

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká fakulta**

Katedra fyzické geografie a geoekologie



**VARIABILITA VÝŠKY SNĚHU V LOKÁLNÍM  
MĚŘÍTKU: HODNOCENÍ VLIVU TOPOGRAFIE  
A VEGETACE**

Diplomová práce

Pavλίna Murdychová

Praha 2015

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Michal Jeníček, Ph.D.

# Zadání diplomové práce

## Téma práce

Variabilita výšky sněhu v lokálním měřítku: Hodnocení vlivu topografie a vegetace

## Cíle práce

Diplomová práce si stanovuje následující cíle:

1. Shrnutí aktuálního stavu výzkumu na téma vlivu topografie a charakteru lesní vegetace na prostorové rozložení sněhu během akumulace a tání
2. Podrobné opakované měření výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu (SWE) na vybraných horských lokalitách v ČR
3. Hodnocení variability výšky sněhu v různých vegetacích a v různých měřítkových úrovních a stanovení míry vlivu klíčových faktorů ovlivňujících rozložení sněhu během akumulace a tání.

## Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

První část práce se bude zabývat shrnutím aktuální literatury týkající se vlivu topografie a vegetace na variabilitu sněhové pokrývky v horských povodích.

Hlavní terénní práce bude představovat podrobné měření výšky sněhu a SWE na vybraných lokalitách v Krušných horách nebo na Šumavě. Za tímto účelem budou vybrány 3 lokality velikosti cca 50x50 m. Jedna lokalita se bude nacházet v jehličnatém lese, druhá na mýtině a třetí na větší otevřené ploše. Měření (v kroku 1 nebo 2 metry) bude provedeno pokud možno opakovaně v pravidelných intervalech jak během akumulace, tak tání sněhu.

Hlavním cílem následné analýzy dat bude zhodnotit míru variability sněhu na jednotlivých lokalitách, identifikovat klíčové parametry a stanovit jejich podíl na rozložení sněhové pokrývky. Největší důraz bude kladen na faktory popisující charakter vegetace a topografie ve sledovaných lokalitách – Leaf Area Index (LAI), potenciální úhrn krátkovlnné radiace, nadmořská výška, sklon, expozice vůči světovým stranám, vliv větru a další. Cílem je vysvětlit co nejvyšší podíl těchto faktorů na variabilitě sněhu ve sledovaných lokalitách. Zároveň bude analyzována změna variability výšky sněhu v závislosti na velikosti lokality (10x10 m, 25x25 m, 50x50m).

Datum zadání: 25. 11. 2013

Jméno studenta: Pavlína Murdychová

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: Michal Jeníček

Podpis vedoucího práce:

Souhlasím, aby práce byla uložena v Geografické knihovně a zpřístupněna ke studijním účelům. Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků z této práce mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity. Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Praze dne 12. 8. 2015

.....

Pavλίna Murdychová

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce RNDr. Michalu Jeníčkovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc při zpracování mé práce. Dále bych ráda poděkovala všem, kteří mi poskytli potřebná data pro diplomovou práci. Zároveň děkuji všem, kteří mi při zpracování diplomové práce poskytli morální podporu a pomoc při měření terénních dat.

# Variabilita výšky sněhu v lokálním měřítku: Hodnocení vlivu topografie a vegetace

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá hodnocením variability výšky sněhu v lokálním měřítku. Zaměřuje se především na vliv topografických a vegetačních faktorů, mezi které byla vybrána sklonitost, expozice, křivost terénu, sluneční radiace a leaf area index. Dále pak práce hodnotí vliv velikosti měřítka. Terénní měření probíhala v období akumulace a tání sněhové pokrývky v sezoně 2014/2015 v Krkonoších na lokalitě Hanapetrova paseka. K hodnocení vlivu vybraných faktorů bylo použito vícenásobné lineární regrese a další popisné statistické metody. Z výsledků hodnocení vyplývá, že variabilita sněhové pokrývky v době akumulace je větší v lesním porostu, což je způsobeno pravděpodobně vegetací. Regresní analýzou však tato závislost potvrzená nebyla. V době tání je také variabilita sněhové pokrývky vyšší v lesním porostu a zvyšuje se přímo úměrně době trvání tání sněhu. Celkově je variabilita sněhové pokrývky větší v lesním porostu. Z hlediska porovnání různých velikostních měřítek lze konstatovat, že s rostoucí velikostí hodnocené plochy klesá variabilita výšky sněhu.

**Klíčová slova:** akumulace sněhu, tání sněhu, topografie, vegetace, vícerozměrná statistická analýza

# **Snow depth variability at the plot scale: Assessment of topography and vegetation influence**

## **Abstract**

This master thesis deals with the evaluation of snow depth variability at the plot scale. It focuses on influence of topography and vegetation factors as slope, exposure, curvature, solar radiation and leaf area index. There is also assesment the impact of the size scale. Measurement was carried out in period of accumulation and snowmelt in winter 2014/2015 in the Krkonoše Mountains on Hanapetrova glade. To evaluate the effect of selected factors on variability of snow depth there was used multiple linear regresion and other descriptive statistical methods. The research shows that the variability of snow depth during the accumulation is greater in forest which is probably due to vegetation. The dependency was not confirmed by regression analysis. Higher variability of snow cover in the forest was also observed in the melting period. The variability of snow cover increased in the forest in general. The results show that the snow depth variability decreases with increasing grid size.

**Keywords:** snow accumulation, snowmelt, topography, vegetation, multivariate analysis

# Obsah

1 Úvod.....	8
2 Současný stav poznatků.....	9
2.1 Faktory ovlivňující sněhovou pokrývku.....	9
Vegetace.....	11
Sluneční radiace.....	13
Větrné proudění.....	13
Topografie.....	14
3 Data a metody.....	16
3.1 Obecná charakteristika území.....	16
3.2 Zdroje dat.....	19
3.3 Metodika zpracování dat.....	21
4 Výsledky.....	27
4.1 Hodnocení klimatických podmínek a vývoje sněhové pokrývky v zimní sezóně 2014/2015.....	27
4.2 Hodnocení vlivu vybraných faktorů na změnu sněhové pokrývky v zimní sezóně 2014/2015.....	31
4.3 Hodnocení variability sněhové pokrývky v závislosti na environmentálních proměnných v zimní sezóně 2014/2015.....	35
4.4 Hodnocení variability sněhové pokrývky v různých velikostních měřítkách.....	38
5 Diskuze.....	40
6 Závěr.....	43
7 Seznam použité literatury.....	44
8 Seznam obrázků a tabulek.....	50

# 1 Úvod

Většina toků protékajících přes Českou republiku na našem území také pramení. Toky pramení v horských oblastech, kde dochází v zimním období k výrazné akumulaci sněhové pokrývky a tím i k zadržení značného množství vody (Šípek a Tesař, 2014). V dnešní době se setkáváme s jarními povodněmi způsobenými táním sněhu vlivem zvýšené teploty a výrazných dešťových srážek (Kutláková a Jeníček, 2012). Na akumulaci a tání sněhové pokrývky mají výrazný vliv jednotlivé přírodní faktory. Mezi nejvýznamnější patří nadmořská výška z regionálního hlediska a dále pak například sklonitost, expozice, vegetace z lokálního hlediska. Vliv vegetace je významným předpovědním faktorem jarních povodní právě v horských oblastech (Holko et al., 2009). Tyto faktory pak budou detailněji rozebrány v této diplomové práci. V případové studii jsou hodnoceny faktory sklonitosti, expozice, křivosti terénu, solární radiace a vegetace v zájmovém území Krkonoš.

Základními otázkami diplomové práce jsou vysvětlení, jak ovlivňuje vegetace a topografie akumulaci a tání sněhové pokrývky? Který faktor je v lokálním měřítku nejvýznamnější? Který naopak není v našich zeměpisných polohách významný? Hraje roli velikost měřítka? Diplomová práce si stanovuje najít odpovědi na tyto otázky pomocí dvou hlavních cílů. K prvnímu cíli patří shrnutí aktuálního stavu výzkumu na téma vlivu topografie a charakteru lesní vegetace na prostorové rozložení sněhu během akumulace a tání pomocí české i zahraniční odborné literatury. Druhým cílem je zhodnocení naměřených dat výšky sněhu a SWE ve zkoumané oblasti v Krkonoších s využitím vícerozměrné regresní analýzy pro stanovení vlivu klíčových faktorů ovlivňujících rozložení sněhové pokrývky. Cílem práce je doložení základních hypotéz, které předpokládají větší míru variability v době akumulace i tání na otevřené ploše než v lese, a také větší variabilitu v době akumulace i v rámci otevřené plochy na rozdíl od nižší variability v lesním porostu.

Práce má standardní strukturu. V první části jsou shrnuty současné poznatky týkající se daného tématu v české i zahraniční literatuře. Ve druhé části je popsána metodika zpracování dat a použitých pracovních metod. Data z terénního průzkumu pochází ze zimní sezóny 2014/2015 z Krkonoš. Třetí část je věnována prezentaci výsledků pomocí mapových výstupů, ilustračních obrázků a grafů. V poslední části jsou pak dané výsledky diskutovány s dalšími studii na dané téma.



## 2 Současný stav poznatků

### 2.1 Faktory ovlivňující sněhovou pokrývku

Výška sněhové pokrývky je vysoce heterogenní (Anderson et al., 2014). Tato výška může být hodnocena parametrem vodní hodnoty sněhu SWE (snow water equivalent). Podle tohoto parametru se dá dobře určovat tání sněhového pokrývky. Hodnoty SWE mohou být značně odlišné od hodnot měřených srážek. Mohou být porovnávány s nadmořskou výškou, sklonitostí a expozicí reliéfu nebo vegetačním krytem. Vliv faktorů však nelze jednoznačně oddělit a některé faktory spolu úzce souvisí. Například korelace mezi nadmořskou výškou a SWE může být ovlivněna orografickým efektem (Houghton, 1979), díky němuž je distribuováno více srážek s rostoucí nadmořskou výškou a také teplotním efektem, kde je znatelný vliv tání sněhu a deště v nižších nadmořských výškách (Jost et al., 2007). Výsledky korelace mezi SWE a expozicí reliéfu je obecně vysvětlován rozdílnou akumulací na návětrných a závětrných svazích, ale může být také způsoben rozdílným příjmem solární energie jižních a severních svahů. Stejně tak vegetační pokryv může snížit, zvýšit akumulaci nebo tání v závislosti na terénních a klimatických faktorech.

Prostorové rozlišení SWE odráží časovou a prostorovou heterogenitu akumulace a tání (Anderson et al., 2014). V práci Andersena byla korelace mezi nadmořskou výškou a výškou sněhu značná. Slabší pak byla pozorována závislost mezi výškou sněhu a vegetačním pokryvem. Tato korelace byla nižší na začátku vegetační sezony, s pozdějším obdobím v sezoně pak korelace rostla. Negativní korelace byla pozorovatelná mezi výškou sněhu a indexem určujícím vystavení povětrnostním podmínkám (wind exposure index).

Mezi nejčastější přístupy hodnocení určité závislosti patří statistické hodnocení vztahu vlastností sněhu a topografickými a meteorologickými prvky jako je nadmořská výška, sklon, expozice, vítr a radiace (Trujillo, Ramirez et Elder, 2009). V poslední době je také kladen důraz na charakteristiku rozdílných vlastností v závislosti na velikosti měřítka.

Distribuce sněhové pokrývky je značně variabilní. Tato variabilita je dána rozdílnými toky energie a pohybem hmoty v závislosti především na topografii a vegetaci. (Winstral, Marks, Gumey, 2012). Variabilita sněhové pokrývky je ovlivněna mnoha faktory (López-Moreno, Stähli, 2008). Některé faktory jsou více rozhodující v době akumulace, odlišné faktory pak v době tání. Faktory můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin. První kategorie jsou klimatické přímé (srážky, teplota) a nepřímé (vítr a solární radiace) a druhou kategorií

jsou faktory geografické, které se podílejí na vývoji, rozložení a zániku sněhové pokrývky (nadmořská výška, morfologie terénu a vegetace) (Fliegl, 2009). Obsahem této práce jsou klimatické nepřímé a geografické faktory. Obecně mezi významně ovlivňující faktory patří topografie, pokrytí vegetací, klimatické podmínky. Mezi topografické faktory je nejlépe zařadit nadmořskou výšku a expozice vůči solární radiaci, které významně ovlivňují variabilitu sněhových procesů. Podle studie zaměřené na výzkum v alpském údolí centrálního Švýcarska (López-Moreno, Stähli, 2008) výrazněji ovlivňuje vodní hodnotu sněhu radiace než nadmořská výška, tento jev byl výrazněji pozorovatelný hlavně v období suchých a chladných zim.

Dále také variabilita závisí na velikosti měřítka dané lokality. (López-Moreno et al., 2014). V malém měřítku (1-10m) je výrazným činitelem na variabilitu sněhové pokrývky topografie, zatímco s velikostí měřítka (stovky až tisíce metrů) přibývají činitelé jako je vítr, distribuce srážek, lavinové situace a podobné. Variabilita v měřítku celého povodí (stovky až tisíce kilometrů) je ovlivněna především orografickými srážkami a synoptickou situací v povodí. Variabilita malého měřítka je důležitá pro modelování hydrologických procesů nebo třeba pro modelování nebezpečí způsobené sněhovými lavinami.

Variabilita sněhové pokrývky závisí na prostorovém a časovém měřítku. Průměrná hodnota variačního koeficientu v měřítku lokality roste s velikostí této lokality. Průzkumy také ukazují, že pokud je neomezená velikost gridu v různém měřítku, je pozorována menší variabilita při vyšší sněhové pokrývce. S nižší sněhovou pokrývkou pak variabilita naopak vzrůstá. Podle López-Moreno et al. (2014) je korelace mezi dvěma rozdílnými měřítky významná (na hladině  $p=0,05\%$ ). Nejužší korelaci lze pozorovat mezi dvěma blízkými měřítky, s větší rozdílností měřítka klesá korelační koeficient.

Výzkum Marchanda a Killingveita (2005) z jižního Norska vykazuje koeficient variace sněhové pokrývky na otevřené ploše v rozmezí 0,72 až 0,96, je tedy výrazně vyšší než v lesních porostech. Průměrná výška sněhu je vyšší na otevřených plochách než v lese (Marchand a Killigveit, 2005).

Výzkum López-Morena et al. (2014) v centrálních Pyrenejích hodnotil korelaci mezi výškou sněhu v rozdílných měřítkách a dalšími pěti topografickými charakteristikami jako je nadmořská výška, potencionální solární radiace, křivost terénu, sklon svahu a vliv větru. Výsledky pak ukázaly silnou korelaci mezi výškou sněhu a topografií v měřítku hodnocené lokality. Silnou negativní korelaci se sněhovou variabilitou ve stejném měřítku vykazovala

sluneční radiace. Křivost terénu také vykazovala negativní korelaci, avšak slabší ve všech velikostních gridech. Vliv větru negativně závisel na sněhové pokrývce v hodnocení menšího měřítka.

Ve výše uvedené studii López-Moreno et al. (2014) byla výška sněhu významným ukazatelem variability sněhové pokrývky pro modelování. Dále mezi významné ukazatele patřil vítr a korelační koeficient nadmořské výšky. Sluneční radiace a sklon nevykazovaly jasnou spojitost mezi hodnocenými daty a prostorovým rozlišením (López-Moreno et al., 2014). Distribuce výšky sněhu v zalesněném území odpovídá Gaussovskému rozložení dat. V nejvyšších horských oblastech alpínské tundry je pak negativně zešikmena. V subalpínském lese roste výška sněhové pokrývky v závislosti na nadmořské výšce, zatímco standardní odchylka zůstává stejná. V oblasti tundry pak průměrná výška sněhu klesá s nadmořskou výškou a standardní odchylka se mění různorodě (Trujillo, Ramirez et Elder, 2009). Výrazným faktorem ovlivňující sněhovou pokrývku je také vegetace, která ovlivňuje jak sílu větru a s ní souvisejí redistribuci, tak ovlivňuje například i teplotní režimy jako je intercepce nebo sublimace (López-Moreno et al., 2014).

## **Vegetace**

Výrazným faktorem, který ovlivňuje sněhovou pokrývku, je vliv intercepce. Zde můžeme vymezit faktory meteorologické a vegetační (DeWalle a Rango, 2008). Mezi vegetační faktory patří druhově specifické faktory jako je trvání olistění (opadavé x neopadavé), charakter jehlic, úhel a flexibilita větví a poté rostlinné faktory (př. leaf area index). Do kategorie meteorologických faktorů lze zařadit teplota vzduchu, rychlost a směr větru.

Vliv vegetace na výšku sněhové pokrývky je výrazný pokud je výška sněhové pokrývky menší než výška vegetace (Clark et al., 2011). Intercepce vyjadřuje množství zadržetí dešťových či sněhových srážek vegetací před dopadem na zem (Chow et al., 1988 in Hasa 2012). Množství vody zadržené intercepací může být zejména u hustých lesních porostů významné. Povrchová plocha jehličnatého porostu může až 30× přesahovat plochu pozemku (Krečmer et al., 2003 in Hasa 2012). Lesní porosty zadržují výrazné množství sněhu ve svých korunách. V souvislých lesních porostech může činit tento podíl až jednu třetinu z pevných srážek (Schmidt a Troendle, 1992). Lesní porosty prodlužují dobu trvání sněhové pokrývky v porovnání s otevřenými plochami. Souvislý vegetační porost může zmenšit množství

sněhové pokrývky až o 50 % v porovnání s otevřenými plochami (Hedstrom and Pomeroy, 1998; Pomeroy et al., 2002). Ze studie (López-Moreno, Stähli, 2008) z Alp za období 1984 a 2004 vyplývá, že efekt lesa na akumulaci sněhu je značný, především v období teplých a vlhkých sezón. Rozdíl v akumulaci se může pohybovat až o 42 % mezi otevřenou plochou a lesním porostem. Lesní vegetace vede ke snížení akumulace sněhu, za určitých podmínek může omezit tání sněhu na začátku období tání. Tento jev způsobuje intercepce větví listnatých i jehličnatých stromů (Hedstrom and Pomeroy, 1998; Lundberg et al., 2004). Lundberg et al. (2004) uvádí, že lesní porost může snižovat množství akumulovaného sněhu až o 40 % v porovnání s otevřenou plochou. Stejně tak, Pomeroy and Gray (1995) určili toto množství v rozpětí 25 – 45 %. Jehličnatý les výrazně ovlivňuje rozmístění sněhové pokrývky (Clark et al., 2011). V blízkém okolí jehličnatých stromů se vytvářejí miskovité prohlubně, které vznikají díky intercepce vegetace. Tyto deprese vznikají typické velikosti menší než 5 m od kmene stromu. Vegetační kryt způsobuje intercepce, ale také ovlivňuje snížené tání sněhové pokrývky vlivem nižší solární radiace, je emitorem dlouhovlnného záření a také snižuje rychlost větru (Anderson et al., 2014). Na druhou stranu, zastínění sněhu vegetací snižuje intenzitu tání během dnů s přímým slunečním svitem (Lundberg et al., 2004). Tání sněhu je podle studie Jeníčka, Pevné, Matějky (2015) až dvakrát rychlejší na otevřených plochách než v lese. V této studii je také porovnáno tání na mýtině, které je vlivem nižšího přísunu sluneční radiace v porovnání s otevřenou plochou pouze o 38 % rychlejší než v lese. Sublimace v lesních porostech je téměř nulová (Harding, Pomeroy, 1996), podle Molotcha et al. (2007) činí sublimace  $0,41\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$  ze sněhové pokrývky a  $0,71\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$  z vegetace.

Nepravidelná struktura lesního porostu ovlivňuje solární radiaci ovlivňující sněhovou pokrývku (Stähli, Jonas, Gustafsson, 2009). Hustota lesního porostu se dá vyjádřit množstvím volného prostoru nebo pomocí Leaf area index (LAI), který se sezonně proměnlivý. LAI je bezrozměrný parametr, vypočtený jako poměr listové plochy a příslušné půdorysné plochy (Watson, 1947).

Ve studii Andersena et al. (2014) se uvádí, že v oblasti nízké hustoty zalesnění byla pozorována vyšší sněhová pokrývka než v hustém lese. Vysvětlením mohou být dvě příčiny. Lesní porosty jsou ovlivněné dalšími faktory, např. vyskytují se ve vyšších nadmořských výškách a na severních expozicích. Nebo pak dále s klesající hustotou zalesnění, kdy poklesává vliv intercepce a následné sublimace, dochází ke snížení tání zastíněním.

## Sluneční radiace

Sluneční radiaci můžeme rozdělit na dvě složky – dlouhovlnnou a krátkovlnnou (Stähli, Jonas, Gustafsson, 2009). Krátkovlnná radiace je hlavním zdrojem energie pro tání sněhové pokrývky (DeWalle a Rango, 2008). Výrazný vliv na množství dodané solární energie má oblačnost. Při bezoblačném počasí dopadá až 4krát více přímého slunečního záření než rozptýleného. Solární radiace je proměnlivá s vyšší nadmořskou výškou nebo vyššími subalpinskými vegetačními stupni, kde sníh zvyšuje odrazivost a také ovlivňuje turbulentní toky sublimace (Pomeroy et al., 1998). Množství dopadajícího slunečního záření je ovlivněno také sklonem terénu (DeWalle a Rango, 2008). Závislost mezi těmito faktory vyjadřuje tzv. pohledový faktor oblohy, který je na sklonu svahu nepřímo závislý (obr. 1). Záření také proniká až do hloubky 25cm sněhové pokrývky. Zde dochází k urychlení procesu metamorfózy a snižování albeda.

**Obr. 1: Pohledový faktor oblohy v závislosti na sklonu svahu (DeWalle a Rango, 2008)**

Sklon svahu [°]	Pohledový faktor oblohy
0	1,000
5	0,998
10	0,992
15	0,983
20	0,970
30	0,933
45	0,854
90	0,500

## Větrné proudění

Sněhové vločky jsou transportovány větrem na různé vzdálenosti. K transportu dochází v případě, že síla větru je vyšší než síla, která drží sněhovou pokrývku (Singh a Singh, 2001). Síla větru se zvyšuje s jeho rychlostí a s nerovnostmi povrchu. Mezi tři hlavní způsoby transportu sněhu patří turbulentní suspenze, saltace a vlečení (De Walle a Rango, 2008). Obecně nejčastějším způsobem pohybu je saltace. Vítr tak výrazně ovlivňuje akumulaci sněhové pokrývky. Při pohybu sněhu dochází k sublimaci, během které se může změnit výsledná výška sněhové pokrývky až o 50 %. Vliv větru se nejvíce projevuje na otevřených plochách nebo nad alpskou hranicí lesa (Jones, et al. 2001). Obecně se nejvíce sněhu akumuluje v závětrných prostorech. Jak zmiňuje Vajda (2006) ve své studii zabývající se větrem v Laponsku, nejdůležitějším z faktorů ovlivňujících výšku sněhové pokrývky je

orografie a vegetace. Vliv orografie je o třetinu nižší než vliv vegetace. Stejně tak práce zmiňuje vliv větru v lesním porostu, který je výrazně menší než na otevřené ploše. Liston a Sturm (1998) navíc ještě studují vliv drsnosti povrchu sněhové pokrývky. Hladký povrch, tedy povrch bez vegetace, má menší smykové tření a umožňuje tak snadnější pohyb sněhových krystalků.

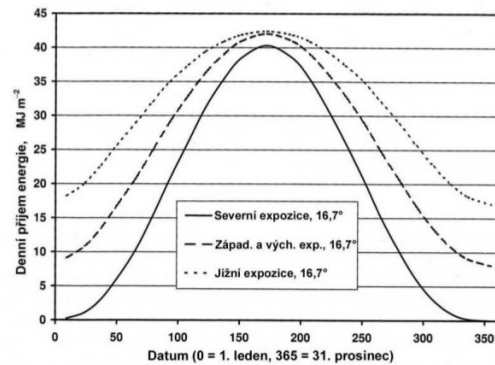
## Topografie

Nadmořská výška ovlivňuje výšku sněhové pokrývky nepřímo. Obecně přibývá s rostoucí nadmořskou výškou, což je způsobeno nárůstem srážek, poklesem teploty vzduchu a tím i poklesem evaporace a tání (Cline, 1999). Nadmořská výška ovlivňuje trvale variabilitu SWE (Anderson et al., 2014). Hodnota SWE je ovlivněna orografickým efektem na množství srážek a teploty vzduchu na skupenství srážek. Studie Toews a Gluns (1986) v Britské Kolumbii ukázala, že vodní hodnota sněhu roste na zalesněných plochách o 11-15 mm na 100m výšky, u otevřených ploch je to 21-27 mm. Průměrná hodnota SWE v České republice je 25 mm v nížinách, 100 mm ve středních polohách a 300mm v horských polohách. Výzkum ve Vysokých Tatrách pak dokázal, že nad 1700 m n. m. se již hodnota SWE nemění s přibývajícím nadmořskou výškou (Hříbik a Škvarčina, 2006). Ve vyšších nadmořských výškách dochází k poklesu vodní hodnoty sněhu z důvodů výskytu vegetace a větším vlivem větru, který sněh odváne do nižších poloh.

Sklon má také nepřímý vliv na ukládání a tání sněhové pokrývky, ovšem tento vliv je výrazný. Na sklonitějších územích se sněhová pokrývky drží méně jak v době akumulace, tak v době tání.

Rozdílná orientace svahů ovlivňuje množství přijímané solární energie. Rozdílnost v příjmu solární energie v závislosti na sklonu svahu vystihuje obrázek (2). Zde je patrný narůstající příjem solární energie od počátku roku směrem k letním měsícům v závislosti na expozici svahu (DeWalle a Rango, 2008). Severní svahy na severní polokouli přijímají nejméně solární energie v průběhu celého roku v porovnání se svahy jižními (event. západními i východními). Ve studii Zhao et al. (2015) byla výška sněhu vyšší v místech na zastíněné straně na rozdíl od slunci vystavenému, díky rozdílnému trvání solární radiace, která přispívá k tání sněhu.

**Obr. 2: Denní potenciální příjem solární energie na svahu se sklonem 16,7° na 50° severní šířky (DeWalle a Rango, 2008)**



Dalším faktorem, který se užívá k hodnocení terénu je easting (východnost) a northing (severnost). Podle López-Morena, Latrona a Lehmana (2010) se převádí hodnoty expozice (1° až 360°) na kruhové jednotky (1 až -1). Obě tyto charakteristiky v závislosti na potenciální solární radiaci jsou určující pro pohyb a depozici sněhu ovlivněné větrem.

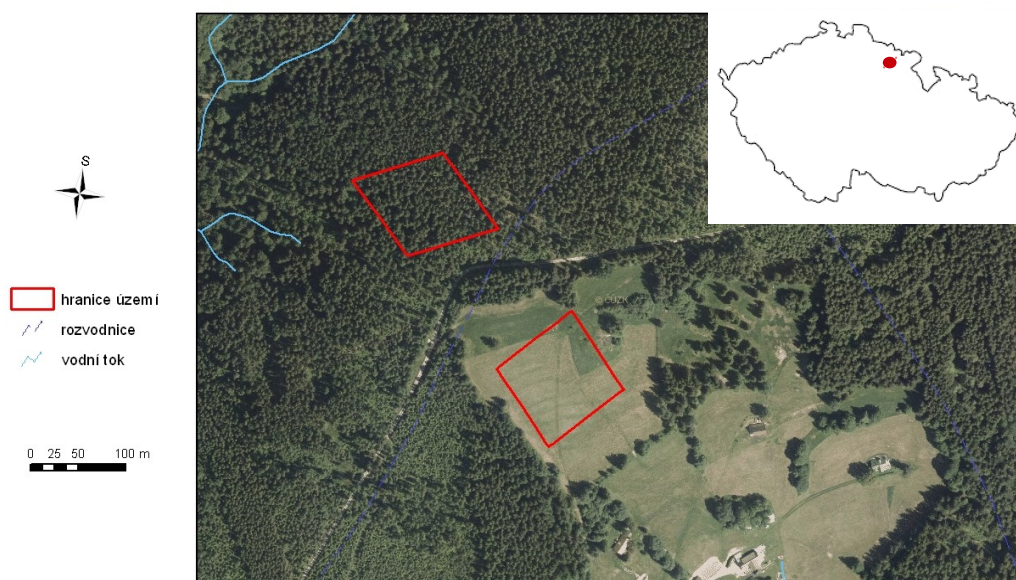
Křivost reliéfu určuje konkávní a konvexní tvary v povodí (López-Moreno, Latron, Lehmann, 2010). Je definována jako velikost změny krajiny. Tento parametr je vhodný především pro sledování sněhové depozice, která je ovlivněna větrným prouděním.

## 3 Data a metody

### 3.1 Obecná charakteristika území

Zkoumaná oblast se nachází v centrálních Krkonoších asi 4km východně od města Strážného a severně od obce Dolní Dvůr (obr. 3). Hanapetrova paseka, na které bylo prováděno měření, leží v nadmořské výšce 875 m n.m. Území se rozkládá na dvou povodích. Území na otevřené ploše patří do povodí Kotelského potoka, území v lesním porostu spadá do povodí Husího potoka. Oba tyto toky jsou pak levostranným přítokem Malého Labe.

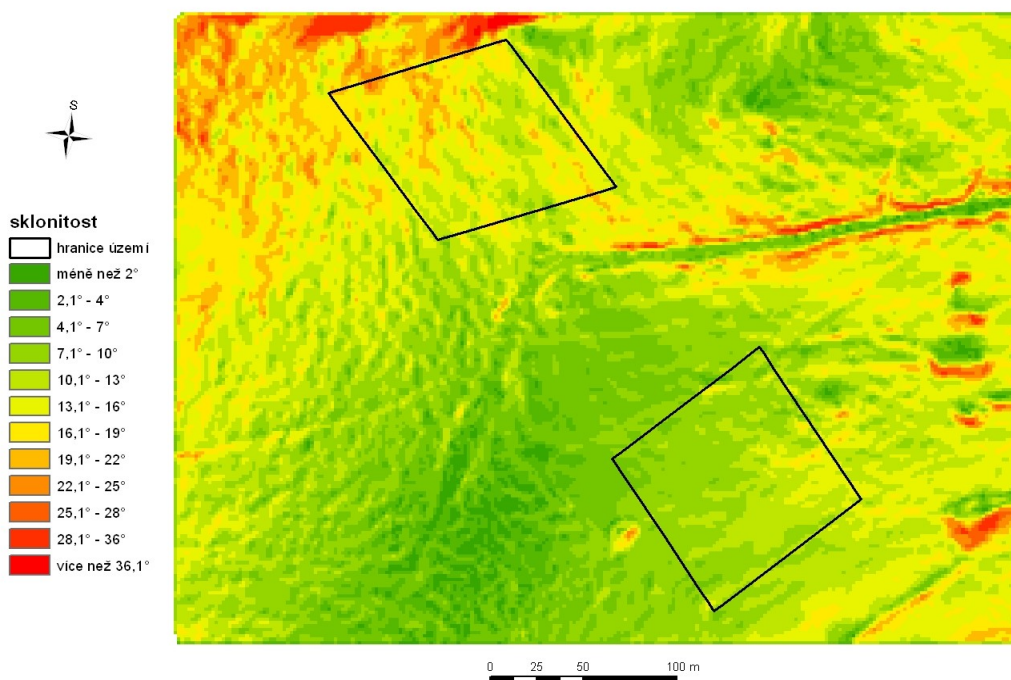
**Obr. 3: Poloha zkoumaných oblastí v Krkonoších (zdroj: ČÚZK a mapy.cz, 2015)**



Z poskytnutých dat digitálního modelu reliéfu 5. generace byla zobrazena sklonitost a expozice zkoumaného území. Sklonitostní charakteristiky se v obou měřených lokalitách liší. Na otevřené ploše (obr. 4) se sklonitost pohybuje v rozmezí od 3,5° po 19°, kdy krajové hodnoty jsou spíše výjimečné a průměrný sklon se pohybuje okolo 10°. V území porostlé lesem je rozmezí sklonitosti od 5,5° do 26° a průměr se nachází lehce nad 15°. V blízkém okolí mimo měřené polygony se však sklonitost mění výrazněji převážně na SZ území, kde se nachází údolí Husího potoka s velmi příkrými svahy dosahujícími hodnot až ke 40°. Naopak západním směrem od otevřené plochy se sklonitost v lokalitě zmenšuje a pohybuje se v rozmezí 2-7°.

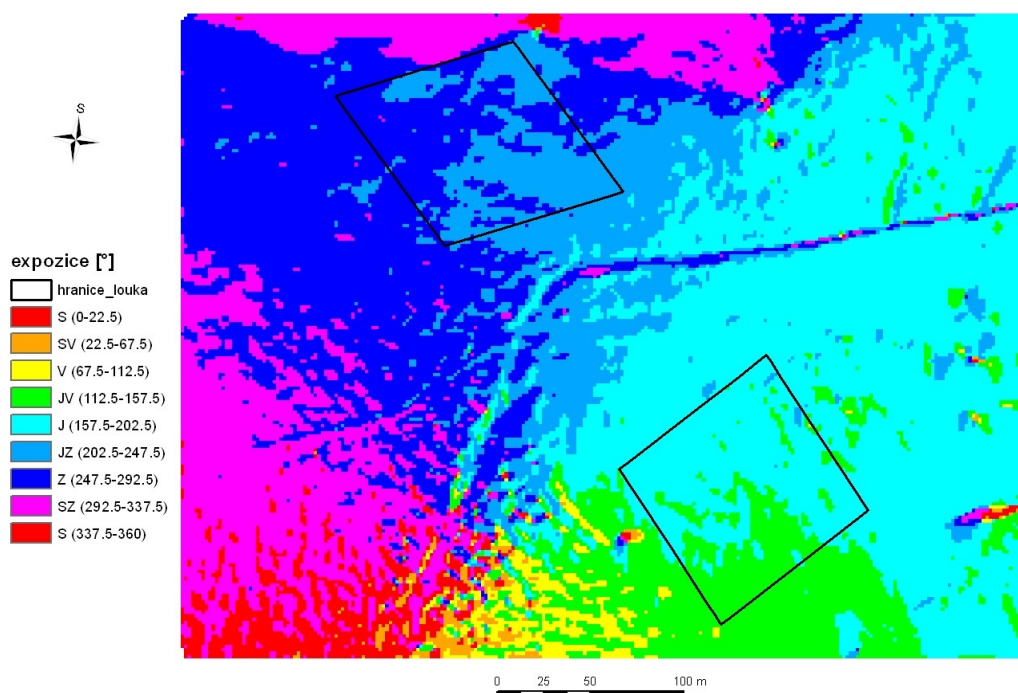


**Obr. 4: Sklonitostní charakteristika zkoumané oblasti (zdroj: ČÚZK, 2015)**



Z hlediska expozice jsou dané lokality méně pestré než sklonitost (obr. 5). Otevřená plocha Hanapetrovy paseky je orientována na jih, v jižnější části pak převažuje orientace na jihovýchod. Tato orientace přispívá k lepšímu tání sněhové pokrývky na otevřené ploše než v lese. Hodnoty pro les vykazují rozpětí od 202° do 293° odpovídající jihozápadní až západní expozici.

**Obr. 5: Expozice ve zkoumané oblasti (zdroj: ČÚZK, 2015)**



Klimatické podmínky Krkonoš se vyznačují výraznou vlhkostí a nízkými teplotami. Průměrný úhrn srážek v nadmořské výšce okolo 800 m n.m. je udáván na 800mm (Správa KRNAP, 2010). V rostoucí nadmořskou výškou pak rostou i srážky. Sněhové srážky se na území Krkonoš vyskytují v průběhu celého roku. Souvislá sněhová pokrývka se ve středních horských polohách vyskytuje 135-160 dní v roce. Rozdíly v rozložení sněhové pokrývky jsou značné a závisí především na větrném proudění. V Krkonoších převládá západní až jihozápadní proudění. Největší síly dosahuje vítr v zimním období, nejslabší je pak v létě. Sníh se tak akumuluje v terénních depresích a v závětrích především ledovcových karů, kde často padají sněhové laviny.

Vegetace v Krkonoších je ovlivněna především klimatem a výškovou členitostí. Oblast Hanapetrovy paseky leží na rozhraní submontánního a montánního vegetačního stupně (obr. 6). Původní listnaté nebo smíšené lesy zde byly vykáceny a částečně nahrazeny smrkovou monokulturou (Správa KRNAP, 2010). Z listnatých zástupců se v submontánním vegetačním stupni vyskytuje javor, jasan, jeřáb, olše a na zkoumané lokalitě především buk.

**Obr. 6: Vegetace na zkoumaných lokalitách v Krkonoších**



### 3.2 Zdroje dat

Terénní průzkum vybrané lokality probíhal v zimní sezóně 2014/2015. Byla vytipována lokalita v centrálních Krkonoších, 6 km severovýchodně od Vrchlabí, Hanapetrova paseka. Tato lokalita byla vybrána z důvodu vyšší nadmořské výšky, a tudíž očekávané vyšší sněhové pokrývky, která je v posledních sezónách nejistá i ve vyšších polohách českých pohoří. Druhým důvodem výběru této lokality bylo shodné umístění automatické meteorologické stanice ČHMÚ (obr. 7). Stanice Hanapetrova paseka pod správou Českého hydrometeorologického ústavu měří teploměrem umístěným ve dvou metrech nad zemí teplotu vzduchu, sněhoměrným polštářem vodní hodnotu sněhu (SWE) a výšku sněhu (ultrazvukový senzor). Výška sněhu je také kontrolována měřením laserovým čidlem, které udává přesnější hodnoty v době intenzivních sněhových srážek. Veškerá data jsou na této stanici zaznamenávána v desetiminutovém kroku. Pro zpracování této diplomové práce byla poskytnuta data za období téměř pět a půl měsíce od 1.11.2014 do 15.4.2015.

**Obr. 7: Automatizovaná meteorologická stanice Hanapetrova paseka**



Samotný terénní průzkum probíhal v šesti dnech, které byly rovnoměrně rozmístěny do období 9.2.2015 až 10.4.2015 v závislosti na vývoji počasí. Dny vhodné pro měření byly vytipovány po období výraznější akumulace sněhové pokrývky nebo před a po dnech potencionálně vysokého úbytku sněhové pokrývky. V daném období, kdy probíhalo měření, lze rozpoznat dvě období akumulace, tedy 1.den měření 9.2.2015 a 5.den měření 4.4.2015. Ostatní dny měření lze zařadit spíše do období metamorfózy nebo tání sněhové pokrývky. Termíny těchto měření byly 22.2. 2015, 13.3.2015, 21.3.2015 a poslední měření proběhlo 10.4. 2015.

Pro zpracování diplomové práce byly vybrány dvě menší oblasti v dané lokalitě. Jedna oblast byla vymezena na otevřené ploše, druhá pak v převážně jehličnatém lese. Obě oblasti měly daný stejný rozsah 100 x 100 m. Měření výšky sněhu bylo stanoveno v kroku 5 m, což na jedné oblasti odpovídá 21 x 21 měřených bodů. Výška sněhu byla odečítána ze sněhoměrné tyče. V dané oblasti pak byla také měřena hmotnost sněhu váhovým sněhoměrem délky 150 cm a průřezu válce 50 cm<sup>2</sup>, ze které byla následně vypočítána vodní hodnota sněhu. Hmotnost sněhu byla měřena v pěti různých bodech rovnoměrně rozmístěných po dané oblasti.

Pro zhodnocení vlivu vegetace a solární radiace bylo využito hemisferických snímků. Tyto snímky zachycují 180° rozhled nad zemským povrchem (Matějka, 2015). Pro pořízení těchto fotografií je potřeba speciálního objektivu SIGMA 4,5 mm f/2,8 EX HSM DC Fisheye circular nazývaného rybí oko a výstupem jsou fotografie kruhového formátu zachycujícího pohled k zenitu (obr. 8). Focení v terénu probíhalo 23.4.2015 v době, kdy se v lokalitě nevyskytoval žádný sníh a vegetační kryt odpovídal obdobným podmínkám jako v průběhu zimní sezóny. V lesním porostu bylo pořízeno 25 hemisferických snímků s krokem 5m. Na otevřené ploše bylo vyfoceno 14 snímků se stejným krokem (obr. 13). Ve zbývajících bodech na otevřené ploše nebyl předpokládán žádný vliv vegetace, tudíž snímky nebyly pořizovány.

**Obr. 8: Ukázka hemisférických snímků v lese a na otevřené ploše pořízené rybí okem na Hanapetrově pasece**



Pro vytvoření mapových výstupů byla využita data Českého zeměměřičského a katastrálního úřadu v Praze. Úřad poskytl souřadnicová data (x, y, z) v textovém souboru pro zpracování digitálního modelu reliéfu 5. generace. Model je vytvořen ve spolupráci ČÚZK, Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství pomocí technologie leteckého laserového skenování. Systematická chyba generovaných bodů je podle technické zprávy DMR 5G vlivem generalizačních a filtračních metod u lesních porostů -0,06 m, na louce -0,03 m, úplná střední chyba u lesních porostů 0,13 a 0,16 na louce a maximální chyba 0,42 m v lese a 0,46 na louce (Brázdil, 2012).

Pro vytvoření obrazové dokumentace bylo použito softwaru ArcGIS 10.2 od americké firmy ESRI. Mapové vrstvy byly zobrazeny pomocí WMS služby z mapových serverů Národního portálu INSPIRE a Správy KRNAP.

### **3.3 Metodika zpracování dat**

#### **Zpracování měřených dat výšky sněhu**

Terénní data byla zpracována v programu QtiPlot. Byly vytvořeny grafy typu boxplot, ze kterých lze vyčíst 1. a 3. kvartil, medián, průměrnou hodnotu a minimální a maximální

výšku sněhové pokrývky v daném dnu měření na otevřené ploše nebo v lese. Z těchto dat byl dále vypočítán variační koeficient (rovnice 1), který je vhodný ke srovnávání variability dvou nebo více souborů s rozdílnou úrovní hodnot (Statistika a výpočetní technika, 2015). Rovnice má tvar:

$$V = \frac{100 \cdot s}{\bar{x}} \quad (1)$$

kde,  $V$  je variační koeficient [%],  $s$  je směrodatná odchylka a  $\bar{x}$  je aritmetický průměr.

Data výšky sněhu byla dále porovnáována v rozdílném měřítku. Stejně jako López-Moreno et al. (2014) hodnotí zkoumané povodí v různých velikostních gridech, byla i zde použita metoda porovnání rozdílných měřítek. Hodnocení bylo provedeno metodou pohybujícího se okna. Největší okno mělo velikost 10x10 měřených bodů, střední okno zahrnovalo 5x5 bodů a nejmenší 3x3 body. Jako výchozí byl brán polygon o rozměrech 100x100 m v kroku 5 m, tedy 21 x 21 měřených bodů v řadě. Pro každý posun okna byl vypočítán variační koeficient. Z výsledných hodnot bylo pro každé měřítko náhodným výběrem vybráno právě 100 hodnot. Tato data pak byla zpracována do výsledných grafů.

### **Zpracování digitálních dat v programu ArcGIS**

V programu ArcGIS 10.2 byla vytvořena shapefilová vrstva bodů naměřených laserovým skenováním, z ní pak následně TIN (triangulated irregular network), a rastr, který byl podkladem pro mapové výstupy výškové členitosti, sklonitosti, expozice reliéfu a dalších charakteristik dané oblasti. Dále bylo vypočítáno množství slunečního záření dopadajícího na zkoumané území v různých obdobích. Pro tento postup byl použit nástroj Area Solar Radiation, ve kterém lze určit na den přesnou dobu záření. Do výpočtů byly zadány hodnoty jak pro celou sezónu od 1.11. do 15.4., tak pro jednotlivá období mezi uskutečněnými měřeními. Do vytvořené bodové vrstvy měření sněhu byly připsány hodnoty rastrových výstupů (hodnoty sklonitosti, expozice, apod.) pomocí nástroje Extract multi values to point ze Spatial Analystu, tak aby data byla připravena ke statistickému zpracování multiregresní analýzy.

V programu ArcGIS 10.2 byla také vizualizována data z GPS přístroje, který byl používán při pořizování hemisferických snímků. Data na otevřené ploše byla rozprostřena rovnoměrně, v lesním porostu byla přesnost GPS omezena korunami stromů. Výsledné body

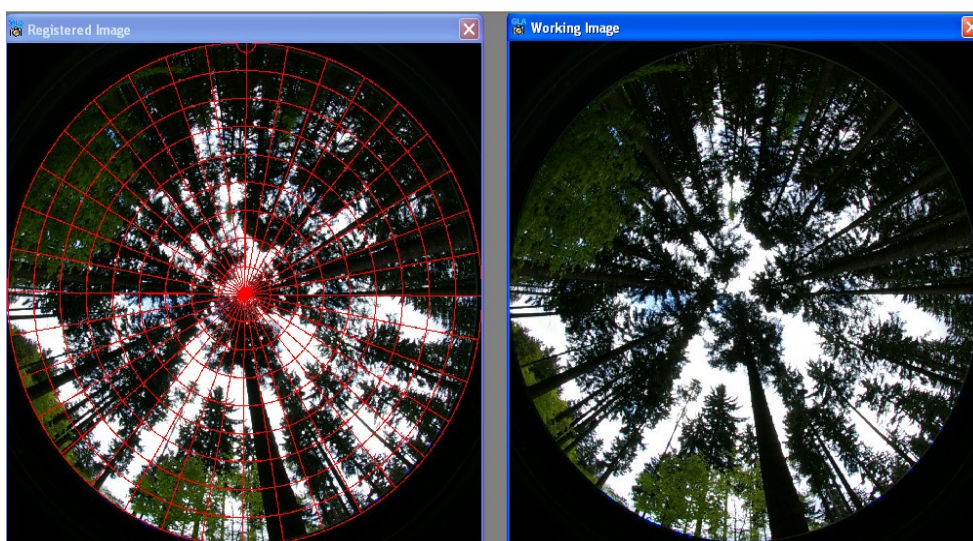
nejsou uspořádány do pravidelného polygonu, avšak na další zpracování dat tento faktor nemá žádný vliv.

### **Zpracování hemisferických snímků**

Pro analýzu hemisferických snímků byla použita volně dostupná verze GLA (Gap Light Analyzer). Tento software umí vypočítat z fotografických podkladů jednotlivé ukazatele solární radiace, vegetačního krytu a jejich změny v závislosti na zvoleném časovém období (Frazer et al., 1999). Podle manuálu GLA je pro analýzu jedné fotografie potřeba udělat 5 následujících kroků:

- otevřít obrázek – nahrát fotografii pořízenou v terénu
- provést registraci obrázku – při tomto procesu se určí geografická orientace a kruhový rozsah hemisferického snímku (obr. 9), vytvoří se dva obrázky (registrovaný a pracovní)
- provést konfiguraci obrázku – tato část zahrnuje nastavení orientace, projekční zkreslení, přesnou lokaci pořízení snímku, délku vegetační sezony a vybrané meteorologické parametry
- provést klasifikaci obrázku – tento proces zahrnuje rozdělení jednotlivých pixelů snímku do dvou kategorií: obloha (sky class) a ostatní (non-sky class) pomocí funkce Threshold
- vypočítat výsledky – v této fázi dojde k samotné kvantifikaci jednotlivých ukazatelů do tabulky.

**Obr. 9: Provedení registrace hemisferického snímku pomocí softwaru Gap Light Analyzer**



Ve výsledné tabulce najdeme několik ukazatelů vypočítaných pro daný hemisferický snímek.

Mezi výsledné parametry patří:

- % Sky Area – procentuální zastoupení oblohy nad efektivním horizontem (v tomto případě byla hodnota vždy 100 %, jelikož nebyla využívána topografická maska)
- % Mask Area – procentuální zastoupení oblohy, které je zakryto topografií (v tomto případě byla hodnota vždy 0 %, jelikož nebyla využívána topografická maska)
- % Canopy Openness – procentuální zastoupení oblohy viditelné z pod vegetačního pokryvu
- % Site Openness – procentuální zastoupení oblohy viditelné z pod vegetačního pokryvu a zároveň bere v potaz topografickou masku
- LAI 4 Ring – efektivní leaf area index vypočítaný v zenitovém úhlu 60°
- LAI 5 Ring – efektivní leaf area index vypočítaný v zenitovém úhlu 75°
- Units – jednotky užití pro vyjádření solární radiace pod a nad vegetačním pokryvem (v tomto případě bylo použito jednotek MJ.M<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>)
- RB a RD – jsou faktory naklonění dopadajícího paprsku (v tomto případě byla hodnota vždy 1)
- Extra – celkové množství dopadající krátkovlnné radiace na dané lokalitě
- Above Direct – množství přímého solárního záření dopadajícího na horizontální nebo šikmou plochu na zemském povrchu bez vlivu vegetace nebo topografie



- Above Diffuse – množství rozptýleného solárního záření dopadajícího na horizontální nebo šikmou plochu na zemském povrchu bez vlivu vegetace nebo topografie
- Above Total – je součet přímého a rozptýleného solárního záření dopadajícího na horizontální nebo šikmou plochu na zemském povrchu bez vlivu vegetace nebo topografie
- Above Direct Mask, Above Diffuse Mask, Above Total Mask – jsou parametry, které berou v potaz topografickou masku (ta zde nebyla použita, proto jsou hodnoty těchto parametrů shodné s předchozími Above Direct, Above Diffuse, Above Total)
- Trans Direct – absolutní množství přímého solárního záření ve vegetační sezóně pod vegetačním pokryvem a topografickou maskou ( $\text{MJ}\cdot\text{M}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
- Trans Diffuse - absolutní množství rozptýleného solárního záření ve vegetační sezóně pod vegetačním pokryvem a topografickou maskou ( $\text{MJ}\cdot\text{M}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
- Trans Total – je součet Trans Direct a Trans Total ( $\text{MJ}\cdot\text{M}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
- % Trans Direct – je poměr Trans Direct a Above Direct Mask násobený 100%
- % Trans Diffuse – je poměr Trans Diffuse a Above Diffuse Mask násobený 100%
- % Trans Total – je poměr Trans Total a Above Total Mask násobený 100%

### **Vícenásobná regrese**

Pro analýzu dat z terénního měření, dat z digitálního modelu reliéfu a meteorologických charakteristik byla vybrána regresní metoda, která slouží k určení závislosti mezi kvantitativními znaky spojitého typu a korelace, které určí sílu této závislosti (Zvára, 2008). V případě této práce bylo nutné použít mnohonásobnou lineární regresi (multiple linear regression), kde závislou veličinu vysvětlíme pomocí lineární kombinace více proměnných. Důležitým předpokladem v multilineární regresi je vzájemná nezávislost vysvětlujících proměnných. Pokud jsou nezávislé proměnné vzájemně silně korelovány, mluví se o problémech s multikolinearitou regresorů (Zvára, 2008). Pro vyloučení závislosti těchto proměnných byl vypočítán Spearmanův koeficient pořadové korelace na hladině významnosti  $p=0,05$ . Nezávislé veličiny byly testovány na normalitu dat pomocí Shapiro-Wilkova testu. Data, která tuto normalitu nesplňovala byla transformována odmocninou.

Proměnné vstupující do regresního modelu byly standardizovány pomocí Z-transformace, aby bylo následně možné srovnávat jednotlivé regresní koeficienty mezi sebou.

Standardizace dat byla vypočtena podle základní rovnice (1):

$$Y_{ij} = (X_{ij} - \text{prům } X_j) / s_j, \quad (1)$$

kde  $Y_{ij}$  je standardizovaná hodnota,  $X_{ij}$  je původní hodnota,  $\text{prům } X_j$  je průměr a  $s_j$  je směrodatná odchylka.

Mezi nezávislými prediktory byla hodnocena sklonitost terénu (ve stupních), křivost terénu, orientace svahu, sluneční radiace a leaf area index pro zenitový úhel 60°. Orientace svahu byla vyjádřena pomocí parametru „jižnost“, který vychází z metodiky Jeníčka, Pevné a Matějky (2015) a obdobné metodiky Josta et al., (2007). Parametr jižnost je vyjádřen pomocí rovnice (2) a dosahuje bezrozměrných hodnot v rozpětí od 1 (jih) do 0 (sever). Hodnoty 0.5 vymezují východní a západní orientaci.

$$\text{jižnost} = (\sin(\text{expozice} - (\pi / 2)) + 1) / 2 \quad (2)$$

Mezi vysvětlujícími proměnnými v multilineární regresi byla hodnocena výška sněhu (v cm) v daných lokalitách v šesti termínech měření, dále pak úbytek sněhu (v cm) mezi jednotlivými měřeními. Výsledkem multilineární regrese je rovnice (3), která popisuje vliv jednotlivých faktorů na sněhovou pokrývku.

$$\text{Závislé proměnné} = a + b * \text{sklon} + c * \text{jižnost} + d * \text{křivost} + e * \text{sluneční radiace} + f * \text{vegetace} \quad (3)$$

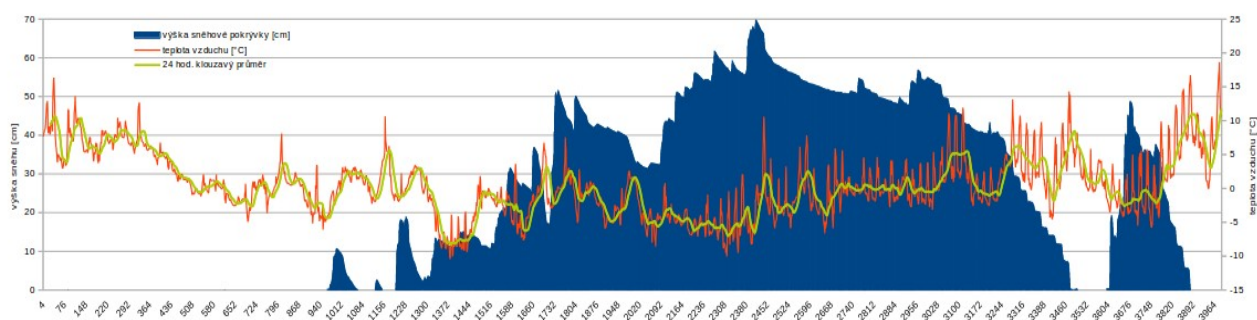
Parametry a, b, c, d, e, f jsou regresní koeficienty. Pro hodnocení vegetace byl použit leaf area index. Ostatní parametry z analyzovaných hemisferických snímků jsou na LAI závislé. Byl vybrán prediktor, který měl nejvyšší korelační koeficient mezi hodnocenými faktory získanými z hemisferických snímků.

## 4 Výsledky

### 4.1 Hodnocení klimatických podmínek a vývoje sněhové pokrývky v zimní sezóně 2014/2015

V následujících grafech jsou zobrazeny teploty vzduchu a vývoj sněhové pokrývky v sezóně 2014/2015. Z desetiminutových dat měřených na Hanapetrově pasece poskytnutých ČHMÚ jsou dobře pozorovatelné závislosti dvou proměnných - teploty vzduchu a výšky sněhové pokrývky (obr. 10). Průměrná teplota vzduchu za celé sledované období, tedy od 1.11.2014 do 15.4.2015, byla vypočítána na 0,5 °C a tomu odpovídá průměrná výška sněhové pokrývky 24 cm. Při porovnání s obdobími, kdy byla evidována sněhová pokrývka, se obě sledované hodnoty odlišují. Od 21.12.2015, tedy dne, kdy byly pozorovány první sněhové srážky zaznamenané na grafu se průměrná hodnota výšky sněhové pokrývky blížila ke 36 cm a teplota vzduchu byla vypočtena na hodnotu -0,7 °C.

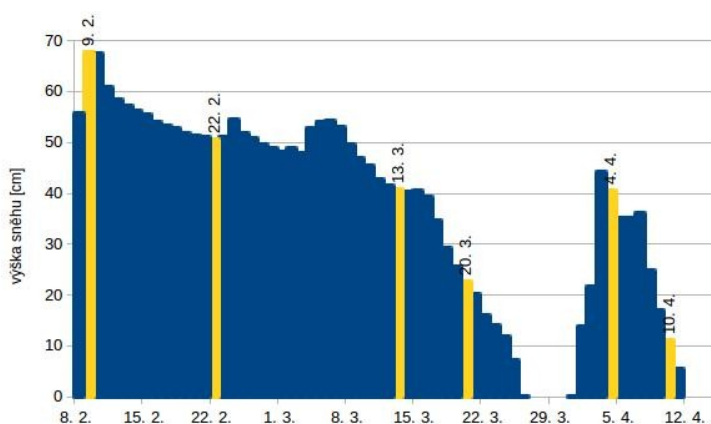
**Obr. 10: Vývoj teploty vzduchu a výšky sněhové pokrývky od 1.11.2014 do 15.4.2015 na meteorologické stanici Hanapetrova paseka**



Hodnocení měřené výšky sněhu je provedeno podle místa s různým typem vegetace (louka, les) a podle období akumulace nebo tání sněhové pokrývky. Mezi období akumulace byla zařazena dvě období. První měření v období akumulace bylo provedeno 9.2.2015, což odpovídalo i první výrazné akumulaci v průběhu zimní sezóny, průměrná naměřená výška tohoto měření na otevřené ploše byla 57,5 cm a v lese 45,1 cm. Druhé období akumulace bylo pozorováno 3.4.2015, kdy došlo k výrazné jednorázové akumulaci po roztátí téměř veškeré sněhové pokrývky na sledovaném území. Následující den 4.4. probíhalo předposlední měření. Tato dvě období akumulace jsou pozorovatelné z následujících grafů (obr. 10). Rozdíly

v průměrných výškách sněhové pokrývky první a druhé akumulace činí 22 cm na otevřené ploše, 15 cm v lese.

**Obr. 11: Výška sněhu na stanici Hanapetrova paseka od 8.2.2015 do 15.4.2015. Žluté sloupce označují termíny terénního měření**

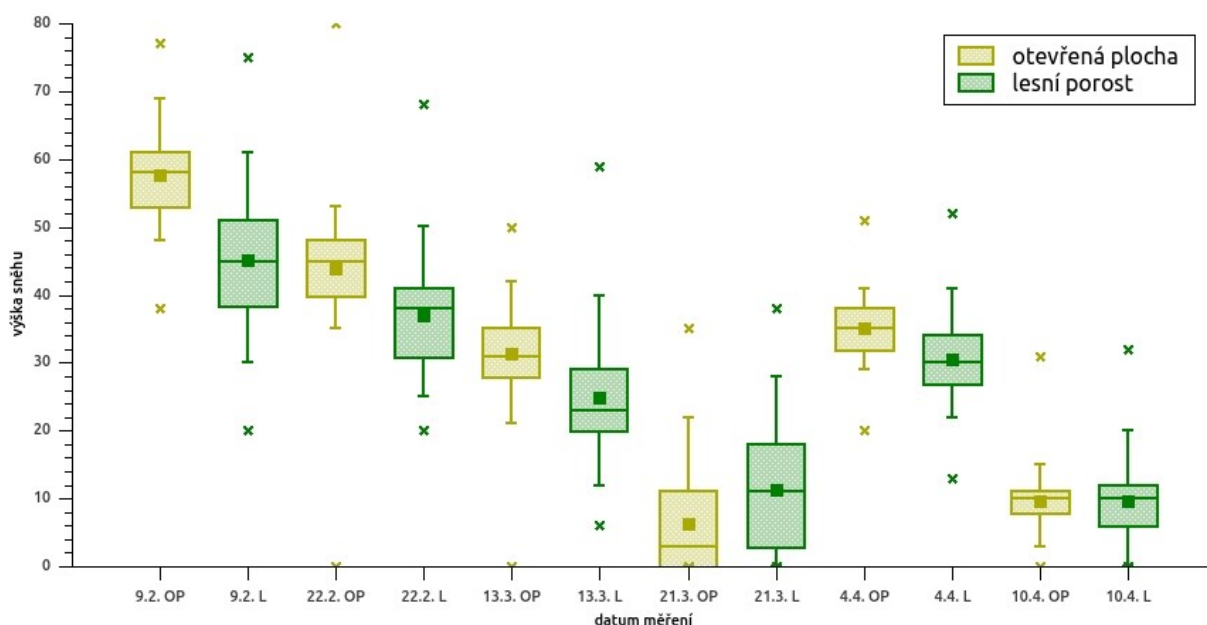


Výška sněhové pokrývky je závislá především na teplotě vzduchu. Ta se dlouhodobě v záporných hodnotách pohybovala před prvním dnem měření. S postupujícím únorem pak teplota vzduchu začala stoupat a pohybovala se v okolí 0 °C celý měsíc. Na začátku března byl zaznamenán několikedenní teplotní výkyv, kdy teplota vzrostla a opět klesla o 5,4 °C. Po druhé březnové dekádě došlo ke značnému oteplení, které, doprovázeno dešťovými srážkami, znamenalo výrazný pokles sněhové pokrývky. Přímo na meteorologické stanici byla hodnota výšky sněhu nulová, ale místy se sníh na zkoumané lokalitě stále držel.

První čtyři boxploty zobrazují postupný pokles sněhové pokrývky během února a března. Toto období bylo jediné, kdy území pokrývala souvislá sněhová pokrývky po delší dobu. Do konce března sněhová pokrývky postupně odtávala na otevřených plochách, v lesních porostech byl tento proces pomalejší. Tento jev je způsobem zastíněním sněhové pokrývky korunami stromů, tedy nižším přísunem slunečního záření na povrch sněhové pokrývky, a jarními oblevami, které vlivem intercepce zabraňují kontaktu dešťové vody s povrchem sněhu (Pobříšlová, Kulasová, 2000). Nové intenzivní sněhové srážky přišly na začátku dubna, avšak trvání sněhové pokrývky nebylo dlouhé. Při poslední měření 10.4. byla zaznamenána sněhová pokrývky před úplným roztáním (obr. 11).

Na obrázku (12) jsou viditelné rozdíly v množství akumulovaného sněhu jak na začátku pozorovaného období (9.2.2015), tak v poslední fázi akumulace 4. dubna na otevřené ploše i v lese. Maximální hodnoty výšky sněhu v těchto měřeních byly téměř 80 cm v únoru, resp. 51cm v dubnu na otevřené ploše. V lese se maximální hodnoty výšky sněhu dostaly k 75 cm, resp. 52 cm ve stejných měsících jako při hodnocení na otevřené ploše. V prvním období akumulace je rozdíl mezi akumulací v lese a na otevřené ploše větší než v období druhé akumulace 4. dubna. Tento jev může být způsoben minimálním zůstatkem sněhové pokrývky v lese z doby před akumulací. Dále byla na otevřených plochách v období akumulace vždy pozorována vyšší vrstva sněhové pokrývky, což potvrzuje i jednu z hypotéz. Variabilita výšky sněhové pokrývky na otevřené ploše od lesní plochy je různá ve všech termínech měření. Větší rozptýlení hodnot vykazují hodnoty měřené v lesním porostu (tab. 1), což je způsobené vegetací, která zabraňuje pravidelnému ukládání sněhové pokrývky pod korunami stromů. V místech s vysokým korunovým zápojem, v blízkosti kmenů vznikají deprese, ve kterých se akumulováno menší množství sněhu.

**Obr. 12: Statistické hodnocení výšky sněhu na Hanapetrově pasece v termínech terénního měření** Grafy zobrazují numerická data pomocí kvartilů. Vodorovné linie zobrazují 1. kvartil (25 % hodnot), medián a 3. kvartil (75 % hodnot). Svislé linie zobrazují minimální a maximální hodnotu a extrémní hodnoty jsou zobrazeny křížkem. Z grafu lze ještě vyčíst průměr, který je zobrazen plným čtverečkem.



Při porovnání variability v období tání (22.2., 13.3., 21.3. a 10.4.) je také znatelný rozdíl ve výšce sněhové pokrývky jak na otevřené ploše, tak v lesním porostu. Tento rozdíl je způsobený především výrazným rozdílem teploty vzduchu, který je zapříčiněn orientací svahu a pokryvem lesní vegetací (Jost et al., 2007). Vyšší variabilita se vyskytuje v rámci měření v lesním porostu. Ta je způsobena rozdílnou vzdáleností měření od kmene stromů, hustotě vegetace a v některých místech může být ovlivněna i typem vegetačního pokryvu. Nejvýraznější je variabilita z měření 21.3.2015. Podle výsledků z tabulky (1) můžeme pozorovat rostoucí variabilitu výšky sněhu zvyšující se v závislosti na době trvání sněhové pokrývky. Čím je pozdější měření v době tání, tím je větší variabilita sněhové pokrývky. Tento jev platí jak pro data na otevřené ploše, tak pro data v lesním porostu. Velmi malá variabilita sněhové pokrývky byla zaznamenána v období posledního tání (10.4.2015) na otevřené ploše i v lesním porostu. Vysvětlením je krátká doba, která uplynula od akumulace k době měření a neměnné meteorologické podmínky. Za sedm dnů mezi akumulací a táním byla měřena vysoká teplota vzduchu a zaznamenán i výrazný vliv sluneční radiace. Právě vlivem radiace můžeme pozorovat i vyšší variabilitu sněhové pokrývky v lese. Nízká je i variance (rozptyl) daných měřených hodnot v posledních termínech měření. Měřené hodnoty výšky sněhu jsou tak ve statistickém souboru málo rozptýleny od jeho střední hodnoty.

**Tab. 1: Číselné vyjádření vybraných statistických ukazatelů měření výšky sněhové pokrývky**

<b>Měření LOUKA</b>	<b>průměr</b>	<b>směr. odchylka</b>	<b>variační koef.</b>	<b>variance</b>	<b>max</b>	<b>min</b>
<b>09.02.2015</b>	57,44	7,23	0,13	52,22	77	0
<b>22.02.2015</b>	43,95	6,75	0,15	45,53	80	0
<b>13.03.2015</b>	31,41	6,39	0,20	40,79	50	0
<b>21.03.2015</b>	6,22	7,66	1,23	58,68	35	0
<b>04.04.2015</b>	34,99	3,87	0,11	14,98	51	20
<b>10.04.2015</b>	9,54	3,97	0,42	15,77	31	0

<b>Měření LES</b>	<b>průměr</b>	<b>směr. odchylka</b>	<b>variační koef.</b>	<b>variance</b>	<b>max</b>	<b>min</b>
<b>09.02.2015</b>	45,14	9,45	0,21	89,34	75	20
<b>22.02.2015</b>	36,96	8,42	0,23	70,87	68	20
<b>13.03.2015</b>	24,86	8,25	0,33	68,12	59	6
<b>21.03.2015</b>	11,30	8,87	0,79	78,76	38	0
<b>04.04.2015</b>	30,57	5,72	0,19	32,67	52	13
<b>10.04.2015</b>	9,60	5,73	0,60	32,85	32	0

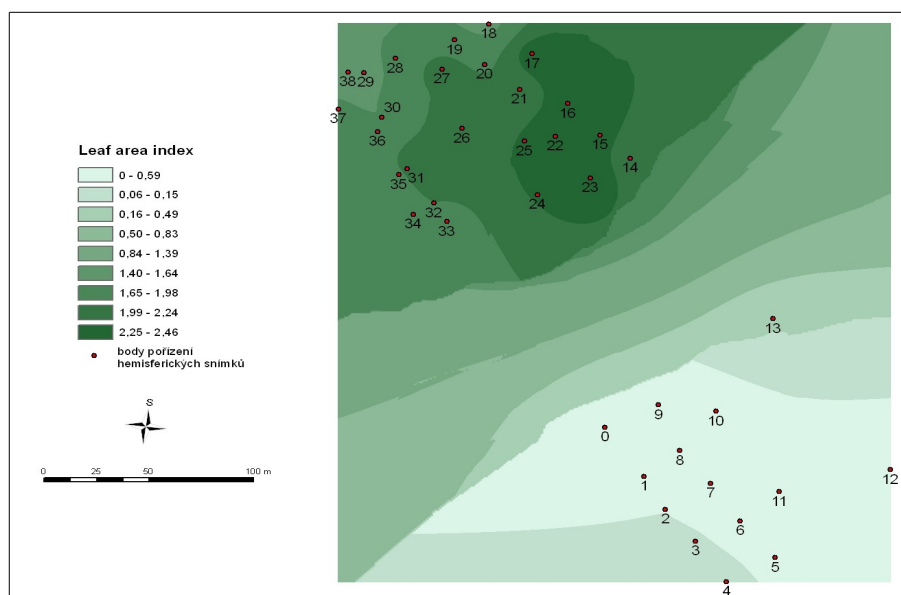
## 4.2 Hodnocení vlivu vybraných faktorů na změnu sněhové pokrývky v zimní sezóně 2014/2015

### Leaf area index

LAI je bezrozměrný parametr, vypočtený jako poměr listové plochy a příslušné půdorysné plochy (Watson, 1947). Tento faktor závisí na druhovém složení porostu, vývojové etapě, převažujících stanovištních faktorech, sezónnosti a způsobu hospodaření v lese (Myneni et al., 1997). Je definován jako dynamický, jelikož se jeho výsledné hodnoty mění v průběhu celého roku (převážně na jaře a na podzim) a pak také v průběhu let.

Nepřímou metodou hodnocení LAI byla analyzována i zkoumaná oblast v Krkonoších. 38 hemisferických snímků, jejichž poloha je zobrazena na obrázku (13), poskytuje podrobnou analýzu solární radiace ovlivňující sněhovou pokrývku. Při analýze hemisferických snímků na otevřené ploše se prokázal minimální vliv vegetace. Lesní porost se k vymezenému území přibližuje v linii západ – jih a v počátečním bodě měření, což je nejzápadnější bod v lokalitě na otevřené ploše. Právě zde jsou dané hodnoty vyšší v porovnání v ostatními místy pořízení hemisferických snímků. Hodnoty LAI se celkově pohybovali v rozmezí 0 – 0,19 na otevřené ploše.

**Obr. 13: Místa pořízení hemisferických snímků na Hanapetrově pasece a hodnoty leaf area indexu zobrazené interpolační metodou Kriging**



Pro lesní stanoviště se hodnoty leaf area indexu pohybovali v rozmezí 1,47 – 2,47 (tab. 2). Hodnoty LAI v lese vykazují značné rozpětí, což je způsobeno především různým stupněm zapojení v jednotlivých bodech měření. Obdobným parametrem pro hodnocení vegetace je Canopy openness (%), což je procentuální podíl viditelné části oblohy nezakryté vegetací. Canopy openness je nepřímě závislý na LAI a byl vypočítán pomocí softwaru Gap Light Analyzer.

**Tab. 2: Hodnocení vegetačního porostu na Hanapetrově pasece ve zkoumaném období**

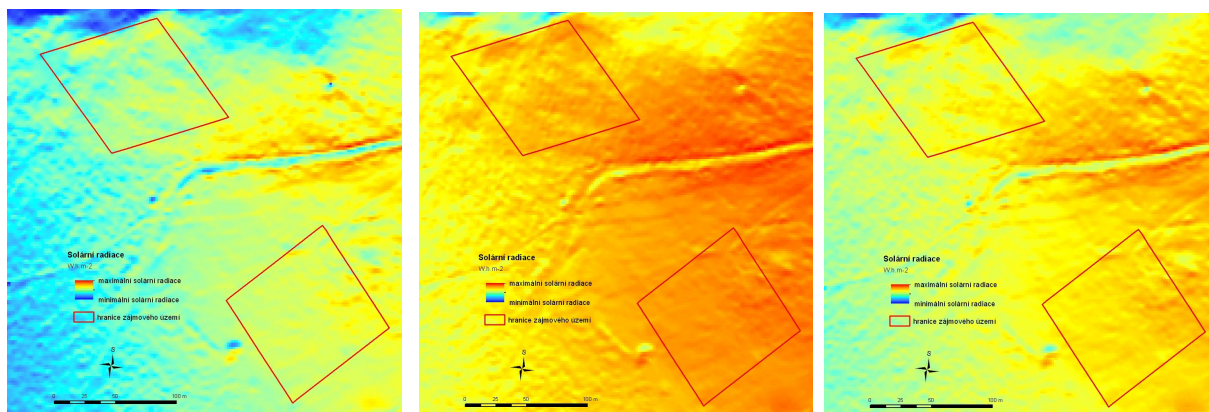
Otevřená plocha	Canopy Openness %	LAI	Lesní vegetace	Canopy Openness %	LAI	Lesní vegetace	Canopy Openness %	LAI
0	93,56	0	14	16,96	2,05	28	22,33	1,76
1	91,57	0,01	15	13,88	2,35	29	24,49	1,48
2	82,94	0,06	16	14,85	2,34	30	21,32	1,65
3	80,82	0,08	17	14,42	2,47	31	15,64	2,17
4	80,89	0,12	18	28,26	1,47	32	17,53	1,98
5	94,79	0	19	23,24	1,81	33	19,29	1,81
6	95,48	0	20	19,26	1,93	34	17,5	1,89
7	95,83	0	21	15,82	2,03	35	20,67	1,83
8	96,87	0	22	11,55	2,42	36	21,5	1,77
9	96,22	0	23	11,98	2,45	37	23,41	1,7
10	97,04	0	24	13,26	2,28	38	24,83	1,56
11	97,64	0	25	13,26	2,28			
12	94,46	0	26	15,07	2,1			
13	81,44	0,19	27	15,92	2,13			

## Sluneční radiace

Sluneční radiace je dalším z významných faktorů, který ovlivňuje změny sněhové pokrývky. Podle Atlasu krajiny České republiky (Hrnčiarová, Mackovčín, Zvara et al., 2007) se hodnoty roční insolace ve zkoumané oblasti pohybují v rozmezí 1500 – 1600 Wm<sup>-2</sup>. Množství dopadající slunečního záření v průběhu zimní sezony výrazně roste směrem k jarnímu období (obr. 14). Závisí ovšem také na výskytu oblačnosti v daném období. Na množství dopadajícího slunečního záření má značný vliv variabilita terénních odlišností (Kumar et al., 2014). Jižně orientované svahy na severní polokouli mají vyšší přísun radiace než severně orientované svahy v zimním období. U orientace východ – západ jsou zaznamenané rozdíly během dne. Východní svahy mají vyšší přísun v ranní hodinách, západní svahy pak v odpoledních hodinách.



**Obr. 14: Změna sluneční radiace ve vybraných obdobích zimní sezony na Hanapetrově pasece.** Obrázek (a) znázorňuje přísun teoretické sluneční radiace (bez vlivu oblačnosti apod.) za období od 11.12. do 8.2., obrázek (b) od 4.4. do 9.4. a obrázek (c) za celou dobu pozorování 1.11. až 15.4.



V programu GLA byla vypočtena průměrná insolace v období listopad až duben na  $163,78 \text{ Wm}^{-2}$ . Obdobné množství dopadajícího slunečního záření bylo přijato za 12denní období v únoru, z čehož vyplývá, že intenzita dopadu slunečních paprsků se musela intenzivně zvýšit (obr. 16). Množství dopadajícího slunečního záření v přepočtu na den roste od února, kdy bylo vypočteno  $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , do dubna, kde hodnota sluneční radiace bez vlivu oblačnosti dosahuje  $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Všechny tyto výpočty v sobě nemají zahrnutou přesnou statistiku oblačnosti v jednotlivých dnech. V programu GLA byl zadán parametr, který nahrazuje právě tento chybějící parametr průměrným koeficientem.

Hodnocení dopadajícího záření, které projde skrz vegetaci bylo hodnoceno taktéž v programu GLA. Analýzou hemisferických snímků byl vypočtený parametr Trans Total %, který vyjadřuje podíl přímého i rozptýleného krátkovlnného záření, které projde skrz vegetaci. Nejvyšší podíl dopadajícího záření samozřejmě vykazují hodnoty na otevřené ploše (tab. 3). 100% podíl vykazují body, které leží uprostřed otevřené plochy, kam nezasahuje zastínění vegetace v žádném okamžiku sledovaného období. Snížený podíl dopadajícího záření pak vykazují body, které leží při linii západ-jih, která je lemovaná lesním porostem. Zde se nepatrný vliv zastínění projeví. Z průměrných hodnot za určité sledované období můžeme vidět postupující nárůst podílu dopadajícího záření, který je způsobený měnící se dráhou pohybu slunce po obloze.

**Tab. 3: Podíl přímého i rozptýleného krátkovlnného záření prostupující skrze vegetaci na otevřené ploše na Hanapetrově pasece. Zvýrazněny jsou hodnoty, kde je nižší podíl dopadajícího záření**

OP	1.11.	11.12.	11.12.	9.2.	22.2.	13.3.	21.3.	4.4.	10.4.
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15.4.	15.4.	8.2.	21.2.	12.3.	20.3.	3.4.	9.4.	15.4.
0	99	99	99	99	99	99	99	99	99
1	85	88	67	85	94	98	98	98	98
2	79	81	69	79	83	86	87	87	88
3	73	75	62	71	76	80	83	85	87
4	74	76	68	73	76	77	79	83	85
5	99	99	99	98	98	99	99	99	99
6	99	99	98	99	99	99	99	100	100
7	99	99	99	99	99	99	99	100	100
8	100	100	99	100	100	100	100	100	100
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100
12	99	99	99	99	99	99	99	99	99
13	94	94	94	94	94	94	94	94	94
<b>průměr</b>	<b>93</b>	<b>93</b>	<b>89</b>	<b>93</b>	<b>94</b>	<b>95</b>	<b>95</b>	<b>96</b>	<b>96</b>

Stejné hodnocení bylo provedeno i v lesním porostu. V porovnání s obrázkem interpolovaných hodnot LAI (obr.x) můžeme pozorovat nepřímou závislost mezi těmito dvěma faktory. S rostoucí hodnotou LAI klesá podíl dopadajícího slunečního záření prostupující skrze vegetaci. V tabulce (4) jsou nejvýraznější žlutou barvou zobrazeny body, ve kterých dosahuje podíl dopadajícího slunečního záření hodnot mezi 30 – 40 % a 40 - 50 %, čemuž odpovídají nejnižší hodnoty LAI. Ve výpočtu dopadajícího slunečního záření je také zahrnut parametr jižnosti, který také ovlivňuje množství dopadajícího záření na danou lokalitu.

**Tab. 4: Podíl přímého i rozptýleného krátkovlnného záření prostupující skrze vegetaci v lesním porostu na Hanapetrově pasece. Zvýrazněny jsou hodnoty, kde je vyšší podíl dopadajícího záření. Čím vyšší podíl záření, tím je hodnota zobrazena výrazněji žlutou barvou.**

LES	1.11.	11.12.	11.12.	9.2.	22.2.	13.3.	21.3.	4.4.	10.4.
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15.4.	15.4.	8.2.	21.2.	12.3.	20.3.	3.4.	9.4.	15.4.
14	19	20	16	15	16	19	24	26	28
15	18	18	15	16	19	21	18	19	19
16	16	17	14	16	17	17	18	18	19
17	20	20	22	23	20	19	19	17	17
18	37	38	32	34	37	39	43	46	43
19	28	29	24	27	30	28	31	35	35
20	24	23	24	25	24	22	23	22	21
21	18	19	15	17	22	22	20	22	20
22	14	15	12	15	13	13	18	17	16
23	15	15	13	13	14	16	18	18	14
24	15	15	14	14	14	16	17	17	17
25	15	15	14	14	14	16	17	17	17
26	16	16	16	15	14	15	15	17	18
27	21	20	23	23	17	16	19	21	22
28	32	32	33	27	28	31	36	32	32
29	31	31	29	29	28	32	34	35	37
30	23	24	17	19	22	24	29	32	34
31	17	18	13	15	18	18	19	23	23
32	21	22	15	19	23	25	25	26	27
33	21	21	17	19	22	20	23	25	26
34	17	17	15	17	17	18	19	19	19
35	21	22	18	21	23	25	25	24	24
36	28	28	28	30	28	29	28	27	25
37	25	26	22	26	27	28	29	27	25
38	31	31	31	30	30	30	31	31	30
průměr	22	22	20	21	22	22	24	25	24

### 4.3 Hodnocení variability sněhové pokrývky v závislosti na environmentálních proměnných v zimní sezóně 2014/2015

Hodnocení variability sněhové pokrývky na vybraných proměnných bylo provedeno v programu Statistica 10. Z analýzy by měla být vynechána data, která podle Spearmanova koeficientu pořadové korelace vykazují multikolinearitu regresorů. Tyto korelace by pak následně zkreslovaly míru ostatních závislostí. Závislost jižnosti na sklonitost se jeví jako

náhodná, proto byly oba prediktory v regresi ponechány. Z hodnocení pak byla vynechána radiace, která vykazovala závislost na sklonitosti na otevřené ploše. Podle výpočtů v programu Statistica 10 byla zjišťována závislost mezi výškou sněhu na otevřené ploše, v lese a v jejím úbytku mezi jednotlivými měřeními v závislosti na vybraných faktorech. Za statisticky signifikantní (na hladině významnosti  $p=0,05\%$ ) lze považovat označená pozorování v tabulce (5). Míra závislosti je u většiny proměnných velice nízká, závislost tedy nelze prokázat.

**Tab. 5: Signifikantní významnost nezávislých proměnných na výšce sněhu a jejich rozdílech mezi jednotlivými měřeními v sezóně 2014/2015. Spearmanův koeficient na hladině významnosti  $p=0,05\%$  hodnotí proměnné O1 až O6 (resp. L1 až L6), které vyjadřují výšku sněhu v jednotlivých měřeních a rozdíl mezi měřeními (např. O1-2, L2-3).**

#### LOUKA

Spearman	sklon	jižnost	křivost	radiace	LAI	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O1-2	O2-3	O3-4	O4-5	O5-6
sklon	x		0,19	0,92				-0,18	-0,20	-0,17	-0,31		0,15	0,12	-0,13	0,11
jižnost		x	0,18	0,28	0,26	0,22		-0,19	-0,22			0,18	0,17		-0,16	
křivost	0,19	0,18	x	0,24	0,34	0,14		-0,23	-0,23		-0,10	0,16	0,16		-0,18	0,10
radiace	0,92	0,28	0,24	x				-0,23	-0,26	-0,20	-0,33		0,19	0,13	-0,16	0,11
LAI		0,26	0,34		x	0,12			-0,18							-0,12

#### LES

Spearman	sklon	jižnost	křivost	radiace	LAI	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L1-L2	L2-L3	L3-L4	L4-L5	L5-L6
sklon	x	1,00	-0,23	0,10	-0,13	-0,32										-0,10
jižnost	1,00	x	-0,23	0,10	-0,13	-0,32										-0,10
křivost	-0,23	-0,23	x		0,55	0,74	0,41	0,49	0,25	0,35	0,35			0,12		
radiace	0,10	0,10		x										-0,09		
LAI	-0,13	-0,13	0,55		x	0,56	0,15	0,22		0,23	0,15			0,21	-0,16	

Ve výsledcích krokové dopředné (stepwise forward) regrese je vypočítán vícenásobný koeficient korelace R, vícenásobný koeficient determinace  $R^2$  a další charakteristiky. Z výsledků multilineární regrese je obecně vysvětlena velmi malá závislost proměnné na sadě prediktorů. Koeficient determinace vysvětluje, jak velké množství variance závislé proměnné je vysvětleno sadou zvolených prediktorů. Hodnoty koeficientu determinace  $R^2$  vysvětlují maximálně 38 % variability dat. Významněji je hodnocena závislost lesní vegetace na environmentálních faktorech, kdy se hodnota  $R^2$  pohybuje mezi 9 – 38 %. Procentuální závislost dat z otevřené plochy dosahuje maximálně 10 %, což nelze považovat, za jakoukoliv

závislost. Obdobně nízké hodnoty pak vykazují koeficienty, kde je porovnáván úbytek výšky sněhu v závislosti na environmentálních faktorech.

Dále byla počítána závislost mezi vysvětlujícími proměnnými a prediktory. Pro otevřenou plochu se mezi nejlépe vysvětlující proměnnou zařadila sklonitost a jako signifikantní byla hodnocena i jižnost (tab. 6). Hodnocení rozdílů výšky sněhu v závislosti na daných prediktorech nepřineslo výraznější zhodnocení závislostí.

Hodnocení pro lesní vegetaci dosahuje lepších výsledků prokázání závislosti mezi závislými proměnnými a prediktory. Jako nejčastěji signifikantní prediktor byla hodnocena křivost terénu a to ve všech 6 případech měření. Závislost se pohybovala od 27 do 53 %. Mezi výškou sněhu a křivostí terénu byla vyhodnocena jako pozitivní závislost, což znamená, že s rostoucí křivostí terénu roste i výška sněhu. Křivost terénu v lese byla výraznější, proto se i tento parametr v této statistice jeví jako významný prediktor. Dále byla taky signifikantně významná i sklonitost, LAI a také radiace. Pro hodnocení rozdílů výšky sněhu také nebyly dané prediktory hodnoceny jako významné obdobně jako na otevřené ploše.

**Tab. 6: Signifikantní regresní koeficienty pro otevřenou plochu (O) a lesní porost (L)**

<b>O1</b>		<b>b</b>	<b>L1</b>		<b>b</b>
	jižnost	0,14		křivost	0,44
<b>O3</b>				LAI	0,21
	křivost	-0,20		sklonitost	-0,10
	jižnost	-0,15	<b>L2</b>		
	sklonitost	-0,09		křivost	0,44
<b>O4</b>				sklonitost	0,47
	sklonitost	-0,20	<b>L3</b>		
	křivost	-0,15		křivost	0,53
	jižnost	-0,10	<b>L4</b>		
<b>O5</b>				křivost	0,39
	sklonitost	-0,11		LAI	-0,20
<b>O6</b>			<b>L5</b>		
	sklonitost	-0,23		křivost	0,27
	jižnost	-0,13	<b>L6</b>		
<b>O1-2</b>				křivost	0,37
	jižnost	0,15		jižnost	0,14
<b>O3-4</b>			<b>L1-2</b>		
	sklonitost	0,13		křivost	-0,17
				LAI	0,15
			<b>L3-4</b>		
				radiace	0,12

#### 4.4 Hodnocení variability sněhové pokrývky v různých velikostních měřítkách

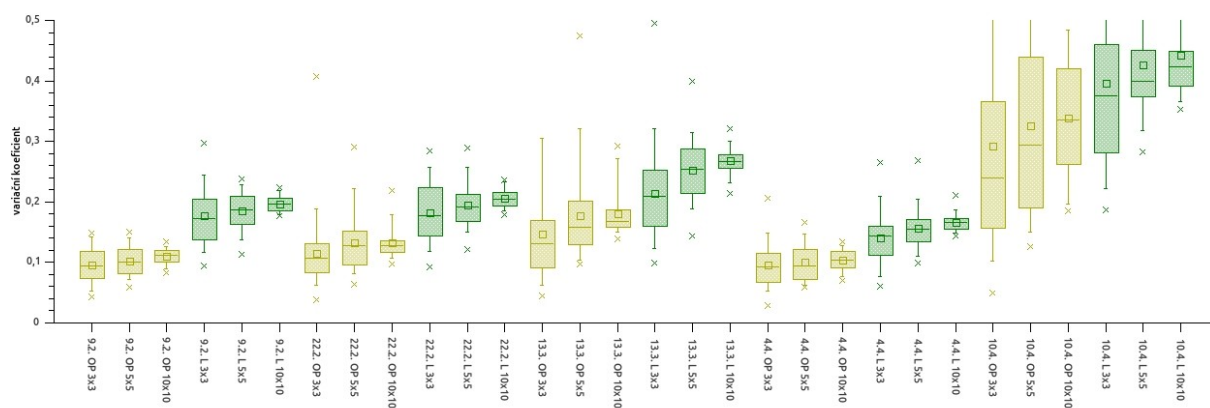
Sněhová pokrývky je charakterizována vysokou variabilitou v různých velikostních měřítkách (López-Moreno et al., 2014). Pro zhodnocení variability sněhové pokrývky na zkoumaném území v Krkonoších byla srovnána 3 velikostní měřítka jak pro les, tak i otevřenou plochu. Byla definována měřítka podle počtu bodů zapojených do analýzy pohybujícího se okna. Velikost okna byla stanovena na 3x3, 5x5 a 10x10 bodů. Z grafu bylo vynecháno terénní měření 21.3., které vykazovalo velmi odlišné hodnoty od ostatních.

Nízké variační koeficienty sněhové pokrývky byly vypočteny pro dobu nejvyšší akumulace sněhu, tedy 9.2. a 4.4. Hodnoty se zde pohybovaly v rozmezí od 0,03 do 0,31. Zde je zaznamenáno také nejméně odlehlých hodnot, jelikož při akumulaci není výrazný faktor, který by způsoboval odlehlost hodnot. V době výrazného tání pak v rámci povodí zaznamenáváme největší variabilitu. Hodnoty variančních koeficientů 21.3. v rozmezí 0,15 až

4,9 nejsou ani zobrazeny v obr. (15). Tyto hodnoty výrazně odlišné od ostatních termínů měření se vyznačují vysokou variabilitou.

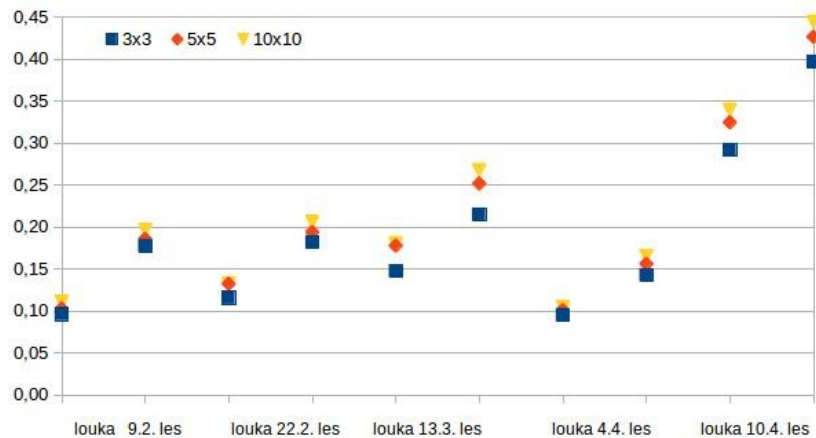
Při hodnocení vlivu měřítka lze pozorovat nejnižší variabilitu variačního koeficientu v prostorovém měřítku 10x10 bodů, a to jak v době tání, v době akumulace, na otevřené ploše i v lesním porostu. U velikostního měřítka 3x3 body a 5x5 bodů je již interpretaci nutné rozdělit. V době akumulace jsou hodnoty variačního koeficientu vyrovnané na otevřené ploše. V lese se pak vyskytuje vyšší variační koeficient v detailnějším měřítku v porovnání s otevřenou plochou jak v době tání, tak v době akumulace. S rostoucí velikostí hodnocené plochy tedy klesá hodnota variabilita výšky sněhu. U většího měřítka tento jev nelze pozorovat.

**Obr. 15: Variační koeficienty pro tři měřítka (3x3, 5x5 a 10x10 bodů) na Hanapetrově pasece v zimní sezoně 2014/2015**



Obrázek (16) zobrazuje průměry variačních koeficientů pro dny měření v měřítku 3x3, 5x5 a 10x10 bodů hodnoceného polygonu. Z tohoto grafu lze pozorovat rostoucí hodnotu koeficientu variace s rostoucím velikostním měřítkem. Rozdíly mezi měřítka jsou minimální, ale jsou dobře pozorovatelné. Hodnoty pro měřítko 3x3 se pohybují v rozmezí 0,09 až 0,39 a dále rostou od 0,1 po 0,43 (5x5 bodů), respektive 0,11 až 0,44 (10x10 bodů). Obecně lze také stanovit, že s vyšší sněhovou pokrývkou byla pozorována nižší variabilita koeficientu variace nezávisle na velikosti měřítka. Měření, kterým předcházelo období tání, dosahovaly vyšších hodnot koeficientů variace. Naopak období akumulace mají hodnoty variačních koeficientů nižší.

**Obr. 16: Průměrný koeficient variace pro každé terénní měření ve třech měřítkách**





## 5 Diskuze

Před závěrečným hodnocením je potřeba vzít v úvahu možnost výskytu chyb, které mohly ovlivnit správnost výsledků. Chybová data mohou vzniknout jak při měření v terénu, tak při následném zpracování dat. Měření výšky sněhu v lokalitě Hanapetrova paseka je potencionálně nejvyšším rizikem vzniku chyb. Zde mohlo dojít k posunutí místa měření konkrétního bodu od polohy v předchozím měření. Na otevřené ploše s tímto jevem nebyl problém, jelikož ve většině případů byly vidět vpichy od sněhoměrné tyče z předchozího měření. V lesním porostu bylo měření obtížnější. Orientace mezi vzrostlými stromy byla náročnější a bylo zde i méně viditelných míst předchozích měření. Při odečítání výšky sněhu je velice subjektivní i pohled měřitele. Ten byl zčásti eliminován mojí vizuální kontrolou při účasti na všech termínech měření. Poskytnutá data výšky sněhu a teploty vzduchu v zimní sezoně 2014/2015 Českým hydrometeorologickým ústavem nebyla validována. Tyto hodnoty se tak mohou také mírně lišit od skutečných hodnot. Chyby vzniklé při zpracování dat jsou spíše technického charakteru. Při výpočtech dochází například k zaokrouhlování dat. Další chyby by pak měly být již eliminovány nebo odstraněny při opakované kontrole dat a důslednými pracovními postupy.

V rešeršní části je důležitým zdrojem především zahraniční literatura. Obdobnými tématy, jako je tato diplomová práce, se zabýval López-Moreno a Stähli (2008), kteří zkoumali vliv topografie a lesa na variabilitu sněhové pokrývky, López-Moreno (2014) ve spolupráci s dalšími autory pak zkoumali vliv měřítka na variabilitu sněhové pokrývky. Dále Jost et al. (2007) ve spolupráci vybranými autory se taktéž zabývali vlivem lesa a topografie na akumulaci a tání sněhové pokrývky. O obecné charakteristiky sněhové pokrývky se zajímal DeWalle a Rango (2008), Singh a Singh (2001) a mnozí další. Z české literatury se tématu vlivu vegetace na akumulaci a tání sněhové pokrývky věnoval Jeníček ve spolupráci s Taufmanovou (2010) nebo Pevnou a Matějkou (2015). Dalším důležitým zdrojem české literatury byla práce Pobříslové a Kulasové (2000), která porovnává akumulaci a tání sněhu v lese a na odlesněných partiích Jizerských hor. Metodicky obdobný postup byl využit jako v práci Klivanové (2013), která se zabývala prostorovým rozlišením sněhové pokrývky v alpském bezlesí v Krkonoších.

Zimní sezona 2014/2015 byla vyhodnocena jako mírná s významnou akumulací sněhu ve své druhé polovině. Nástup zimy byl pozvolný, stejně jako v předchozích letech.

Hodnocení teploty vzduchu v porovnání s dlouhodobým průměrem ukazuje na prosincové podnormály (ČHMÚ, 2015). Úhrn srážek se pohyboval na 70 % dlouhodobého srážkového normálu z let 1961-1990. Hodnoty teploty vzduchu pro Královehradecký kraj vykazují výrazné odchylky od normálu v měsíci lednu a únoru. Teploty byly v průměru až 4° C nad normálem. Tento rozdíl se pak s postupující sezonou zmenšoval. V dubnu se odchylka od dlouhodobého průměru pohybovala již pouze 1° C. Naopak rozdílné hodnocení ukazuje úhrn srážek. Lednové a březnové úhrny srážek se pohybují nad 120 % normálu z let 1961-1990. Únor je pak v Královehradeckém kraji hodnocen jako podprůměrný, s celkovým úhrnem 21 % srážek od 30letého normálu. První akumulace sněhové pokrývky se vyskytla ve třetí dekádě, maximum bylo dosaženo 9. února. Dále už pak docházelo k postupnému tání s výjimkou prvních pěti dubnových dnů, kdy došlo k druhé významné akumulaci sněhové pokrývky.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo terénní měření výšky sněhu a následné zpracování, které by ukázalo vliv vysvětlujících proměnných na akumulaci a tání sněhové pokrývky. Výška sněhu byla měřena pouze v jedné sezoně 2014/2015. To je první odlišnost od většiny zpracovaných prací na dané téma. Ostatní autoři vycházeli z porovnání alespoň dvou sezon (López-Moreno et al., 2014, Jost et. al., 2007, Jeníček et al., 2012). Avšak 6 terénních měření se jeví jako dostačující pro zhodnocení právě jedné sezony, tedy dvou období akumulace a čtyř období tání. V rámci jednoho termínu měření bylo na otevřené ploše a v lese změřeno necelých 900 hodnot výšky sněhu. Počet a rozmístění bodů bylo vybráno tak, aby se měření mohla uskutečnit v jeden den a byly tak zajištěny srovnatelné klimatické podmínky. Měřená data pak byla vyhodnocena obdobně jako v práci Klivanové (2013), tedy regresní analýzou výšky sněhu a proměnných z digitálního modelu terénu 5G. Další náměty na metodické zpracování byly brány ze zahraničních studií López-Moreno et al., 2014, Jost et al., 2007 a dalších.

Výsledky hodnocení výšky sněhu v průběhu akumulace a tání odpovídají výsledkům v podobných studiích (Jost et al., 2007, Hedstrom a Pomeroy, 1998, López-Moreno, Stähli, 2008). V uvedených studiích je pozorována vyšší výška sněhu v období akumulace na otevřených plochách než v lesním porostu. Studie se shodují na společném vlivu, kterým je intercepce. Tím je tedy potvrzena i jedna z hypotéz. Obdobně pak byla potvrzena i další hypotéza, která předpokládá rychlejší úbytek sněhu na otevřených plochách než v lese. Pobříšlová a Kulasová (2000) uvádějí jako hlavní důvod zastínění sněhové pokrývky vegetací

a stabilnější mikroklima v lesním porostu. Tyto faktory chrání sněhovou pokrývku hlavně v období oblev při nástupu jarního oteplení.

Určení nejvýznamnější proměnné, která by vysvětlila závislost mezi výškou sněhové pokrývky a sklonitostí, jižností, křivostí terénu, sluneční radiací nebo vegetačním pokryvem, se neprokázalo. Největší závislost v podobných českých podmínkách vysvětluje nadmořská výška (Klivanová, 2013). V této práci nebyla tato vysvětlující proměnná hodnocena, jelikož je zkoumaná lokalita Hanapetrova paseka prostorově menší a z hlediska nadmořské výšky téměř homogenní. U další vysvětlující proměnné se pak již obě práce shodují. Jako významná byla hodnocena křivost terénu. Tato proměnná se jako signifikantní projevila pouze v lesním porostu, avšak ve všech termínech měření. Zatímco nadmořská výška je významná vysvětlující proměnná pro akumulaci sněhové pokrývky, tak tání je vysvětlováno především orientací svahu a pokryvem vegetací (Jost et al., 2007). Podle výsledků regresní analýzy nebyla prokázána závislost výšky sněhu ani na vegetaci. Tento výsledek však může být způsoben nevhodnou statistickou metodou hodnocení, přestože se multilineární regrese používá ve významném procentu vědeckých prací.

Výzkumným cílem této práce bylo také hodnocení vlivu měřítka na variabilitu sněhové pokrývky. Sněhová pokrývka je hodnocena v rámci celého povodí v řádu i desítek kilometrů čtverečných nebo v jednotkách metrů čtverečných. Porovnání v rámci velkého měřítka prováděl López-Moreno et al. (2014), Luce, Tarboton a Cooley (1998) a další. Studií, které by se zabývaly územím o rozloze 1000 m<sup>2</sup>, tak jako je tomu v případě této diplomové práce, je značný nedostatek. Ze studie Luce, Tarboton a Cooley (1998) vyplývá významnost sněhových srážek a teploty vzduchu vztahené k topografii převážně ve velkých měřítkách. V malém měřítku hraje rozhodující úlohu na variabilitu sněhové pokrývky příjem sluneční energie a transport sněhu pomocí větru. Tato měřítka ovšem nejsou srovnatelná s měřítky v této práci. Zde je jedná pouze o hodnocení v rámci velkého měřítka.

## 6 Závěr

Cílem diplomové práce, která se věnuje problematice vlivu topografie a vegetace na akumulaci a tání sněhové pokrývky, bylo shrnutí dostupné literatury a zpracování dat z terénního měření, které probíhalo v zimní sezoně 2014/2015 v Krkonoších. Měřená data výšky sněhu, získaná data DMR 5G (ČÚZK) a meteorologická dat (ČHMÚ) byla vyhodnocena pomocí různých statistických metod, včetně multiregresní analýzy.

Podle výše popsaných výsledků nebyl v zájmovém území Hanapetrovy paseky prokázán žádný dominantní faktor, který by výrazně ovlivňoval variabilitu sněhové pokrývky. Z vysvětlujících proměnných (sklonitost, jižnost, křivost, leaf area index, sluneční radiace) byla pozitivně hodnocena pouze křivost a to jen v lesním porostu. Ostatní zkoumané faktory podle zvolených metodických postupů nevykazovaly významné závislosti. Hodnocení variability sněhové pokrývky potvrdilo předpokládané hypotézy. Větší variabilita sněhové pokrývky byla pozorována v době akumulace na otevřené ploše než v lese, což bylo doloženo převážně vlivem intercepce. V době tání tak byla pak variabilita větší v lesním porostu, což je způsobeno teplotním mikroklimatem lesního porostu a sníženým vlivem jarních oblev, které pouze částečně prostupují skrz vegetaci. Při porovnání variability na otevřené ploše, pak byla také potvrzena hypotéza, která předpokládá větší variabilitu v době akumulace na rozdíl od tání. Výsledky o hodnocení vlivu měřítka ukazují rostoucí variabilitu výšky sněhové pokrývky s klesající velikostí hodnocené plochy. Nejnížší variabilitu variačního koeficientu vykazuje nejmenší hodnocené měřítko v době tání, v době akumulace, na otevřené ploše i v lesním porostu.

Poznatky získané v téhle práci by měly posloužit pro další detailnější výzkum tohoto tématu. Námětem k další práci v tomto směru by mohlo být vyhodnocení průběhu další sezony a případné hodnocení rozdílů mezi nimi. Vhodné by bylo zpřesnit metodiku měření výšky sněhu hlavně v lesním porostu, eventuálně zvolit jiné statistické metody hodnocení měřených dat. Určitým zpřesněním hodnocení vlivu jednotlivých faktorů by mohlo být použití i dalšího faktoru, kterým je vítr a jeho vliv na transport a akumulaci sněhové pokrývky, jenž podle dostupné literatury má také značný vliv.

## 7 Seznam použité literatury

ANDERSON T. B. et al. (2014): Insights into the physical processes controlling correlations between snow distribution and terrain properties. *Water Resources Research*, 50(6), s. 4545 - 4563.

BRÁZDIL, K. (2012): Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G). Zeměměřický úřad, Pardubice, 12s.

CLARK, M. P. et al. (2011): Representing spatial variability of snow water equivalent in hydrologic and land-surface models. *Water Resources Research*, 47, 23 s.

CLINE, D. (1999): Snow Hydrology. [online]. c2015 [cit. 2011-4-15]. Dostupné z URL:<[http://www.comet.ucar.edu/class/hydromet/09\\_Oct13\\_1999/docs/cline/comet\\_snowhydromet/index.htm](http://www.comet.ucar.edu/class/hydromet/09_Oct13_1999/docs/cline/comet_snowhydromet/index.htm)>

ČHMÚ (2008): Územní srážky [online]. c2015. [cit. 2012-08-07]. Dostupný z WWW: [http://portal.chmi.cz/portal/dt?action=content&provider=JSPTabContainer&menu=JSPTabContainer/P4\\_Historicka\\_data/P4\\_1\\_Pocasi/P4\\_1\\_4\\_Uzemni\\_teploty&nc=1&portal\\_lang=cs#PP\\_Uzemni\\_teploty](http://portal.chmi.cz/portal/dt?action=content&provider=JSPTabContainer&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_4_Uzemni_teploty&nc=1&portal_lang=cs#PP_Uzemni_teploty)

ČÚZK (2015): Digitální model terénu 5. generace. Zeměměřický úřad Pardubice.

DEWALLE, D. R, RANGO, A. (2008): Principles of snow hydrology. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 410 s.

FLIEGL, O. (2009): Vliv fyzicko-geografických faktorů na vývoj sněhové pokrývky: případová studie povodí horní Otavy. Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze. 80s.

FRAZER, G. W., CANHAM, C. D., LERTZMAN, K. P. (1999): Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging Software to Extract Canopy Structure and Gap Light Transmission Indices from True-color Fisheye Photographs, Users Manual and Program Documentation. Copyright 1999: Simon Fraser University/Institute of Ecosystem Studies, Burnaby, BC/

HARDING, R. J., POMEROY, J. W. (1996): The Energy Balance of the Winter Boreal Landscape. *Journal of Climate*. Vol. 9. s. 2778 – 2787.

HASA, M. (2012): Modelování odtokových procesů v experimentálním povodí Bystřice v Krušných horách. Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, 99s.

HEDSTROM, N. R., POMEROY, J. W. (1998): Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest. *Hydrological Processes*, 12, s. 1611–1625.

HOLKO L. et al. (2009): Impact of spruce forest on rainfall interception and seasonal snow cover evolution in the Western Tatra Mountains, Slovakia. *Biologia*, 64, s. 594–599.

HOUGHTON, J. G. (1979), A model for orographic precipitation in the north-central Great Basin, *Mon. Weather Rev.*, 107(11), s. 1462–1475.

HRIBIK, M. ŠKVARENINA, J. (2006): Vplyv nadmorskej výšky, expozície, porastu a druhu porastu na hydrofyzikálne vlastnosti snehovej pokrývky v biosférickej rezervácii Poľana, v zimách 2003/04, 2004/05. Sborník ze semináře, 11. stretnutie snehárov, s. 30-40.

HRNČIAROVÁ, T., MACKOVČIN, P., ZVARA (2007): Atlas krajiny České republiky. Praha – Průhonice, MŽP ČR – Výzkumný ústav Silva Taroucy.

JENÍČEK, M. TAUFMANNOVÁ, A. (2010): Vliv vegetace na akumulaci a tání sněhu – výběr z výsledků Katedry fyzické geografie a geoekologie PřF UK v letech 2009 a 2010. XV. Medzinárodné stretnutie snehárov, Kouty nad Desnou, Hrubý Jeseník, s. 43 – 50.

JENÍČEK, M., PEVNÁ, H., MATĚJKA, O. (2015): The effect of forest disturbance and topography on snow accumulation and snowmelt in small mountain catchments, *Hydrology Research* (v recenzním řízení)

JONES, H. G., POMEROY, J. W., WALKER, D. A., HOHAM, R. W. (2001): *Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press. 378 s.

JOST, G. et al. (2007): The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale. *J. Hydrol.* 347, s. 101–115.

KLIVANOVÁ, L. (2013): *Prostorové rozložení sněhové pokrývky v alpinském bezlesí na příkladu vrcholové oblasti východních Krkonoš*. České Budějovice: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze. 110 s.

KUMAR, S. V. et al. (2013): Multiscale Evaluation of the Improvements in Surface Snow Simulation through Terrain Adjustments to Radiation. *Journal of Hydrometeorology*, Vol 14. s. 220-232

KUTLÁKOVÁ, L., JENÍČEK, M. (2012): Modelování akumulace a tání sněhu v povodí Bystřice v Krušných horách. *Geografie*, 117(1), s. 110–125.

LISTON, G.E., STURM, M. (1998): A snow-transport model for complex terrain. *Journal of glaciology*. Vol. 44. No. 148, s. 498-516

LÓPEZ-MORENO, LATRON, J., LEHMANN A. (2010): Effects of sample and grid size on the accuracy and stability of regression-based snow interpolation methods. *Hydrological Processes* 24, s. 1914-1928

LÓPEZ-MORENO, J.I., STÄHLI, M. (2008): Statistical analysis of the snow cover variability in a subalpine watershed: Assessing the role of topography and forest interactions. *Journal of Hydrology* 348, s. 379–394.

LÓPEZ-MORENO, et al. (2014): Snowpack variability across various spatio-temporal resolutions. *Hydrological Processes* 29(6), s. 1213-1224.

LUNDBERG, A. et al. (2004): Snow accumulation in forests from ground and remote-sensing data. *Hydrological Processes*, 18, s. 1941–1955.

Mapy.cz (2015): Mapové služby [online] c2015. [cit. 2015-07-23]. Dostupné z: <http://mapy.cz/zakladni?x=15.6252330&y=49.8022514&z=8>

MARCHAND W. D., KILLINGVEIT A. (2005): Statistical probability distribution of snow depth at the model sub-grid cell spatial scale. *Hydrological Processes* 19, s. 355-369.

MATĚJKA, O. (2015): Energeticky založený model akumulace a tání sněhu v jehličnatém lese a na otevřené ploše. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF, Univerzita Karlova, Praha, 75 s.

MOLOTCH, N. P., et al. (2007): Estimating sublimation of intercepted and sub – canopy snow using Eddy covariance systems. *Hydrological Processes* 21, s. 1567 – 1575.

Myneni, R.B., Nemani, R.R., Running, S.W. (1997): Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35, s. 1380 - 1393.

POBŘÍŠLOVÁ, J., KULASOVÁ, A. (2000): Ukládání a tání sněhu v lese a na odlesněných partiích Jizerských hor. *Opera Corcontica*, 37, s. 113-119.

POMEROY, J. W., GRAY, D. M., HEDSTROM N. R., JANOWICZ, J. R. (2002): Prediction of seasonal snow accumulation in cold climate forests. *Hydrological Processes*, 16, s. 3543–3558.



POMEROY, J. W. A. GRAY, D. M. (1995): Snowcover Accumulation, Relocation and Management, Science Report No. 7. National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Environment Canada, 144 s.

SCHMIDT, R. A., TROENDLE, C. A. (1992): Sublimation of intercepted snow as a global source of water vapour. Proc. Western Snow Conf. Vol 60. s. 1-9.

SINGH. P., SINGH. V. (2001): Snow and glacier hydrology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. Vyd. 1. 742 s. 0-7923-6767-7.

Statistika a výpočetní technika (2015): [online]. c2015. [cit. 2015-06-20]. Dostupný z WWW: <http://cit.vfu.cz/statpotr/potr.htm>

STÄHLI, M., JONAS, T., GUSTAFSSON, D. (2009): The role of snow interception in winter-time radiation processes of a coniferous sub-alpine forest. Hydrological Process 23, s. 2498–2512.

Správa KRNAP (2010): Krkonošská flora. [online]. c2015. [cit. 2015-06-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.krnep.cz/flora-a-vegetace/>>

ŠÍPEK, V. A., TESAŘ, M. (2014): Seasonal snow accumulation in the mid-latitude forested catchment. Biologia, 69 (11), s. 1562–1569.

TOEWS, D.A.A., GLUNS, D.R. (1986): Snow Accumulation and Ablation on Adjacent Forested and Clearcut Sites in Southeastern British Columbia [online]. c2015 [cit. 2011-4-19]. Dostupné z URL: <<http://www.westernsnowconference.org/proceedings/1986.htm>>

TRUJILLO, E., RAMÍREZ, A., ELDER, K.J. (2009): Scaling properties and spatial organization of snow depth fields in sub-alpine forest and alpine tundra. Hydrological Process 23, s. 1575-1590

WATSON, D. J. (1947): Comparative physiological studies in the growth of field crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.*,11, s. 41-76.

WINSTRAL, A., MARKS, D., GUMEY, R. (2012): Simulating wind-affected snow accumulations at catchment to basin scales. *Water Resources* 55, s. 64-79.

ZHAO, J., SHI, Y., HUANG, Y., FU, J. (2015): Uncertainties of snow cover extraction caused by the nature of topography and underlying surface. *Journal of arid land* 7(3), s. 285–295.

ZVÁRA, K. (2008): Regrese, MatFyz Press Praha, 249 s.

## 8 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Pohledový faktor oblohy v závislosti na sklonu svahu

Obr. 2: Denní potenciální příjem solární energie na svahu se sklonem 16,7° na 50° severní šířky

Obr. 3: Poloha zkoumaných oblastí v Krkonoších

Obr. 4: Sklonitostní charakteristika zkoumané oblasti

Obr. 5: Expozice ve zkoumané oblasti

Obr. 6: Vegetace na zkoumaných lokalitách v Krkonoších

Obr. 7: Automatizovaná meteorologická stanice Hanapetrova paseka

Obr. 8: Ukázka hemisférických snímků v lese a na otevřené ploše pořízené objektivem rybí oko na Hanapetrově pasece

Obr. 9: Provedení registrace hemisferického snímku pomocí softwaru Gap Light Analyzer

Obr. 10: Vývoj teploty vzduchu a výšky sněhové pokrývky od 1.11.2014 do 15.4.2015 na meteorologické stanici Hanapetrova paseka

Obr. 11: Výška sněhu na stanici Hanapetrova paseka od 8.2.2015 do 15.4.2015

Obr. 12: Statistické hodnocení výšky sněhu na Hanapetrově pasece v termínech terénního měření

Obr. 13: Místa pořízení hemisferických snímků na Hanapetrově pasece a hodnoty leaf area indexu zobrazené interpolační metodou Kriging

Obr. 14: Změna sluneční radiace ve vybraných obdobích zimní sezony na Hanapetrově pasece

Obr. 15: Variační koeficienty pro tři měřítka (3x3, 5x5 a 10x10 bodů) na Hanapetrově pasece v zimní sezoně 2014/2015

Obr. 16: Průměrný koeficient variace pro každé terénní měření ve třech měřítkách

- Tab. 1: Číselné vyjádření vybraných statistických ukazatelů měření výšky sněhové pokrývky
- Tab. 2: Hodnocení vegetačního porostu na Hanapetrově pasece ve zkoumaném období
- Tab. 3: Podíl přímého i rozptýleného krátkovlnného záření prostupující skrze vegetaci na otevřené ploše na Hanapetrově pasece
- Tab. 4: Podíl přímého i rozptýleného krátkovlnného záření prostupující skrze vegetaci v lesním porostu na Hanapetrově pasece
- Tab. 5: Signifikantní významnost nezávislých proměnných na výšce sněhu a jejich rozdílech mezi jednotlivými měřeními v sezóně 2014/2015
- Tab. 6: Signifikantní regresní koeficienty pro otevřenou plochu (O) a lesní porost (L)