném vodním toku místa, kde sklon přesáhne určitou definovanou hodnotu (hrana) a pak se zase sníží (pata). Po zkušenosti s měřeními krkonošskými vodopády je ale jednoznačné, že by výsledný výpočet výšky byl naprosto nekorektní. Teoreticky by to snad fungovalo u vodopádů s jednoznačnou přepadovou hranou (např. na sedimentárních vrstvách) a zakončením na hladině výrazné úpatní tůně, takové se však v Krkonoších nevyskytují.

Tuto úvahu bychom ale mohli posunout z roviny měření výšek, k detekování pravděpodobného výskytu vodopádu. Výpočet by kromě polohy vodního toku a údaje o sklonu mohl zohledňovat např. také blízkost skalního podloží a průtok, který lze odvodit ze spočítané plochy povodí (pomocí hodnoty specifického odtoku). Algoritmus by generoval lokality s potenciálem pro výskyt vodopádu a výsledek by byl porovnán se skutečností. Různé nastavení vstupních hodnot by přinášelo i různé výsledky a cílem by bylo nalezení optimální kombinace vstupů, která by detekovala vodopády s nejvyšší úspěšností.

7 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout metodiku, jak měřit základní parametry vodopádů (polohu, výšku, plochu povodí a podélný profil) z dat LLS a následně ji aplikovat na vybrané krkonošské vodopády. Pro určování polohy se navržený postup ukázal jako velmi úspěšný, neboť každý z 28 vodopádů byl bez větších potíží lokalizován. Získané údaje o polohách lze nyní využít pro upřesnění stávajících map a také databází typu ZABAGED a DIBAVOD. Prostorové souřadnice vodopádů se mohou rovněž uplatnit při tvorbě nových map velkých měřítek. Jako podobně úspěšné lze hodnotit také výpočty ploch orografických povodí. To je pozitivní zjištění, zejména zohledníme-li relativně jednoduchý a z velké části automatizovaný proces tohoto výpočtu.

Hodnocení postupu měření výšek a dosažených výsledků je poněkud komplikovanější, než je tomu u poloh a ploch povodí. Navržená metodika sice generuje velmi přesné výsledky, ale jejich relevantnost závisí na třech důležitých faktorech. Jedná se o hustotu bodového mračna vstupních dat, charakter zkoumaného vodopádu a schopnost uživatele určit polohu přepadové hrany a paty vodopádu. Nároky na přesnost jsou velmi vysoké, neboť polohová chyba v řádu decimetrů nebo jednotek metrů může zapříčinit diametrálně odlišný výsledek. Situace je nesrovnatelná s výpočtem plochy povodí, kde i několikametrové pochybení celkovou rozlohu téměř neovlivní. Přestože byla hustota bodového mračna ve většině případů dostatečná a určování hran/pat probíhalo s maximální pečlivostí, bylo by příliš troufalé, považovat naměřené údaje o výškách za definitivní a jediné správné.

Práce nabízí řadu možností, jak na ni dále navázat nebo ji rozšířit. Výsledky by bylo možné doplnit o další charakteristiky, jako je sklon vodopádu nebo jeho průtok; naměřené hodnoty lze dále upřesnit realizací pozemního laserového skenování, zejména v lokalitách se sníženou hustotou bodového mračna dat LLS. Pozemní skenování lze doporučit např. pro Huťský nebo Kozelský vodopád, u nichž byl pokles hustoty bodů nejvýraznější. Oba vodopády jsou poměrně dobře dostupné, neboť k nim vedou značené turistické trasy.

Aplikovat navrženou metodiku na jiná území je možné, budou-li k dispozici srovnatelně podrobná vstupní data. Na tomto místě je ale vhodné připomenout úskalí spojená s určováním polohy přepadových hran a pat vodopádů. V optimálním případě by tuto činnost měl vykonávat geomorfolog (ideálně s dobrou znalostí zájmového území).

Výsledky práce ukázaly, že je laserové skenování užitečné pro získávání informací o vodopádech. Konstrukce profilů nebo měření výšek bývají v terénu mnohdy obtížné, či bez lezeckého vybavení nemožné. Data z LLS umožňují tuto činnost vykonávat pomocí počítače vybaveného vhodným softwarem, byť je kontrola v terénu stále nezbytná.

Použitá literatura a zdroje dat

ArcČR 500 2016. Digitální geografické databáze, verze 3.3. ARCDATA PRAHA, Praha.

ARSEJEV, Georgij Terent'jevič. 1987. *Vodopady*. Moskva: Mysl, 1987, 125 s.

BRÁZDIL, K. 2012. *Technická zpráva k Digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)* [online]. [cit. 2017-06-07]. Dostupné z URL: https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf

CAMPOSANO, A. ...[et al.] 2015. *Extraction of Waterfalls from DTM using OBIA: A Case Study of Mantayupan Falls in Barili, Cebu* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: http://a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com_jresearch/files/publications/WE4-5-3.pdf

ČAPEK, R. a kol. 1992. *Geografická kartografie*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1992. 373 s. ISBN 80-04-25153-6.

ČÚZK 2017a. Prohlížeč služba WMS: Ortofoto [online]. 2017 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx

ČÚZK 2017b. Prohlížeč služba WMS: ZM 10 [online]. 2017 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM10_PUB/WMSservice.aspx

DEMEK, J. 1987. *Obecná geomorfologie*. ACADEMIA, Praha, 476 s.

DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. ISBN 80-7044-575-0.

ESRI 2016. *ArcGIS Resource center* [online]. [cit. 2017-06-07]. Dostupné z URL: <http://resources.arcgis.com/en/help/>

FLOUSEK, J. ...[et al.] 2007. *Krkonoše: příroda, historie, život*. Praha: Baset, 2007. ISBN 978-80-7340-104-7.

HENGL, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, vol. 32, no. 9, p. 1283–1298.

HRDONKA, V. 2006. *Vodopády České republiky* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: <http://www.vodopady.info/cz/vdpCR.php?page=about>

CHENG, Johnny T. 2013. *Waterfalls 101: How Do I Measure A Waterfall's Height? World of Waterfalls* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: <http://www.world-of-waterfalls.com/featured-articles-waterfalls-101-how-do-i-measure-a-waterfalls-height.html>

INSPIRE 2009. *INSPIRE Data Specification on Hydrography – Guidelines* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_HY_v3.0.pdf

JANOŠKA, M. 2008. *Nejkrásnější vodopády České republiky*. Praha: Academia, 2008. ISBN 978-80-200-1560-0.

JEDLIČKA, K., MENTLÍK, P. 2002. Hydrologická analýza a výpočet základních morfometrických charakteristik povodí s využitím GIS. *In Geoinformatika*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2002. s. 46-58.

KRNAP 2012a. *Prohlížeč služba WMS: Ortofoto* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: <http://gis.krnep.cz/ArcGIS/services/public/Ortofoto2012/MapServer/WMSserver?request=GetCapabilities&service=WMS>

- KRNAP 2012b. *Snímkování a skenování území KRNAP a jeho ochranného pásma*. Geodis, Brno. 2012.
- LYSÁK, J. 2013. *Dokumentace k digitálnímu povrchu reliéfu a digitálnímu modelu povrchu z oblasti Krkonoš*. Univerzita Karlova v Praze, Praha 2013
- LYSÁK, J. 2016. *Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování*. Dizertační práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na katedře.
- NETOPIL, R. a kol. 1984. *Fyzická geografie I*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1984. 273 s.
- NORDIC GEO CENTER OY. 2010. RIEGL LMS-Q680i [online]. [cit. 2017-06-07]. Dostupné z URL: <http://www.geocenter.fi/riegl/riegl-lms-q680i>
- ORŠULÁK, T., PACINA, J. 2012. *3D modelování a virtuální realita*. Ústí nad Labem: Tomáš Mikulénka, 2012. ISBN 978-80-904927-4-5.
- PÁNOVÁ, P. 2013. *Vodopády v topografických databázích a digitální kartografii*. Praha, 2013. 57 s. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.
- PICEK, J. 2014. *Vizualizace digitálních modelů reliéfu vytvořených z dat leteckého laserového skenování*. Praha, 2014. 79 s. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie.
- PILOUS, V. 1989. Geomorfologie vodopádů Labského a Obřího dolu v Krkonoších. *Opera Corcontica*, roč. 1989, č. 26, s. 5-49.
- PILOUS, V. 2009a. Vodopády Krkonoš. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 1, s. 22-25.
- PILOUS, V. 2009b. Vodopády: Labský vodopád. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 2, s. 20-22.
- PILOUS, V. 2009c. Vodopády: Labské kaskády; Malý Labský vodopád; Labské peřeje v Labské soutěsce. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 3, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2009d. Vodopády: Pančavský vodopád. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 4, s. 20-22.
- PILOUS, V. 2009e. Vodopády: Sezonní a periodické vodopády Labských jam. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 6, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2009f. Vodopády: Pudlavský vodopád. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 7, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2009g. Vodopády: Dvorský vodopád /vodopád Dvorského potoka, vodopád Martinova potoka. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 8, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2009h. Vodopády: Kaskády a vodopády Bílého Labe. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 9, s. 20-22.
- PILOUS, V. 2009i. Vodopády: Kaskády a vodopády Bílého Labe /pokračování/. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 10, s. 20-22.
- PILOUS, V. 2009j. Vodopády: Vodopády Červeného potoka. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2009, č. 12, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2010a. Vodopády: Vodopády Pramenného dolu – Pramenný a Luční vodopád. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2010, č. 1, s. 20-21.

- PILOUS, V. 2010b. Vodopády: Vodopády Hrazeného potoka. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2010, č. 3, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2010c. Vodopády: Horní Úpský vodopád. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2010, č. 6, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2010d. Vodopády: Dolní Úpský vodopád. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2010, č. 7, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2010e. Vodopády: Vodopády Modrého dolu. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2010, č. 9, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2011a. Vodopády: Vodopády: Vodopády v povodí Malé Úpy. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2011, č. 3, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2011b. Vodopády: Vodopády v povodí Malé Úpy /pokračování/. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2011, č. 4, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2011c. Vodopády: Vodopády Jeleního a Koulového potoka. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2011, č. 5, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2011d. Vodopády: Mumlavský vodopád. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2011, č. 7, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2011e. Vodopády: Vodopády: Vodopády horního Pojizeří II. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2011, č. 10, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2011f. Vodopády: Vodopády v povodí krkonošské Jizerky. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2011, č. 11, s. 20-21.
- PILOUS, V. 2012. Krkonošské vodopády – krásné, jedinečné i rekordní. *Krkonoše – Jizerské hory*, roč. 2012, č. 1, s. 4-9.
- PILOUS, V. 2015. *Vodopády Krkonoš*. Vrchlabí: Správa Krkonošského národního parku, 2015. ISBN 978-80-87706-77-0.
- POTŘEBOVÁ, L. 2013. *Využití prostředí ArcGIS pro zpracování dat leteckého laserového skenování*. Diplomová práce. Katedra matematiky, Fakulta aplikovaných věd. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2013. s. 99
- PUCHRIK, L., NÝDRLE, J. 2013. Snímkování a letecké laserové skenování Krkonošského národního parku. *Geodis news*, roč. 12, č. 1, s. 24.
- RAPANT, P. 2006. *Geoinformatika a geoinformační technologie*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut geoinformatiky, 2006. ISBN 80-248-1264-9.
- ŠÍMA, J. 2009. Abeceda leteckého laserového skenování. *GeoBusiness*, roč. 8, č. 3, s. 22–25.
- ŠÍMA, J., EGRMAJEROVÁ, L. 2004. Ověření přesnosti digitálního modelu reliéfu Základní báze geografických dat. *Geodetický a kartografický obzor*. 2004, roč. 50, č. 11, s. 213–231. ISSN 0016-7096
- VÚGTK 2005. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: [http://www.vugtk.cz/slovník/termin.php?jazykova_verze=&tid=1050&l=digitalni-model-reliefu--digitalni-model-terenu-\(dmr--dmt\)](http://www.vugtk.cz/slovník/termin.php?jazykova_verze=&tid=1050&l=digitalni-model-reliefu--digitalni-model-terenu-(dmr--dmt))

VÚGTK 2010. *Absolutní tíhový bod Pecný* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: <http://oko.pecny.cz/pecny/atbpecn.html>

VÚV 2014. *Struktura DIBAVOD: Katalogový list DIBAVOD* [online]. [cit. 2017-05-30]. Dostupné z URL: http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&id_dib=68

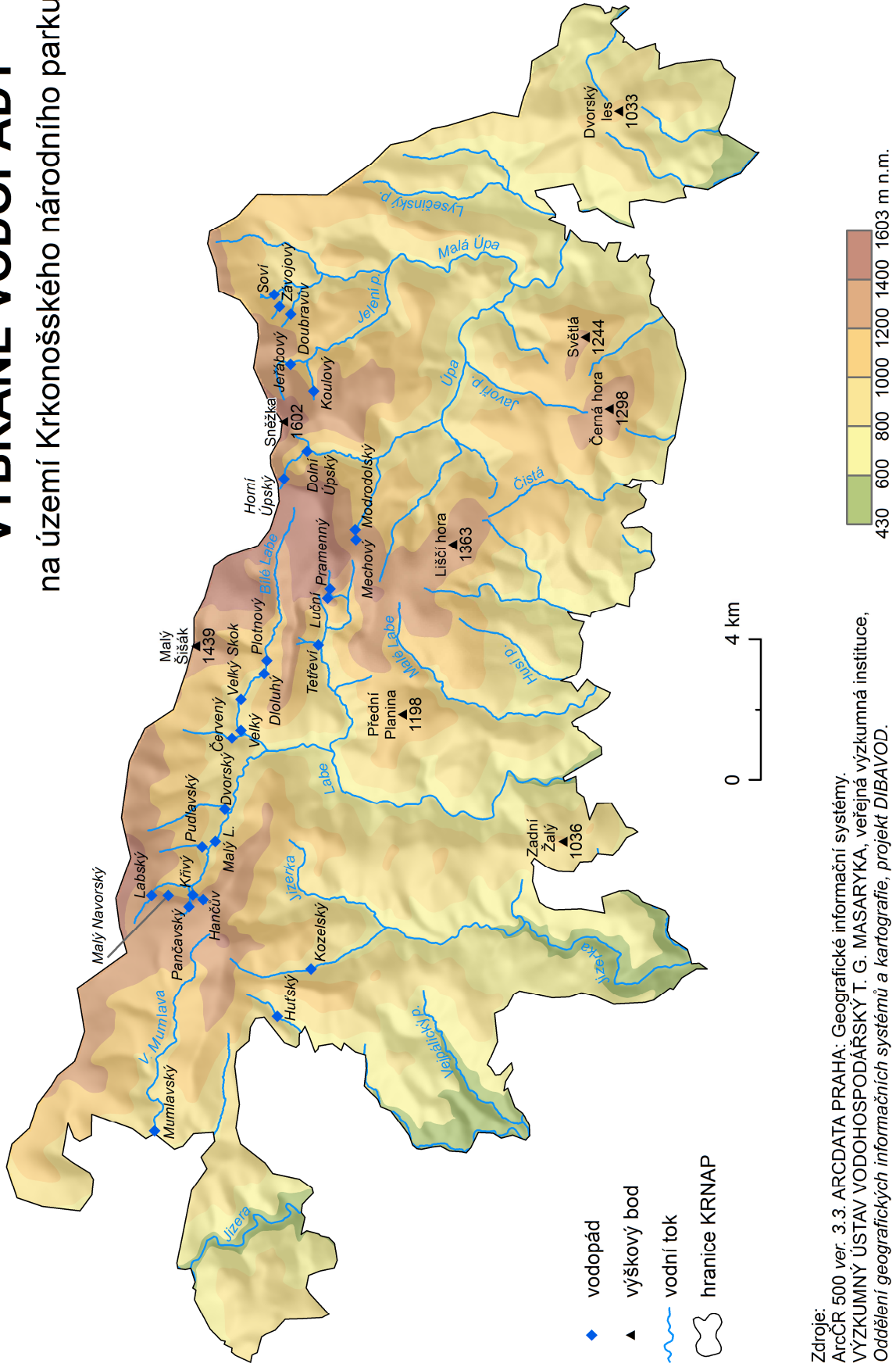
ZÚ 2016. *Katalog objektů ZABAGED® webová verze* [online]. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z URL: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/ZABAGED_katalog/4_Vodstvo/ft_bh180.html

Seznam příloh

Příloha 1	Vybrané vodopády na území Krkonošského národního parku
Příloha 2	Podélný profil Pančavského a Dolního Úpského vodopádu
Příloha 3	Podélný profil Dvorského a Pudlavského vodopádu
Příloha 4	Podélný profil Hančova a Horního Úpského vodopádu
Příloha 5	CD s elektronickou verzí práce

VYBRANÉ VODOPÁDY

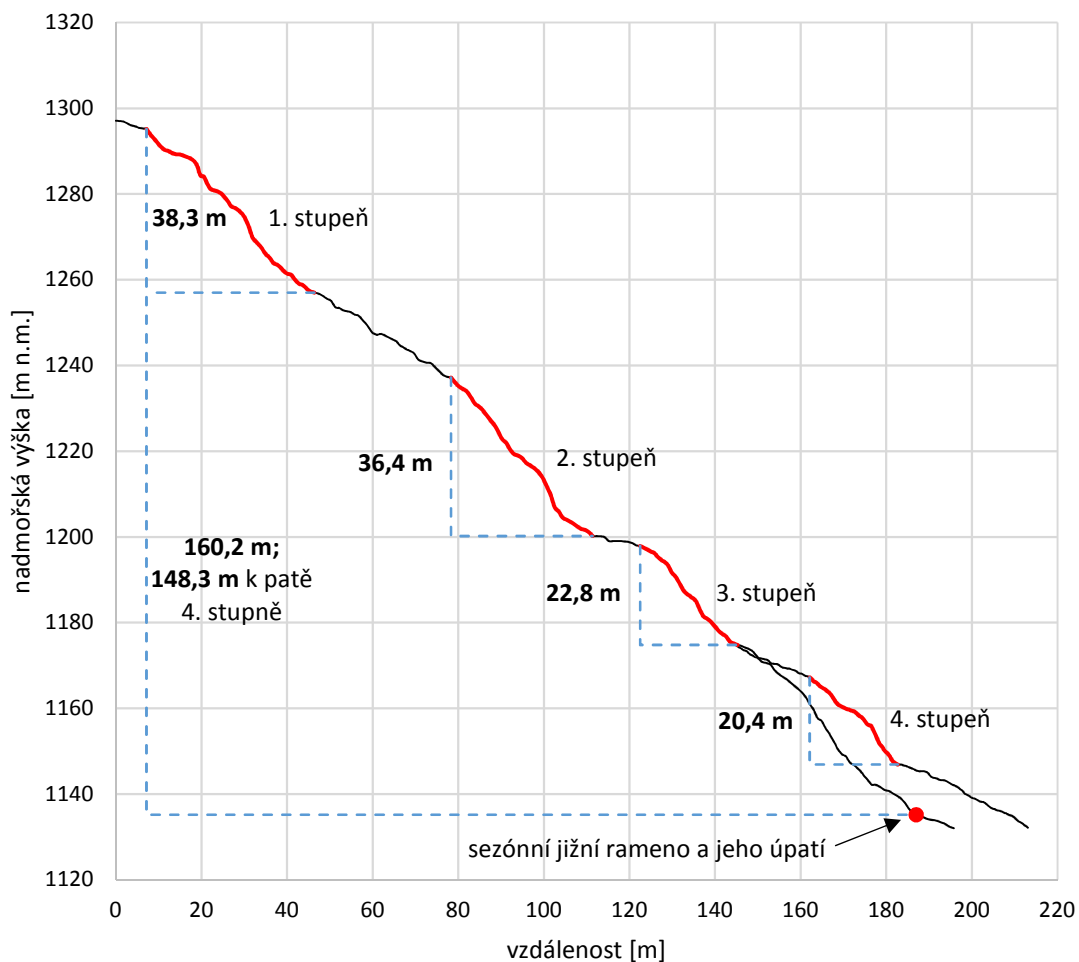
na území Krkonošského národního parku



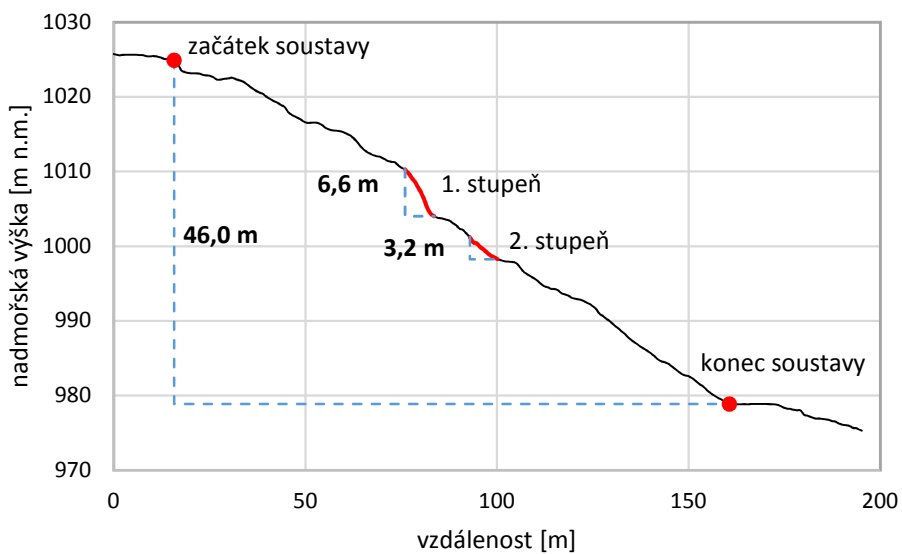
Zdroje:
 ArcČR 500 ver. 3.3. ARCDATA PRAHA: Geografické informační systémy.
 VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA, veřejná výzkumná instituce,
 Oddělení geografických informačních systémů a kartografie, projekt DIBAVOD.

Příloha 2

Pančavský vodopád - podélný profil

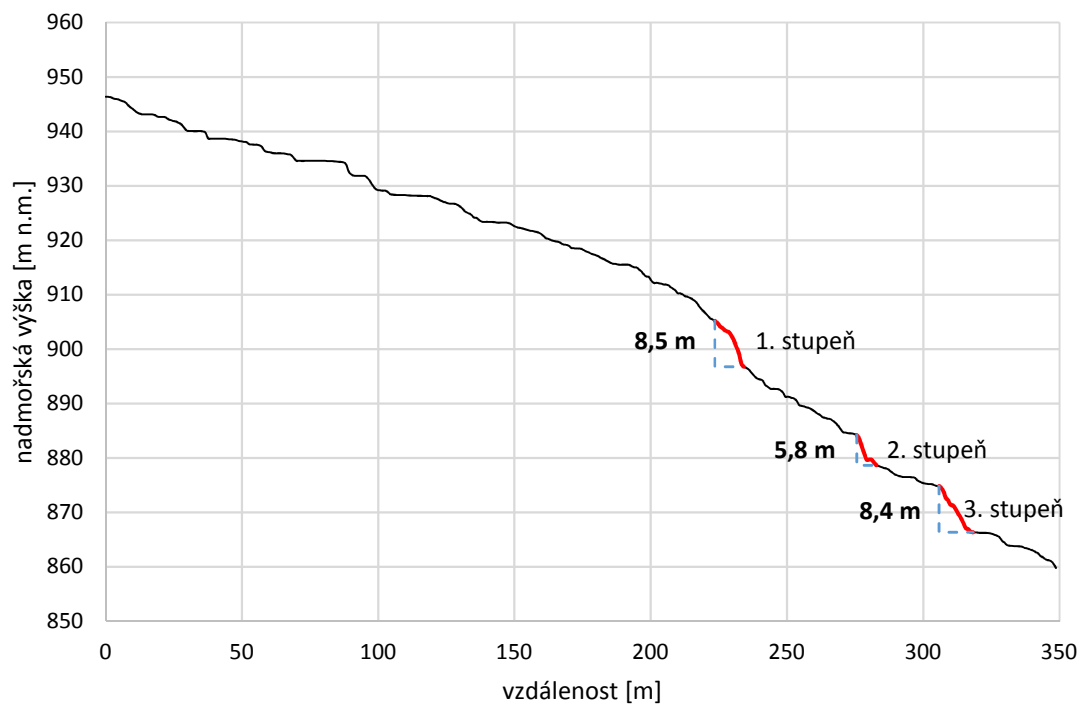


Dolní Úpský vodopád - podélný profil

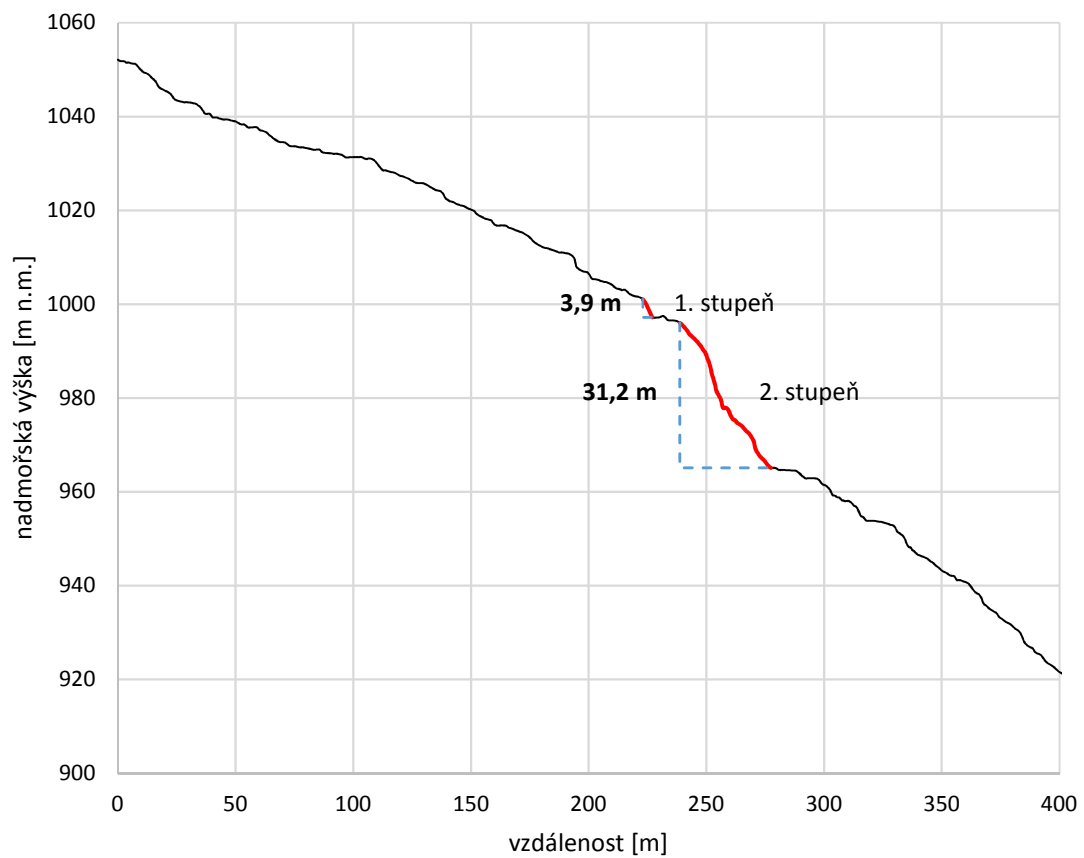


Příloha 3

Dvorský vodopád - podélný profil

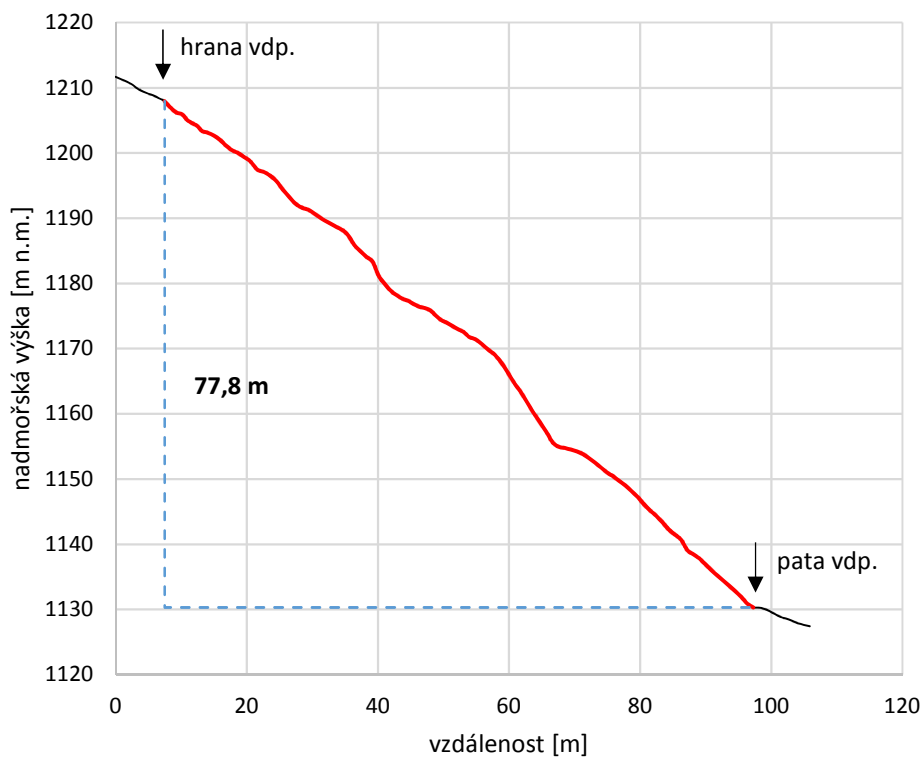


Pudlavský vodopád - podélný profil



Příloha 4

Hančův vodopád - podélný profil



Horní Úpský vodopád - podélný profil

