Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie a kartografie

Dominik Míka

Variabilita krátkovlnné a dlouhovlnné radiace na plochách s různou strukturou lesa na Šumavě během tání sněhu

Variability in shortwave and longwave radiation in plots with different forest structure in the Sumava Mts. during snowmelt

Bakalářská práce

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

Praha 2019

Zadání bakalářské práce

Téma práce

Působení lesa na akumulaci a tání sněhu v horském prostředí

Cíle práce

Bakalářská práce si stanovuje následující cíle:

1. Zhodnocení současného stavu výzkumu (formou rešerše literatury) na téma vlivu lesa na tání sněhu a celkovou energetickou bilanci sněhu
2. Analýza dat výšky sněhu, teploty vzduchu, krátkovlnné a dlouhovlnné radiace ze dvou lesních lokalit (hustý zdravý les a les poškozený kůrovcem) a referenční otevřené plochy s cílem popsat rozdíly v ukládání a tání sněhu na uvedených lokalitách. Charakter lokalit bude dále popsán pomocí Leaf Area Index spočteným z hemisférických snímků vegetace.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Stanovení vlivu lesa na akumulaci a tání sněhu přispívá k přesnosti předpovědí jarních povodní, jelikož velká část horských a podhorských povodí na našem území je úplně nebo částečně zalesněna. Význam jehličnatého lesa pro ukládání sněhu je značný, protože část sněhu se zachytí na vegetaci odkud významná část sublimuje do atmosféry, nedopadne tak na zemský povrch a tím se neúčastní následného tání a odtoku. Během tání les snižuje celkový úhrn sluneční radiace a má tedy vliv na snížení rychlosti tání. Naopak stromy působí jako emitor dlouhovlnného (termálního) záření a tím ovlivňuje rychlost tání v lese. V této souvislosti je také aktuální otázka změn lesní vegetace vlivem náhlých disturbancí (např. vichřic a škůdců).

První část práce se bude zabývat zhodnocením současného stavu výzkumu (formou rešerše literatury) na téma vlivu lesa na tání sněhu a celkovou energetickou bilanci sněhu.

Analytická část práce bude spočívat v analýze dat výšky sněhu, teploty vzduchu, krátkovlnné a dlouhovlnné radiace ze dvou lesních lokalit (hustý zdravý les a les poškozený kůrovcem) a referenční otevřené plochy s cílem popsat rozdíly v ukládání a tání sněhu na uvedených lokalitách. Data jsou měřena kontinuálně na automatických stanicích (ultrazvuková čidla pro měření výšky sněhu, radiometr měřící krátkovlnnou a dlouhovlnnou radiaci). Uvedená kontinuální data budou analyzována v kontextu vlastností daných lokalit, především v závislosti na tom, jak les na těchto lokalitách utlumuje sluneční záření a jak ovlivňuje intercepci sněhu v korunách stromů. Charakter těchto lokalit bude kvantifikován studentem pomocí

hemisférických snímků a volitelně také pomocí měření útlumu krátkovlnné radiace pomocí přístroje Li-Cor LAI Plant Canopy Analyzer.

Datum zadání: 8. 11. 2018

Jméno studenta: Dominik Míka

Podpis studenta: ……..

Jméno vedoucího práce: RNDr. Michal Jeníček, Ph.D.

Podpis vedoucího práce: …….

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou 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.

V Praze dne 30. 7. 2019

.....

Dominik Míka

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce RNDr. Michalu Jeníčkovi, PhD. za věnovaný čas, poskytnutá data, trpělivost při vedení práce a cenné rady. Poděkování patří také Mgr. Ondřeji Hotovému za pomoc při zpracování hemisférických snímků, a nakonec rodině i přátelům za podporu při psaní práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá variabilitou dlouhovlnného a krátkovlnného záření na třech lokalitách s různou strukturou lesa v rámci povodí Ptačího potoka na Šumavě. Strukturu vegetace kvantifikuje index listové plochy (Leaf Area Index, LAI) vypočtený na základě hemisférických snímků vegetace. Data o krátkovlnné a dlouhovlnné radiace na všech lokalitách byla měřena pomocí radiometrů. U zdravého lesa je průměrná propustnost krátkovlnného záření 6,5 % a v závislosti na struktuře vegetace je v meziročním srovnání neměnná. Naopak propustnost krátkovlnné radiace se u poškozeného lesa v čase mění. Propustnost také závisí na celkové velikosti příchozí radiace, kdy s vyšší intenzitou záření roste propustnost vegetace. Celková bilance dlouhovlnného záření pod lesní vegetací je ovlivněna řadou faktorů, mezi které patří nejen struktura lesní vegetace, ale také její propustnost a velikost celkové příchozí krátkovlnné radiace. Bilance dlouhovlnné radiace byla kladná ve zdravém lese, záporná na otevřené ploše a v poškozeném lese se postupně měnila z kladné na zápornou hodnotu. Rozdíly v bilanci dlouhovlnné radiace vedou k různé dynamice tání sněhu. Zvyšování kladné bilance dlouhovlnného záření pod zdravou lesní vegetací vykazovalo závislost na příchozí krátkovlnné radiaci v korelačním koeficientu r = 0,68. U poškozeného lesa se bilance dlouhovlnného záření postupně snižovala v meziročním porovnání, kdy se hodnota mediánu mezi lety 2016 a 2019 snížila v konečném rozdílu o 33,04 W/m^2.

Klíčová slova: krátkovlnná radiace, dlouhovlnná radiace, Leaf Area Index, propustnost radiace vegetací, rozpad poškozené lesní vegetace, Šumava

Abstract

The bachelor thesis analyzed the variability in shortwave and longwave radiation at three locations with different canopy structure in the Ptaci brook basin in the Sumava Mts. The canopy structure was quantified by Leaf Are Index calculated from hemispherical images of the canopy. The shortwave and the longwave radiation were measured by radiometer at all locations. In the healthy forest, the average transmittance of the shortwave radiation was 6,5 % and did not change between individual study years. On the contrary, the transmittance of shortwave radiation increased in the damaged forest during study period. The transmittance relatively increased with increasing incoming shortwave radiation. The net longwave radiation was influenced by several factors which included not only the effect of the canopy structure but also transmittance of incoming longwave radiation and the total magnitude of the incoming solar radiation. The net longwave radiation was positive in the healthy forest, negative in the open area and changing from positive to negative in the damaged forest. The differences

in the net longwave radiation lead to different dynamic of snowmelt. The net longwave radiation was correlated with incoming shortwave radiation (r = 0.68) in the healthy forest. The net longwave radiation gradually decreased during study period in the damaged forest. The median value decreases in the final difference to 33,04 W/m^2 between the years 2016 and 2019.

Keywords: shortwave radiation, longwave radiation, Leaf Area Index, radiation transmittance of the canopy, forest disturbance, Sumava Mountains

Obsah

1 Úvod 10
1.1 Struktura práce 10
1.2 Cíle práce 10
1.3 Výzkumné otázky a hypotézy 11
2 Současné poznatky o sněhové pokrývce a radiace 12
2.1 Vybrané vlastnosti sněhové pokrývky 12
2.1.1 Vodní hodnota sněhu 12
2.1.2 Hustota sněhu 13
2.1.3 Albedo 16
2.2 Důležité faktory ovlivňující sněhovou pokrývku 17
2.2.1 Energetická bilance sněhu 17
2.2.2 Krátkovlnná radiace 19
2.2.3 Dlouhovlnná radiace 21
2.2.4 Rozdíly ve vegetačním pokryvu 23
2.2.5 Další významné faktory ovlivňující sněhovou pokrývku 25
3 Fyzicko-geografická charakteristika území Ptačího potoka 26
3.1 Vymezení zájmového území 26
3.2 Geologické a geomorfologické poměry 27
3.3 Pedologické poměry území 28
3.4 Vegetace a krajinný pokryv 29
3.5 Klimatické poměry 30
3.6 Hydrologické poměry 32
4 Metody výzkumu 34
4.1 Měřící stanice 34
4.2 Terénní výzkum 35
4.3 Zpracování dat 37
4.3.1 Data z automatických stanic 37
4.3.2 Hemisférické snímky 39
5 Výsledky 41
5.1 Charakteristika struktury vegetace a meteorologických prvků na lokalitách 41
5.2 Variabilita krátkovlnné radiace 42
5.3 Variabilita dlouhovlnné radiace 45

6 Diskuze 50
6.1 Nejistoty při sběru a zpracování dat 50
6.2 Zhodnocení variability krátkovlnné radiace 51
6.3 Zhodnocení variability dlouhovlnné radiace 53
7 Závěr 54
8 Použitá literatura a zdroje 55
8.1 Seznam použité literatury 55
9 Seznam obrázků 60
10 Seznam tabulek 62
Přílohy 63

1 Úvod

Sníh je nedílnou součástí koloběhu vody v mírném podnebném pásu. V jarním období tvoří podstatnou část odtoku z horských oblastí, zejména při jarních oblevách (Varhola et al. 2010). Množství sněhové pokrývky ovlivňuje celkové množství vody v povodí, která následně odtéká povrchovými odtoky. Velká část horských povodí na našem území je zalesněná, a proto stanovení vlivu lesa na množství sněhu a jeho následného tání je velmi důležitá. Na uložení a vlastnosti sněhu má vliv velké množství nejen klimatických faktorů a geomorfologická členitost reliéfu, ale i množství, hustota a zdraví vegetace.

Tato práce se bude především zabývat působením slunečního svitu, resp. dlouhovlnné a krátkovlnné radiace, která je opět ovlivňována lesní vegetací a jejím stavem. Vegetace pohlcuje krátkovlnné záření a jen malé množství ho proniká. Dlouhovlnné záření je lesem sice také pohlcováno, ale na druhou stranu ho lesní porost emituje. Proto les způsobuje významné rozdíly v celkové energetické bilanci povrchu oproti otevřeným prostranstvím (Webster et al. 2016).

1.1 Struktura práce

První část práce se zabývá zhodnocením české a zahraniční literatury věnující se energetické bilanci sněhu, bilanci krátkovlnného a dlouhovlnného záření a vlivem struktury vegetace na celkové záření. Jsou zde popsány základní vlastnosti sněhové pokrývky a její energetické toky, které souvisí s příchozí radiací. Rešerše popisuje vliv vegetace na samotné příchozí záření a na celkovou bilanci záření pod vegetačním krytem.

Druhá část práce popisuje fyzicko-geografickou charakteristiku zájmové lokality povodí Ptačího potoka na Šumavě, po které následuje analýza dat z automatických stanic Katedry fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Analýza dat spočívá ve výpočtu a popisu variability krátkovlnného a dlouhovlnného záření na třech různých lokalitách – zdravý les, poškozený les a otevřená plocha.

1.2 Cíle práce

Bakalářská práce si stanovuje následující cíle:

I. Zhodnocení současného stavu výzkumu na téma vlivu lesa na tání sněhu a celkovou energetickou bilanci sněhu

II. Analýza dat výšky sněhu, teploty vzduchu, krátkovlnné a dlouhovlnné radiace ze dvou lesních lokalit (hustý zdravý les a les poškozený kůrovcem) a referenční otevřené plochy

s cílem popsat variabilitu krátkovlnného a dlouhovlnného záření na uvedených lokalitách.

1.3 Výzkumné otázky a hypotézy

1) Propustnost krátkovlnného záření poškozené lesní vegetace se bude zvyšovat v čase z důvodu postupného otevírání lesní plochy
2) Nejvyšší variabilita krátkovlnného záření bude na otevřené ploše, kde nedochází k jejímu stínění, nejvyšší variabilita dlouhovlnného záření se objeví pod lesní vegetací, kde dochází k její emitaci lesní vegetací
3) Bilance dlouhovlnného záření se bude lišit na lokalitách s různou strukturou vegetace

2 Současné poznatky o sněhové pokrývce a radiace

Studium sněhu, vývoje sněhové pokrývky a jejích vlastností představuje speciální problematiku, která se postupem času vyčlenila v další odvětví hydrologie, tzv. hydrologii sněhu (v angl. snow hydrology). Ačkoliv se v posledních letech jedná o velký fenomén na poli hydrologie, první pochopení důležitosti sněhu v hydrologickém cyklu přišlo již s antickými filosofy, ale k největšímu rozvoji hydrologie sněhu došlo až téměř v polovině 20. století po 2. světové válce (DeWalle, Rango 2008).

Zájem o problematiku akumulace a tání sněhu je zřejmě způsobena faktem, že sněhová pokrývka má důležitý vliv na klima, koloběh vody a biochemické cykly (Takala et al. 2011). Výrazné změny globálního klimatu z posledních let také přispívají k popularitě sněhové hydrologie. Oteplováním klimatu dochází ke značnému úbytku ledovců po celém světě. Zmenšuje se nejen zalednění v polárních oblastech, ale ubývají i horské ledovce drtivé většiny světových velehor, např. od malé doby ledové Alpské ledovce výrazně zmenšily svoji plochu a ve Východních Alpách dokonce o více než polovinu (Dutková 2011). Podle Cohen, Rind (1991) úbytek plochy sněhové pokrývky zásadně ovlivňuje množství absorbované a odražené radiace a tepla. Změna klimatu ovlivňuje teplotu, množství sněhových srážek a počet dnů se sněhovou pokrývkou, ale zároveň je klima zpětně ovlivňováno právě změnou tepelných vlastností ploch a jejich odrazivostí (DeWalle, Rango 2008).

2.1 Vybrané vlastnosti sněhové pokrývky

Základní vlastnosti sněhu se odvíjí od fyzikálních a chemických vlastností vody. Její nejdůležitější vlastnosti – bod tání a bod tuhnutí – jsou určeny silou vodíkových vazeb, kdy nejsilnější jsou u ledu a nejslabší u vodní páry. Velkou roli zde hraje i teplota, při které se síla vazeb mění, a to se odráží nejen při vzniku srážek, ale hlavně určuje začátek událostí tání. Pochopení chování molekul vody je proto velmi důležité pro hydrologii sněhu. V této práci jsou nejpodstatnějšími vlastnostmi sněhu vodní hodnota, hustota a albedo, které jsou popsány v následujících kapitolách.

2.1.1 Vodní hodnota sněhu

Vodní hodnota sněhu (dále SWE) je jedním z nejdůležitějších parametrů pro přesnou předpověď odtoku při tání sněhu. Znalosti o množství vody uložené ve sněhové pokrývce při jarním tání zaručuje přesnější předpověď odtoku (Chang et al. 1981). Hodnoty SWE obvykle nejsou měřeny přímo, ale jsou počítány pomocí výšky sněhové pokrývky a hustoty

(Pomeroy, Gray 1995). DeWalle, Rango (2008) formuloval pro výpočet hodnoty SWE tento vzorec:

$$SWE = d * \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1)$$

kde:

SWE – vodní hodnota sněhu [m]

d – výška sněhu [m]

ρ_s – hustota sněhu [$kg \cdot m^{-3}$]

ρ_w – hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$]

Vodní hodnota sněhové pokrývky vyjadřuje množství vody naakumulované v daném místě a čase (Singh a Singh 2001). SWE je tedy součinem výšky sněhu a hustoty sněhu a reprezentuje vodní sloupec z tajícího sněhu (Takala et al. 2011).

K získání hodnoty SWE si lze pomoci i metodami dálkového průzkumu Země – konkrétně mikrovlnným zářením. Zabývá se tím studie od Chang et al. (1981), která tvrdí, že pomocí mikrovln lze měřit výšku sněhové pokrývky v případě suchého sněhu. Dnes se satelitní snímky používají pro hodnocení stavu sněhové pokrývky v globálním a kontinentálním měřítku pro své nízké rozlišení (Cuřín 2016).

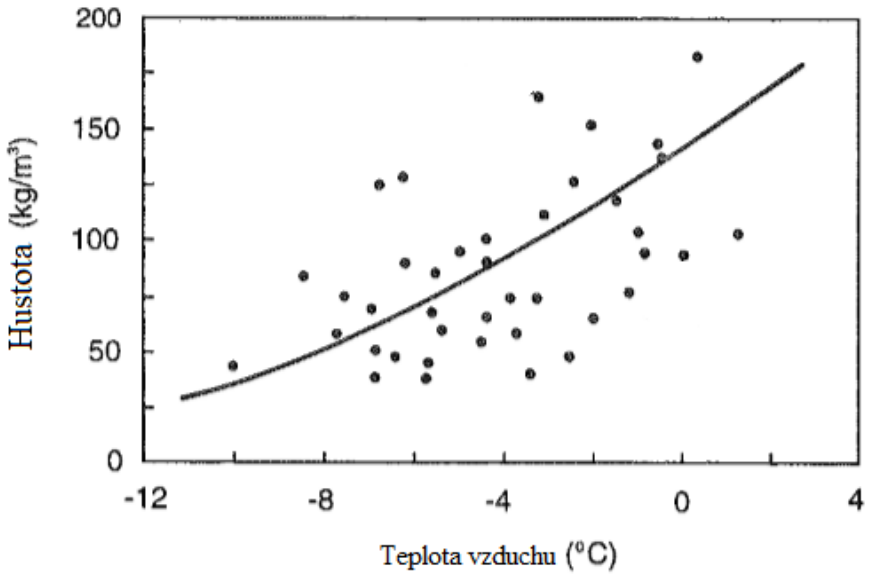
Podle (Clark et al. 2011) je SWE prostorově velmi variabilní. Je to dáno velkým množstvím různorodých procesů a vnějších vlivů, které působí na sněhovou pokrývku (např. meteorologické podmínky – vítr, srážky, solární radiace; hustota lesní vegetace – zdravý les, disturbovaný les; geomorfologie – sklonitost, prohlubně, záhyby terénu). Prostorová variabilita SWE je rozhodující pro simulaci průměrné výšky sněhu v povodí a i pro energetickou výměnu mezi půdu a atmosféru (Liston 1999). Nerovnoměrné mizení sněhu je důležité z hlediska hydrologického modelování, protože řídí rozsah, načasování a dobu tání v povodí (Lundquist, Dettinger 2005).

2.1.2 Hustota sněhu

Hustota sněhu je důležitou fyzikální vlastností sněhové pokrývky vyjadřující hmotnost sněhu o určitém objemu a ovlivňuje tepelné, mechanické a optické vlastnosti sněhových vrstev (Bormann et al. 2013). Hustota určuje vztah mezi sněhem a obsahem vody, který koreluje s mnoha situacemi závislých na předpovědích, např. předpověď lavinového nebezpečí, předpověď odtoku sněhu, předpověď sněhových závějí apod. (Thut 2006). Na hustotu sněhové

pokrývky mají vliv různé typy srážek, mezi které patří padající sníh (mokrý nebo suchý), mrznoucí déšť, mrznoucí mrholení, déšť a mrholení (Seibert et al. 2015).

Ke změnám hustoty přispívá více faktorů, z nichž nejdůležitějším z nich je čas, resp. stáří sněhové pokrývky. Nejčastěji se hustota mění při akumulaci nové vrstvy na starou vrstvu sněhové pokrývky, kdy dojde ke zvýšení tlaku ve spodní vrstvě a tím i ke zvýšení její hustoty. Hustota sněhu je závislá i na teplotě vzduchu, kdy s růstem teploty roste exponenciálně hustota nově napadaného sněhu (obr. 1).



Obrázek 1: Vztah mezi teplotou vzduchu měřenou ve výšce 1,22 m a hustotou nově napadaného sněhu v nadmořské výšce 2104 m v pohoří Sierra Nevada v Kalifornii (Pomeroy, Gray 1995, upraveno)

Seibert et al. (2015) dodává, že hustota se liší i podle stáří sněhu (tab. 1). Nový sníh má zpravidla hustotu nejnižší, kdy mezery mezi sněhovými krystaly jsou velké a prostor mezi nimi je vyplněný vzduchem. Se stárnoucím sněhem se hustota zvyšuje, protože začne docházet k postupné metamorfóze sněhové pokrývky. Metamorfózní procesy patří k dalším faktorům změny hustoty sněhu. Procesy se liší mezi suchým a mokrým sněhem (tab. 2) a v konečném důsledku vedou ke změnám tepelné vodivosti a propustnosti kapalin, což ovlivňuje celkové množství energie sněhové pokrývky a konečné uvolňování vody z tajícího sněhu (DeWalle, Rango 2008).

Tabulka 1: Typické hodnoty hustoty sněhu pro odlišné druhy sněhové pokrývky (Seibert et al. 2015, upraveno)

typ sněhu	hustota (kg/m3)
nový sníh	10–30
nový sníh	50–70
mokrý nový sníh	100–200
sesedlý sníh	200–300
hluboký starý sníh	200–300
větrem navátý sníh	350–400
mokrý sníh	350–500
firn	500–830
ledovcový led	850–917

Tabulka 2: Přehled hlavních metamorfických procesů ovlivňujících hustotu a strukturu sněhu (DeWalle, Rango 2008, upraveno)

Hlavní metamorfické procesy	Fyzikální princip	Účinek	Výskyt
Difúze par povrchu krystalu	Tlak par je vyšší nad konvexním než nad konkávním ledovým povrchem	Vytvoření zaoblených, dobře vázaných ledových zrn	Začíná krátce po nasněžení
Difúze par mezi zrny	Tlak par je vyšší v teplejších než v chladnějších částech sněhové pokrývky	Formování tvaru, málo vázaná ledová zrna a hluboká jinovatka	Ve zmrzlých sněhových pokrývkách
Cykly tání a mrznutí	Malá ledová zrna mají nižší teploty tání než větší zrna	Zmrzlý sníh se zahřívá, malá zrna tají dřív než velká; další mrznutí vede k dobře vázaným velkým ledovým zrnům	V pozdním období zimy s povrchovým táním a dešti
Tlak	Pomalá komprese způsobuje visko-elastickou deformaci ledu	Tlak nového sněhu na starý sníh vytváří firn a ledovcový led	Hlavně v trvalé sněhové pokrývce

2.1.3 Albedo

Jedním z nejdůležitějších parametrů při studiích tání sněhu je odrazivost neboli albedo, které udává procentuální množství krátkovlnné radiace odražené od sněhové pokrývky. Stává se dobrým ukazatelem schopnosti sněhového povrchu absorbovat sluneční radiaci a podílí se na celkové energetické bilanci sněhu (Malmros et al. 2018). Z hodnoty albeda lze vyvodit začátek události tání, při které sněhová pokrývka začne energii pohlcovat a hodnota albeda se sníží (Singh a Singh 2001). Celkovou odrazivost sněhové pokrývky lze spočítat podle vzorce:

$$\alpha = \frac{S_r}{S_i} \tag{2}$$

kde:

α – odrazivost povrchu

S_r – odražená radiace sněhovou pokrývkou [W.m^{-2}]

S_i – příchozí radiace [W.m^{-2}]

Výsledná hodnota albeda (často udávaná v %) je ovlivněna mnoha dalšími faktory podobně jako u hustoty sněhu, včetně povrchového znečištění. Albedo se liší nejen pro různé typy přírodních povrchů, ale mnohem důležitější pro tuto práci je odlišnost hodnot albeda při různém stáří sněhové pokrývky (tab. 3), kdy starší sníh vykazuje mnohem nižší hodnoty než sníh čerstvý (Wendler, Kelley 1988; Amaral et al. 2017).

Tabulka 3: Průměrná hodnota albeda sněhu a ledu odlišného stáří (Müller 1985, upraveno)

typ sněhu	albedo
suchý čerstvý sníh	0,85
vlhký čerstvý sníh	0,80
suchý starý sníh	0,70
vlhký starý sníh	0,60
znečištěný starý sníh	0,45
čistý led	0,40
znečištěný firn	0,30
znečištěný led	0,25
velmi znečištěný led	0,15

Podle Amaral et al. (2017) má na konečnou hodnotu albeda vliv i hloubka sněhové pokrývky. Studie, která proběhla v New Hampshiru v USA, ukazuje, že albedo prudce roste k hloubce 0,14 m a poté je více ovlivňované stářím sněhové pokrývky. Také poukazuje na rychlejší změny albeda u hodnot nad 0,90 a pod 0,60. U čerstvého sněhu (>0,90) je změna zapříčiněna přenosem par a jejím narušováním mikrostruktury sněhu, zatímco u starého sněhu (<0,60) přítomnost vody z tání urychluje metamorfózu. Albedo může být sníženo i lesní vegetací, kdy většina krátkovlnného záření je pohlcena korunami stromů a nedostane se ke sněhové pokrývce (Webster, Jonas 2018). Znečištění sněhové pokrývky a množství částic v ní obsažené snižují hodnotu albeda, tím dochází k většímu příjmu energie a zvýšením teploty (Oaida et al. 2015).

2.2 Důležité faktory ovlivňující sněhovou pokrývku

2.2.1 Energetická bilance sněhu

Celková energetická bilance sněhu a jeho tepelná kapacita určuje velikost tání sněhu v důsledku sublimace/odpařování. Výměna energie probíhá na základě interakce sněhové pokrývky s dlouhovlnným a krátkovlnným zářením a turbulentním nebo konvektivním přenosem tepla. Přítomnost oblaků, vegetace, meteorologických jevů (vítr, srážky) a především slunečního svitu mají zásadní vliv na energetickou bilanci sněhu. Díky těmto efektům lze rozlišovat sezónní variabilitu v celkové energetické bilanci sněhové pokrývky. Největší rozdíl je právě v minimu mezi letním a zimním obdobím (USACE 1998; Singh a Singh 2001; DeWalle, Rango 2008). Celkovou energetickou bilanci sněhové pokrývky lze vyjádřit rovnicí:

$$Q_m = Q_{ns} + Q_{nl} + Q_h + Q_e + Q_r + Q_g + Q_i \quad (3)$$

kde [W.m^{-2}]:

Q_m – celkové teplo dostupné pro tání (±)

Q_{ns} – bilance krátkovlnné radiace (≥0)

Q_{nl} – bilance dlouhovlnné radiace (±)

Q_h – bilance zjevného tepla (±)

Q_e – výměna latentního tepla (±)

Q_r – zjevné a latentní teplo dodané srážkami (≥0)

Q_g – zjevné teplo dodané z půdy (±)

Q_i – změna energie vlivem přenosu tepla uvnitř sněhové pokrývky (±)

Ve výše uvedené rovnici jsou uvažovány různé složky energetického toku, který je definován jako množství energie přijaté na vodorovné sněhové ploše za jednotku času. Všechny složky hrající roli při dodávání tepla sněhové pokrývce zahrnují vlivy počasí a místní podmínky. Kladná výsledná hodnota Q_m vede k tání sněhové pokrývky (USACE 1998; Singh a Singh 2001).

Rovnice energetické bilance je důležitá pro další výpočet objemu tání sněhové pokrývky. Pro přepočet tepelné bilance na celkový objem tání sněhu udává rovnice:

$$M = \frac{Q_m}{\rho_w * L * \beta} \tag{4}$$

kde:
M – voda z tajícího sněhu [m/den]
Q_m – teplo dostupné pro tání [$W.m^{-2}$]
ρ_w – hustota vody [$kg.m^{-3}$]
L – latentní teplo [$J.kg^{-1}$]
β – termální kvalita sněhu

Termální kvalita sněhu vstupující do rovnice závisí na množství tekuté vody a teplotě ve sněhové pokrývce. Při události tání je obsah vody kolem 3 % (β = 0,97). Na základě stálých hodnot vstupujících do rovnice vyjadřující tání sněhové pokrývky lze rovnici zjednodušit:

$$M = 0{,}0031 * Q_m \tag{5}$$

kde:
M – voda z tajícího sněhu [mm/den]
hodnota 0,0031 vznikla součinem hodnot $\rho_w * L * \beta$, resp. *1000 * 333,5 * 0,97*
Q_m – teplo dostupné pro tání [$W.m^{-2}$]

S vyšší přijatou energií se zvyšuje i teplota sněhové pokrývky. Podle studie Oaida et al. (2015) na západě USA se znečištěním sněhové pokrývky sníží albedo o 6 %, což vede k postupnému zvýšení teploty o 0,84°C a sněhová pokrývka ztratí až 11 mm hloubky. Ve vyšších nadmořských výškách (nad 1400 m) se změna teploty pohybuje mezi 0,54–0,92° C. Se zvýšením přijaté energie se zvyšuje i celkové tání, jak je patrné z výše uvedené rovnice. Studie vývoje sněhové pokrývky v blízkosti Smaragdového jezera v Britské Kolumbii v Kanadě od Marks, Dozier (1992) uvádí, že záření představuje 66 % až 90 % přijaté energie pro tání. Zmiňuje také, že důležitost záření pro konečné tání a energetickou bilanci sněhové

pokrývky se mění podle vystavení zájmové lokality vůči vnějším vlivům. Tabulka 4 ukazuje podíl přijaté radiační energie z celkové energetické bilance sněhu na dvou odlišných místech nacházejících se ve středních zeměpisných šířkách v alpinském typu pohoří – chráněná lokalita u jezera a exponovaná plocha na hřbetu 300 m nad hladinou jezera. Z tabulky je patrné, že u kryté plochy hraje radiace důležitou roli při změně energetické bilance sněhové pokrývky díky větší absenci dalších vlivů.

Tabulka 4: Podíl příchozí radiační energie v celkové energetické bilanci sněhové pokrývky v daný měsíc u chráněné a nechráněné plochy před vnějšími vlivy v období od listopadu do konce června v blízkosti Smaragdového jezera, Britská Kolumbie, Kanada (Marks, Dozier 1992, upraveno)

měsíc	podíl příchozí radiační energie u kryté plochy [%]	podíl příchozí radiační energie u nekryté plochy [%]
listopad	25	9
prosinec	18	37
leden	13	2
únor	20	32
březen	49	22
duben	51	28
květen	90	82
červen	81	72

2.2.2 Krátkovlnná radiace

Krátkovlnné záření je nejdůležitějším zdrojem energie pro začátek tání sněhové pokrývky a nejzásadnějším faktorem při změně energetické bilance sněhu. Jeho vlnová délka se pohybuje od 0,4 do 2 μm. Albedo sněhového povrchu udává podíl z celkového krátkovlnného záření, které se zúčastní energetického toku ve sněhové pokrývce (viz 2.1.3). Podle aktuální odrazivosti sněhu se dostává do odlišných hloubek. Čím více záření sníh pohltí, tím více se zvyšuje jeho teplota a celková energetická bilance se přibližuje k události tání. Míra průchodnosti radiace a její celkový vliv je také dán přítomností cizích objektů ve sněhové pokrývce, např. kmeny stromů, větvičky, kameny, štěrk, prach apod. (DeWalle, Rango 2008). Předanou čistou energii krátkovlnného záření vyjadřuje jednoduchá rovnice:

$$Q_{ns} = K\downarrow - K\uparrow \tag{6}$$

kde:

Q_{ns} – bilance krátkovlnného záření (≥0)

K↓ – příchozí krátkovlnné záření

K↑ – odchozí krátkovlnné záření

Konečné množství energie z krátkovlnného záření je ovlivněné také polohou a charakterem zkoumané lokality, kde se sněhová pokrývka nachází. Konkrétně se jedná o zeměpisnou šířku, sezónu, denní dobu, atmosférické podmínky, orientaci a sklonitost svahu, nadmořskou výšku, množství lesní vegetace a vlastnosti sněhové pokrývky (USACE 1998). Počet dní, kdy na povrch sněhové pokrývky dopadá krátkovlnné záření, je přímo ovlivněn oblačností – jejich odrazivostí (50 až 90 % – závisí na jejich tloušťce) a procentem zakrytí oblohy (Singh a Singh 2001).

Do celkové doby působení solární radiace na sníh vstupuje také vliv vegetace. Množství přenášeného záření se mění s hustotou vegetace (obr. 2). Podle Sicart et al. (2004) lesní vegetace utlumuje přímé sluneční záření až o 90 %. Důležitou roli při útlumu krátkovlnné radiace hraje hustota a výška vegetace, zenitový úhel Slunce a délka jeho dráhy na obloze. Tím se zabývá studie od Hardy et al. (2004), ve které pomocí hemisférických snímků vegetace a softwaru Gap Light Analyzer vypočítali přenosové faktory. Předpovězené propustnosti se shodovaly s měřenými. Sicart et al. (2004) dodává, že více než hustota lesní vegetace je důležitá čistota sněhové pokrývky (albedo>0,5). Pohlcení krátkovlnné radiace vegetací je vyrovnáván emitací záření dlouhovlnného (viz následující kapitola 2.2.2). Útlum solární radiace lze vypočítat jednoduchou rovnicí (7) nebo složitější implementací Beer-Lambertova zákona (8) nebo jejich vzájemným vztahem vyjádřeným rovnicí 9 (Pomeroy, Dion 1996; Aubin, Beaudet, Messier 2000; Hardy et al. 2004; Sicart et al. 2004):

$$\tau_c = \frac{K\downarrow_f}{K\downarrow} \tag{7}$$

$$K\downarrow_f = K\downarrow * e^{-k*LAI} \tag{8}$$

$$\tau_c = e^{-k*LAI} \tag{9}$$

Koeficient *k* lze také vypočítat rovnicí (Sicart et al. 2004):

$$k = \frac{-\ln(\tau_c)}{LAI} \tag{10}$$

kde:

τ_c – přenosová schopnost vegetace

$K\downarrow_f$ – příchozí utlumené krátkovlnné záření pod vegetací [$W.m^{-2}$]

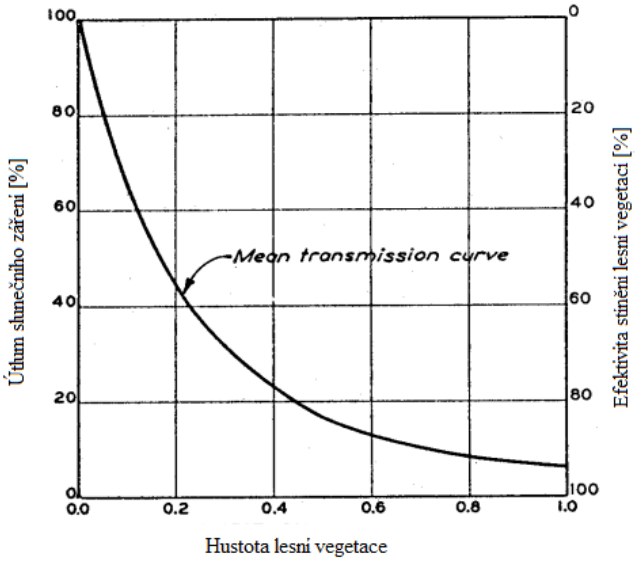
$K\downarrow$ – příchozí krátkovlnné záření nad vegetací [$W.m^{-2}$]

k – světelný útlumový koeficient vegetace [m^{-1}]

LAI – Leaf Area Index

e^{-k*LAI} – hodnota vyjadřující celkové zachycení krátkovlnného záření vegetací

Podle Aubin et al. (2000) je modifikace Beer-Lambertova zákona dostatečná pro základní výpočet útlumu krátkovlnné radiace, resp. intercepčního zachycení záření. Hardy et al. (2004) ale tvrdí, že zákon lze využít pouze v případě homogenního lesního porostu.



Obrázek 2: Útlum slunečního záření vegetací v závislosti na hustotě lesní vegetace během jarního tání (USACE 1998, upraveno)

2.2.3 Dlouhovlnná radiace

Dlouhovlnná radiace neboli termální záření se pohybuje ve vlnových délkách od 6,8 do 50 μm (podle Singh a Singh (2001) a DeWalle, Rango (2008) je horní hranice až 100 μm). Dlouhovlnná radiace je emitovaná nejen přímo zářením Země a Sluncem, ale i zpětně oblaky, atmosférou, lesní vegetací a v podstatě všemi objekty, které mají teplotu vyšší než absolutní nula. V atmosféře nedochází k rozptylu dlouhovlnného záření jako v případě krátkovlnného. Zatímco krátkovlnná radiace je závislá na denní době, výměna energie dlouhovlnné radiace probíhá neustále (USACE 1998; DeWalle, Rango 2008). Čistá výměna energie dlouhovlnného záření lze vyjádřit jednoduchou rovnicí:

$$Q_{nl} = L\downarrow - L\uparrow \quad (11)$$

kde [W.m^{-2}]:

Q_{nl} – bilance dlouhovlnné radiace (±)

L↓ – celkové příchozí dlouhovlnné záření

L↑ – celkové odražené dlouhovlnné záření

Odražená radiace lze spočítat i upravenou rovnicí Stefan-Boltzmannova zákona:

$$L\uparrow = \varepsilon * \sigma * T_s^4 + (1 - \varepsilon) * L\downarrow \quad (12)$$

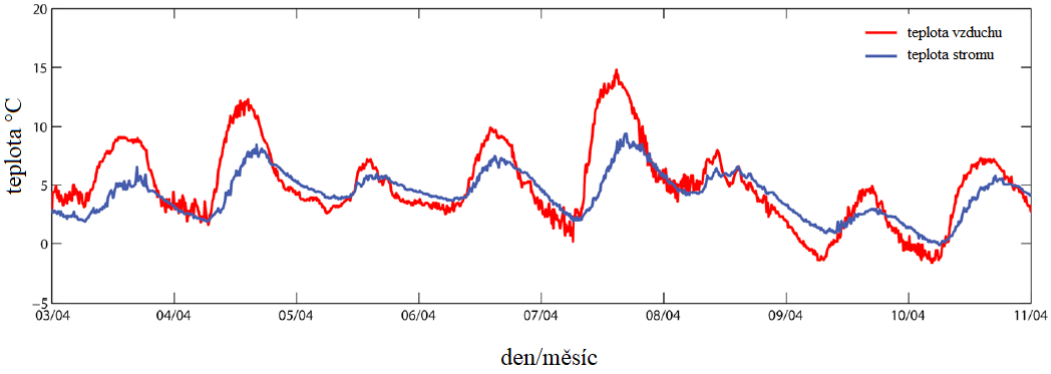
kde:

ε – emisivita povrchu sněhové pokrývky

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta (5,67 * 10^{-8} W.m^{-2} K^{-4})

T_s – povrchová teplota sněhové pokrývky [K]

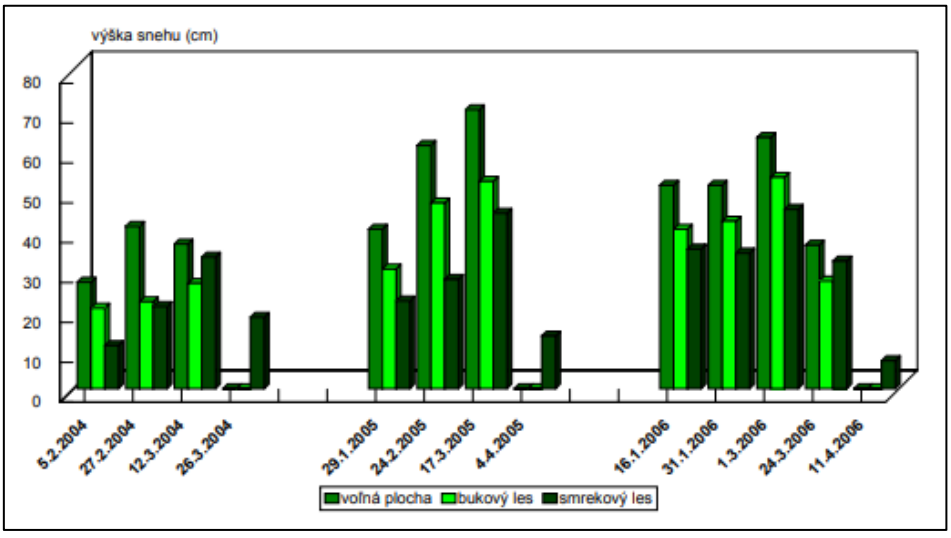
Podle Pomeroy et al. (2009) je emisivita ε sněhové pokrývky přibližně stejná jako je tomu u ideálního zářiče, neboli černého tělesa, tzn. blízká hodnotě jedna. Přímým útlumem se v koruně stromů mění sluneční energie na dlouhovlnné záření, které je zpětně emitováno. Studie od Sicart et al. (2004) uvádí, že za jasné oblohy se denní průměr dlouhovlnné radiace pod lesní vegetací zvýšil až o 50 %. Pomeroy et al. (2009) dále uvádí, že teplota pod lesní vegetací, nad ní a teplota samotné vegetace se razantně mění podle zakrytí oblohy oblačností. Při oblačné obloze nepřichází krátkovlnné záření a teplota vzduchu a vegetace se vyrovná. V případě slunečného dne se teplota vegetace a nad vegetací, příp. na otevřené ploše zvýší, a zvýší se celková radiace působící na sněhovou pokrývku zvýšením emitace dlouhovlnného záření lesním porostem (Sicart et al. 2004; Essery et al. 2008; Pomeroy et al. 2009). Může nastat situace, že teplota vegetace bude nižší, resp. vyšší než teplota vzduchu. Je to způsobeno větší setrvačností v udržování teploty vegetace nebo v případě jasných nocí radiačním ochlazením (Essery et al. 2008). Studie od Webster et al. (2016) se zabývala měřením rozdílných teplot vzduchu a kmenů stromů. Obrázek 3 ukazuje změny teplot vzduchu a stromu během několika dní a nocí, kdy během dne byla vyšší teplota právě u okolního vzduchu a v noci tomu bylo naopak. Největší rozdíly v teplotách byly mezi 12 a 18 hodinou, kdy teplota vzduchu značně překračovala teplotu kmenu stromu. Podobnému radiačnímu ochlazení podléhá i samotná sněhová pokrývka. Podle Chang et al. (1976) se právě mikrovlnné záření v rozsahu vlnových délek 0,8-2,8 cm podílí na ztrátě tepla sněhové pokrývky, které vyzařuje v případě ledovce až z hloubky 10 m.



Obrázek 3: Teplota vzduchu měřená nad lesní vegetací a teplota kmene stromů snímaná termoelektrickými články v Seenhornwaldu (Webster et al. 2016, upraveno)

2.2.4 Rozdíly ve vegetačním pokryvu

Nejen celková výška vegetace (travnaté plochy/les), ale i druhové složení v případě lesního pokryvu hraje velmi důležitou roli ve výsledné podobě sněhové pokrývky pod vegetačním krytem. Podle Hríbik, Škvarenina (2007) se vodní hodnota sněhu liší na otevřených prostranství, v listnatém a v jehličnatém lese. V průběhu zimy nejvyšší vodní hodnotu má otevřená plocha a nejnižší smrkový les. Ke konci zimy, kdy sněhová pokrývka odtává, vlivem stínění jehličnatých lesů se SWE po nimi zachovává a dochází ke snižování hodnoty u otevřené plochy a listnaté vegetace. Podstatný rozdíl je i v akumulaci sněhu. Na otevřené ploše se akumuluje více sněhu než na ostatních dvou plochách (obr. 4). Změna je opět ke konci zimy, kdy sněhová pokrývka v jehličnatém lese je chráněna proti solární radiaci a dochází k pomalejšímu tání (Hríbik, Škvarenina 2007).



Obrázek 4: Výška sněhové pokrývky a její změn v průběhu zimy 2004/2005 v CHKO Poľana na Slovensku (Hríbik, Škvarenina 2007)

Gelfan, Pomeroy, Kuchment (2004) ve své studii sestavili model na základě hydrologických výzkumů z Ruska a Kanady k určení rozdílné akumulace, redistribuce, sublimace a tání na různých lokalitách. Autoři zjistili, že celková akumulace sněhu v průběhu 17 zimních sezón v severozápadním Rusku na otevřeném prostranství byla o 15 % vyšší než pod jehličnatými lesy díky intercepci sněhu a jeho sublimaci. Míra tání byla až o 23 % vyšší také u otevřené plochy. Rozdílná akumulace a rychlost tání byla potvrzená i v našich horských podmínkách, kdy SWE v jehličnatých lesních lokalitách na Šumavě byla o 40 % menší než na otevřených plochách a tání v lesích dvakrát pomalejší (Jenicek, Pevna, Matejka 2017).

Zásadní vliv na vegetační pokryv mají tzv. disturbance, kdy dojde k částečnému nebo úplnému poničení lesa. Tím samozřejmě dochází ke změnám jeho vlastností a mění se jeho celkový vliv na sněhovou pokrývku. Typickým příkladem u nás je les na Šumavě zasažený lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*). Tento druh hmyzu dokáže poničit rozsáhlé plochy smrkových lesů, kdy dojde k jejich seschnutí a ztrátě jehlic (obr. 5). Rychlost tání sněhu se po defoliaci lesa zrychlila o 18 % (Jenicek, Pevna, Matejka 2017). Studie v Britské Kolumbii v Kanadě od Winkler et al. (2015) potvrzuje značné změny v akumulaci i tání sněhu vlivem disturbancí. V borovicovém lese vzrostla propustnost sněhových srážek o 24 % pět let po napadení kůrovcem. V první roce hodnota SWE u otevřené plochy v dubnu byla o 48% vyšší než v čerstvě napadeném borovicovém lese. Tento rozdíl byl po osmi letech snížen na 23 %. To poukazuje na značný vliv disturbancí lesní vegetace na konečnou akumulaci sněhu.

Obrázek 5: Příklad poničené lesní vegetace po kůrovcové kalamitě v Belianských Tatrách na Slovensku (vlastní foto)

2.2.5 Další významné faktory ovlivňující sněhovou pokrývku

Sněhové srážky jsou ovlivněny vegetačním pokryvem. Lesní vegetace zachycuje určité množství sněhových srážek a podléhá *intercepci*. Sníh zachycený na větvích zvýší nejen radiační odrazy mezi lesem a sněhem, ale také se nezúčastní hydrologického odtoku. Rozdíl mezi srážkami odpařený zpět do atmosféry a srážkami pokračujícími v hydrologickém cyklu lze označit jako intercepční ztrátu. Ačkoliv je intercepce sněhu důležitým faktorem pro studium celkové akumulace sněhu, není hlavní výzkumnou otázkou této práce.

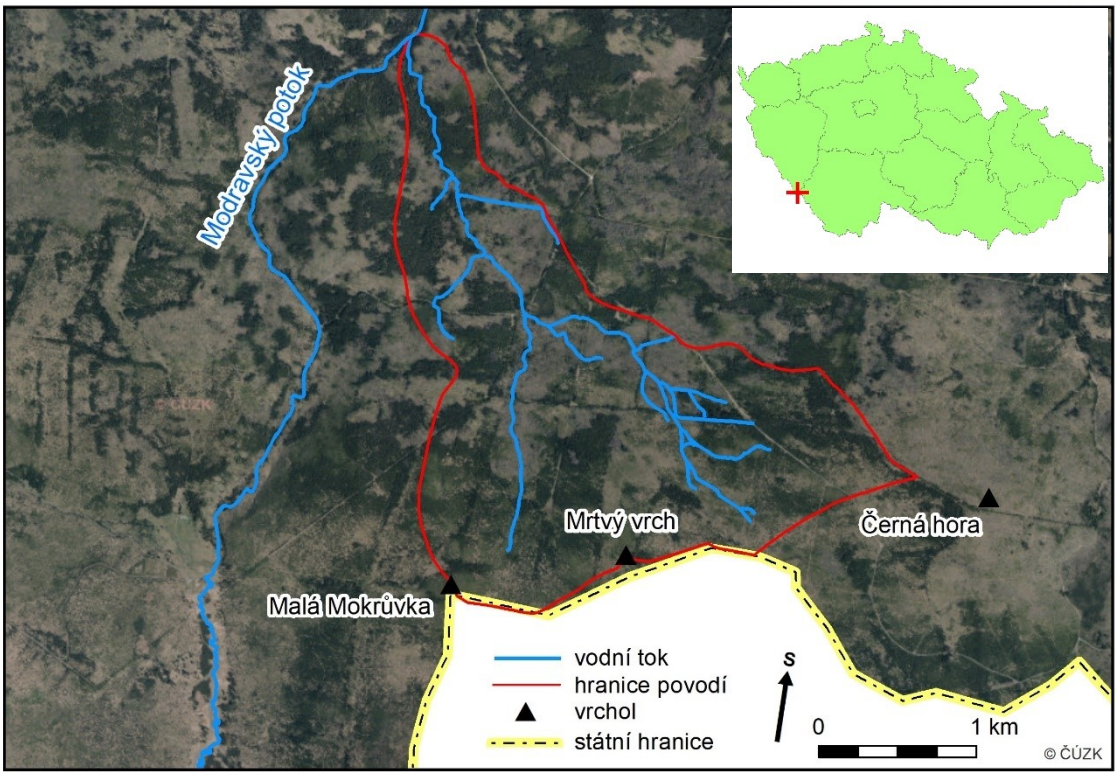
Lesní vegetace mění celkovou radiační a turbulentní výměnu tepla (viz 2.2.2, 2.2.3). Účinky lesů se mění podle různého druhového složení, stáří i hustoty porostu (DeWalle, Rango 2008). Radiační a turbulentní výměna tepla souvisí s klimatickými podmínkami pod lesní vegetací, které se velmi liší. Její měření je velmi problematické, proto existují dva přístupy k odhadu mikroklimatu ve vegetačním krytu. První přístup je založen na simulaci fyzikálních mechanismů, kterými se zabývaly studie např. od Pomeroy a Dion (1996) o radiačních tocích a Hedstrom a Pomeroy (1998) o srážkách. Druhý přístup spočívá ve využití empirických vztahů mezi meteorologickými prvky ze současných měření z otevřeného prostranství a lesa (Gelfan, Pomeroy, Kuchment 2004).

Mezi další důležité faktory ovlivňující akumulaci a tání sněhu patří *meteorologické jevy*. Podle Pomeroy et al. (1997) vítr byl hlavním faktorem redistribuce sněhu především na otevřených plochách v Saskatchewanu v Kanadě, kde snižoval celkovou akumulaci sněhové pokrývky jejím odnosem a zvyšoval sublimaci a tání sněhu. Velký vliv má i oblačnost, která přímo ovlivňuje jak změny teploty vlivem solární radiace, tak i celkové množství energie, které příjme sněhová pokrývka (Schneider 1972).

3 Fyzicko-geografická charakteristika území Ptačího potoka

3.1 Vymezení zájmového území

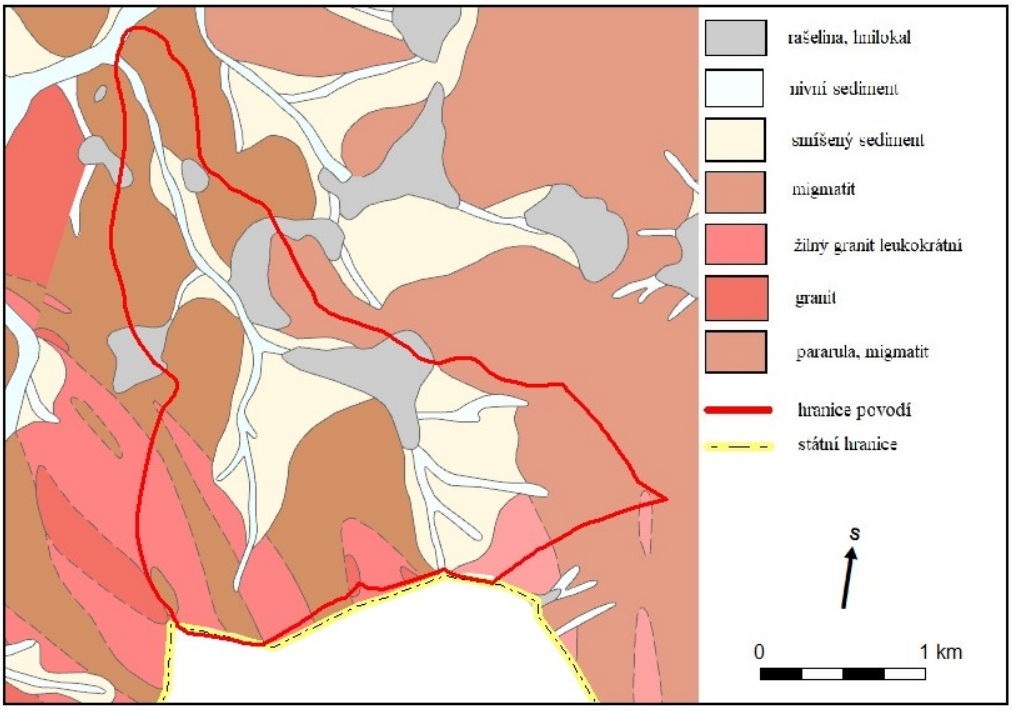
Zájmové povodí Ptačího potoka se nachází u česko-německé hranice v centrální části Šumavy přibližně 21 km jihozápadně od Vimperka. Experimentální území bylo vybráno na základě polohy automatických stanic Katedry fyzické geografie a geoekologie Univerzity Karlovy, která poskytují data potřebná pro výzkum v této bakalářské práci. Hydrologické pořadí povodí Ptačího potoka je 1-08-01-0020 a je jedním z pramenných povodí Vydry. Ptačí potok pramení na západní straně Černé hory (1315 m n. m.) na Biskupské slati v nadmořské výšce 1220 m a jeho délka činí 4,3 km. Celková plocha povodí je 5,5 km^2. Ptačí potok má mnoho malých přítoků, větším je pouze levostranný přítok Mokrůvka. Na jejich soutoku bývala vodní nádrž a nachází se zde jedna z automatických stanic měřící záření. Ptačí potok ústí do Modravského potoka v 1047 m n. m. Od soutoku orografická hranice povodí pokračuje jižním směrem až k nejvyššímu bodu povodí, kterým je vrchol Malá Mokrůvka (1330 m n. m.). Hranice poté pokračuje severovýchodně podél státní hranice přes horu Mrtvý vrch (1254 m n. m.) a na západním svahu Černé hory se stačí zpět a pokračuje severozápadním směrem až k soutoku (obr. 6). Celkové převýšení povodí je 273 m.



Obrázek 6: Zájmové území Ptačího potoka (ArcČR, ČÚZK)

3.2 Geologické a geomorfologické poměry

Šumava je jedním z nejstarších pohoří v Evropy a je tvořena převážně horninami prekambrického a paleozoického stáří. Šumava patří do geologické jednotky moldanubika a moldanubického plutonu a je nejstarší částí Českého masívu. V pohoří se nacházejí také kvartérní uloženiny s polygenetickým charakterem, kterým dominují svahové uloženiny, rašeliny a v některých částech i ledovcové sedimenty. Moldanubický pluton se projevuje žulovými masivy, které se v okolí zájmového území nachází v povodí Vydry a částečně zasahuje i do povodí Ptačího potoka. Moldanubikum tvoří soubor středně až silně metamorfovaných hornin, mezi které patří pararuly a migmatity, a je hlavní jednotkou v povodí Ptačího potoka. Zájmové povodí je reprezentováno převážně migmatity a ve východní částí je přimísená pararula. Nejvyšší část v jihozápadní části povodí v okolí vrcholu Malé Mokrůvky je tvořena granity, které patří k moldanubickému plutonu (Mísař 1984; Demek a kol. 1987). Centrální část zájmového území je tvořena písčito-hlinitým až hlinito-písčitým sedimentem, který je protkaný nivními sedimenty vytvořenými vodními toky Ptačího potoka, Mokrůvky a jejich přítoky. Podél hlavního vodního toku v severovýchodní části zájmového území se nachází rašelina s hnilokalem, které tvoří Ptačí slať (obr. 7).

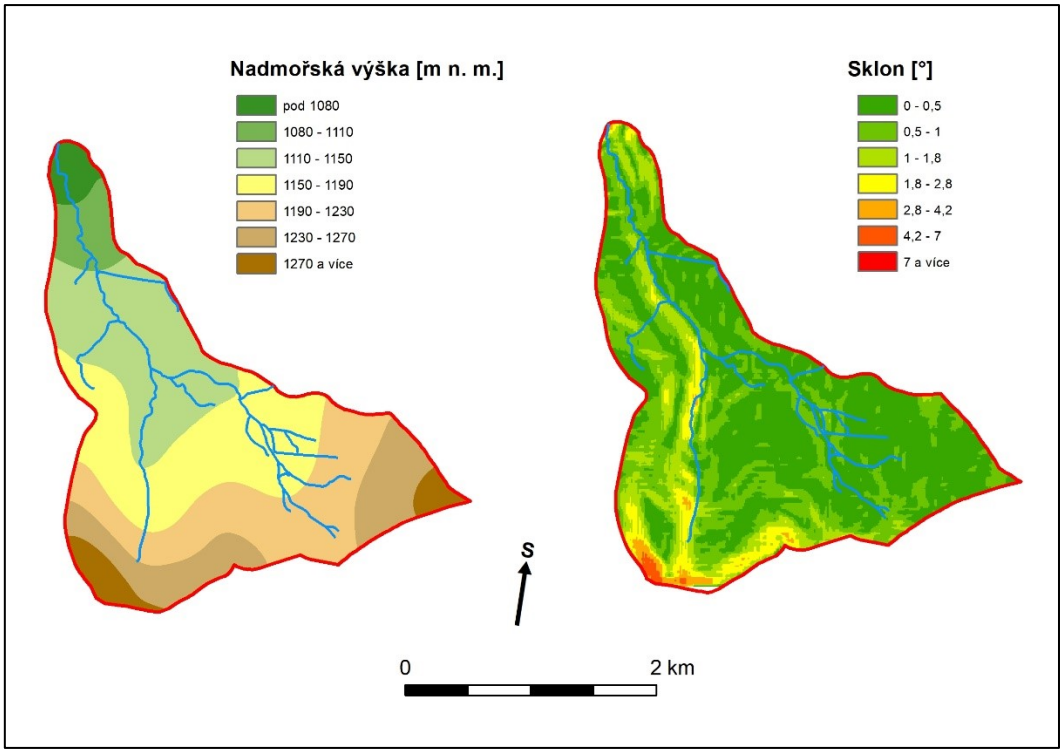


Obrázek 7: Geologická mapa povodí Ptačího potoka (ArcČR, ČGS)

Geomorfologický vývoj Šumavského pohoří začal již v mladším paleozoiku. Po hercynském vrásnění docházelo ke značné denudaci. V terciéru se horský masiv vyzdvihl působením alpinsko-himalájským vrásněním o několik set metrů, které podmínilo vyšší říční

hloubkovou erozi, díky které se začala údolí zařezávat do krajiny. Obecně byla kvartérní denudace velmi slabá a terciérní a starší reliéf se zachoval na velké ploše (Mísař 1984).

V geomorfologickém členění reliéfu České republiky patří zájmové povodí Ptačího potoka do geomorfologického okrsku Kvildské pláně (konkrétně podokrsek Modravské pláně), které jsou nejvyšší částí podcelku Šumavské pláně. Ty dále patří do celku Šumava – oblast Šumavská hornatina – Šumavská subprovincie – provincie Česká vysočina (Demek a kol. 1987). Celá oblast má charakter ploché hornatiny. Mělká a široká údolí jsou často vyplněná rašeliništi a nad nimi vystupují oblé vrcholy, u kterých došlo k periglaciálnímu zvětrávání. Celé povodí Ptačího potoka je orientováno severozápadně s postupně klesající nadmořskou výškou. Naprostá většina území má velmi malou sklonitost do 3°, výjimku tvoří pouze svahy vrcholu Malá Mokrůvka v jižní části povodí a podél levého břehu vodního toku Mokrůvka. (obr. 8).



Obrázek 8: Výškové a sklonitostní poměry povodí Ptačího potoka (ArcČR)

3.3 Pedologické poměry území

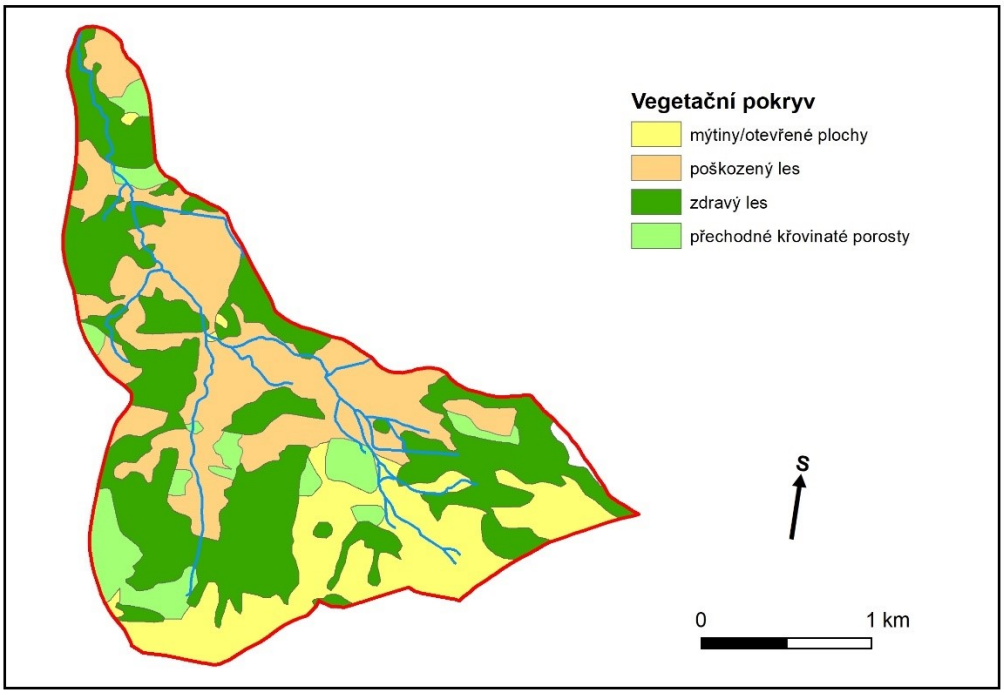
V nadmořských výškách vyšších než 800 m se nachází převážně podzoly a kryptopodzoly, které se nachází v okrajových částech povodí Ptačího potoka (především na svazích a ve vrcholových částech). V rámci celého území České republiky zaujímají podzoly a kryptopodzoly plochu pouze okolo 6 %. Tento půdní typ odpovídá chladnému a boreálnímu klimatu a jeho půdotvorným substrátem jsou zvětraliny kyselých a živinami chudých hornin (Chuman 2015).

Půdy v zájmovém území mají mělký až středně hluboký profil se skeletovitostí mezi 25-50 %, což odpovídá nízkému stupni vývoje. Převažují zde především organozemě a na okrajových částí výše zmíněné podzoly a kryptopodzoly. Jedná se o lehké až střední skeletovité půdy, mezi jejich hlavní vlastnost patří vysoká vsakovací a malá retenční schopnost. V případě vyšší svažitosti to způsobí rychlejší odtok srážkové vody z území povrchovými odtoky. I přesto, že organozemě mají obrovský retenční potenciál, v případě jejich plného nasycení ještě více urychlí odtok povrchové vody (Šefrna 2004).

3.4 Vegetace a krajinný pokryv

Pohoří Šumavy je tvořené až z 80 % lesy, které převážně tvoří smrk ztepilý. Podobná charakteristika platí i pro experimentální povodí Ptačího potoka, kde smrk tvoří většinu v zastoupení vysokých dřevin, což se výrazně projevuje na celkové charakteristice území. Lze zde nalézt také buky, jedle a jeřáby. Na otevřených plochách se vyskytují kosodřeviny a rašelinné porosty (Demek a kol. 1987). Celkový vliv vegetačního pokryvu na srážko-odtokový režim a akumulaci srážek vlivem intercepce je více popsán v předchozích kapitolách 2.2.4 a 2.2.5.

Nejdůležitější změnou vegetačního pokryvu jsou náhlé disturbance, které ovlivňují celou strukturu lesa a mění charakter celé oblasti. Nejvýznamněji se na změnách podílí lýkožrout smrkový (*Ips typographus*), který napadá rozsáhlé smrkové porosty a způsobuje jejich postupné odumírání. To se projevuje opadem jehlic a úplným seschnutím stromu, kdy se kmen a větve stanou velmi křehkými a více podléhají větrným poryvům. Disturbance způsobené silným větrem jsou dalším důležitým faktorem při změnách lesního pokryvu, kdy dojde k vyvrácení značné plochy lesů nebo k polámání lesních reliktů po kůrovcové kalamitě. Mimo zdravý a poničený smrkový les tvoří vegetační pokryv povodí Ptačího potoka mýtiny a nízké keřovité porosty (obr. 9).



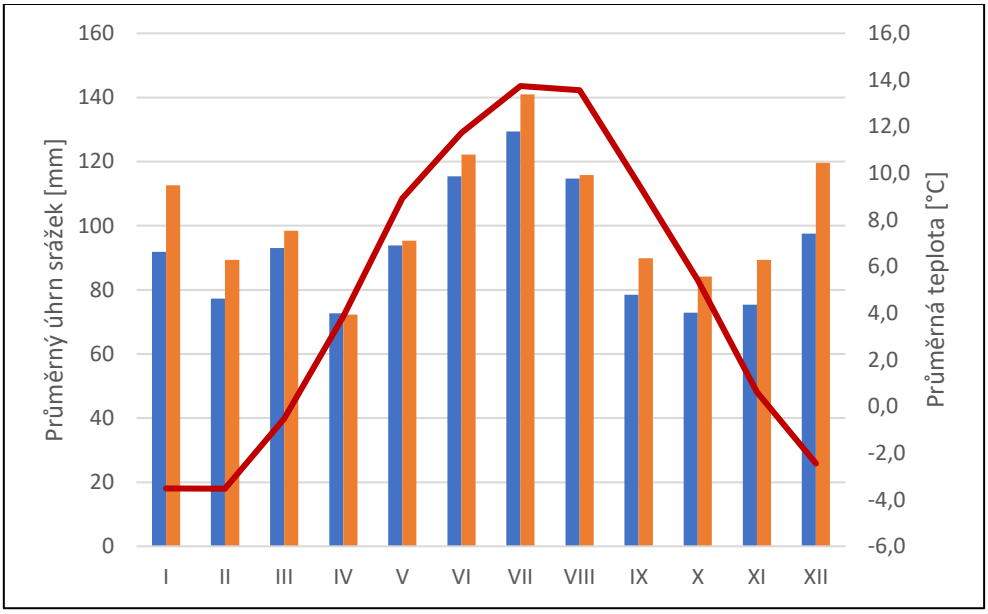
Obrázek 9: Vegetační pokryv povodí Ptačího potoka (ArcČR, Ortofoto ČÚZK 3. 6. 2019, vlastní vektorizace)

3.5 Klimatické poměry

Roční chod teplot a měsíční úhrny srážek jsou velmi důležitým faktorem při akumulaci a následném tání sněhu. Tyto dva meteorologické jevy jsou ovlivněny především charakterem klimatu, který v zájmové oblasti převládá. Experimentální povodí Ptačího potoka patří do podnebí s rozhraním mezi kontinentálním a oceánským klimatem. Kontinentálnímu klimatu odpovídá roční chod teploty, kdy podle Köppenovy klasifikace podnebí oblast zájmového území spadá do kategorie Dfc – boreálního kontinentálního podnebí. Tato kategorie označuje konkrétně subpolární podnebí, kdy teplota nejchladnějšího měsíce je -3 °C a méně. Zároveň teplota nejteplejšího měsíce je +10 °C a vyšší a počet těchto měsíců není vyšší než tři. Měsíční průměrné úhrny napovídají právě charakteru oceánského klimatu, kdy jsou srážky téměř rovnoměrně rozložené během celého roku (obr. 10). Podle Quittovy klasifikace spadá samotné povodí Ptačího potoka do kategorie CH3, která označuje chladnou klimatickou oblast (Quitt 1971).

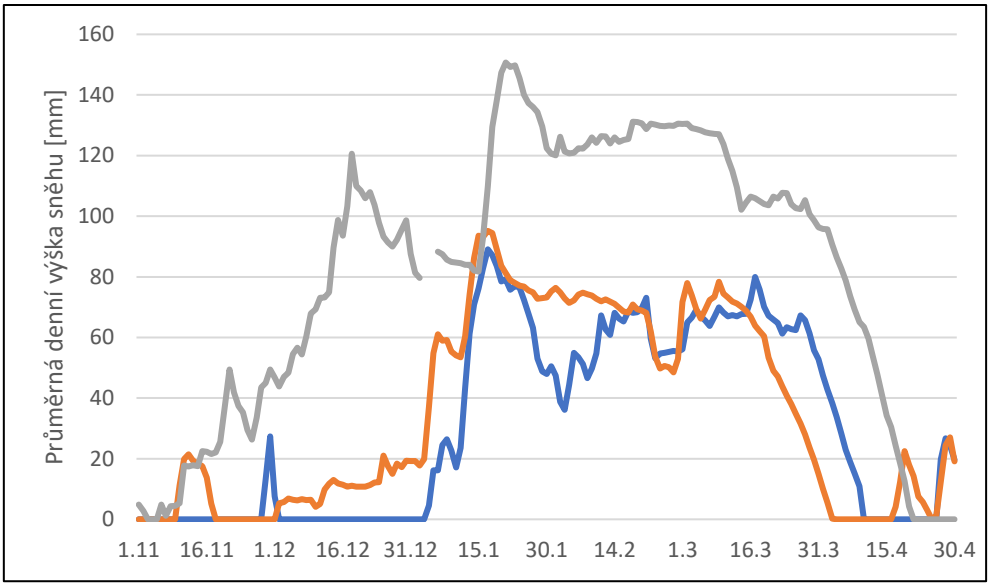
Nejchladnějšími měsíci jsou leden a únor, kdy průměrná měsíční teplota dosahuje shodně -3,5 °C. Nejteplejším měsícem je červenec s hodnotou +13,7 °C. Průměrná roční teplota mezi lety 1980 až 2013 činí 4,8 °C. Srážky jsou poměrně rozložené v průběhu celého roku v případě obou meteorologických stanic. Úhrny srážek jsou vyšší pro stanici Filipova Huť, která se nachází blíže k zájmovému území. Průměrný roční úhrn srážek pro stanici Filipova

Huť mezi lety 1980-2013 je 1202 mm, což řadí oblast kolem zájmového území k oblastem s nejvyššími srážkami na Šumavě a také v rámci celé České republiky. Vysoký roční úhrn srážek je způsobený orientací celé oblasti na severozápad, čímž se stává návětrnou stranou při převládajícím západním až jihozápadním proudění a podporuje vznik srážek. Průměrný počet dní se sněhovou pokrývkou v zimní sezóně od začátku října do konce dubna v letech 1979-2014 pro stanici Churáňov je 137.



Obrázek 10: Průměrné měsíční úhrny srážek z meteorologických stanic Churáňov (modrá) a Filipova Huť (oranžová) a průměrná měsíční teplota na stanici Churáňov (červená) v letech 1980-2013 (KFGG, ČHMÚ, vlastní zpracování)

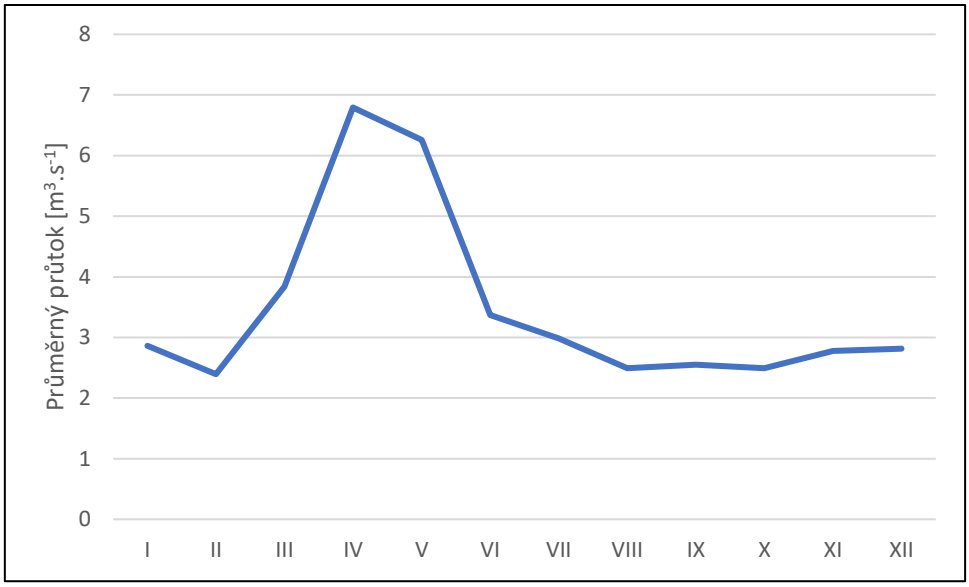
Data získaná z meteorologické stanice Filipova Huť lépe ilustrují roční chod teplot a úhrny srážek pro zájmové povodí Ptačího potoka, protože se nachází mnohem blíže než stanice Churáňov. Z dat automatické stanice SPA nacházející se přímo v povodí Ptačího potoka vyplývá, že první větší sněhová pokrývka se objevuje na začátku listopadu. Podle celkového charakteru zimy se odvíjí nejen maximální výška sněhové pokrývky, ale také počet dnů se sněhovou pokrývkou. Z obrázku 11 je patrné, že nejvíce sněhu se akumuluje do poloviny ledna a poté přijde mírná obleva. Začátek hlavní události tání pro tuto oblast je obvykle kolem poloviny března.



Obrázek 11: Graf znázorňující vývoj výšky sněhové pokrývky v zimních sezónách 2015/2016 (modrá), 2016/2017 (oranžová) a 2017/2018 (šedá křivka s výpadkem dat začátkem ledna) na automatické stanici SPA v povodí Ptačího potoka (KFGG, vlastní zpracování)

3.6 Hydrologické poměry

Povodí Ptačího potoka patří s rozlohou 5,5 km^2 mezi velmi malá povodí a je součástí úmoří Severního moře. Délka rozvodnice je necelých 12 km, celková délka říční sítě činí 11,7 km a hustota říční sítě je 2,1 km na km^2. Hlavní tokem povodí je Ptačí potok se svojí délkou 4,3 km pramenící na západním svahu Černé hory a ústí do Modravského potoka, který jako tok 6. řádu po několika kilometrech vytváří soutokem s Roklanským a Filipohuťským potokem řeku Vydru. Zde se nachází profil Vydra – Modrava, podle kterého lze určit chod ročního průtoku z celé oblasti včetně zájmového území. Z grafu (obr. 12) je patrné, že povodí nejlépe vystihuje sněhovo-děšťový odtokový režim, kdy je průtok nejvíce ovlivněn jarním táním sněhu. V průběhu roku se průtok pohybuje lehce kolem 2,5 m^3.s^{-1}. Průtok se lehce zvyšuje v prosinci, kdy obvykle přichází obleva charakteristická pro polovinu prosince, když se mění proudění vzduchu a do Střední Evropy přichází teplý jihozápadní vzduch. Nejnižší průtok (2,4 m^3.s^{-1}) je v únoru po výše zmíněné pravidelné akumulaci sněhu koncem ledna. Poté průtok prudce roste a nejvyšších hodnot (v průměru až 6,8 m^3.s^{-1}) nabývá v dubnu, kdy je nejsilnější tání.



Obrázek 12: Graf průměrných měsíčních průtoků profilu Vydra – Modrava v letech 1980-2013 (ČHMÚ)

4 Metody výzkumu

4.1 Měřící stanice

Data v této práci byla získána terénním výzkumem a měřením, a také sběrem dat automatickými stanicemi Katedry fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (Ptačí potok) a ČHMÚ (Filipova Huť, Churáňov).

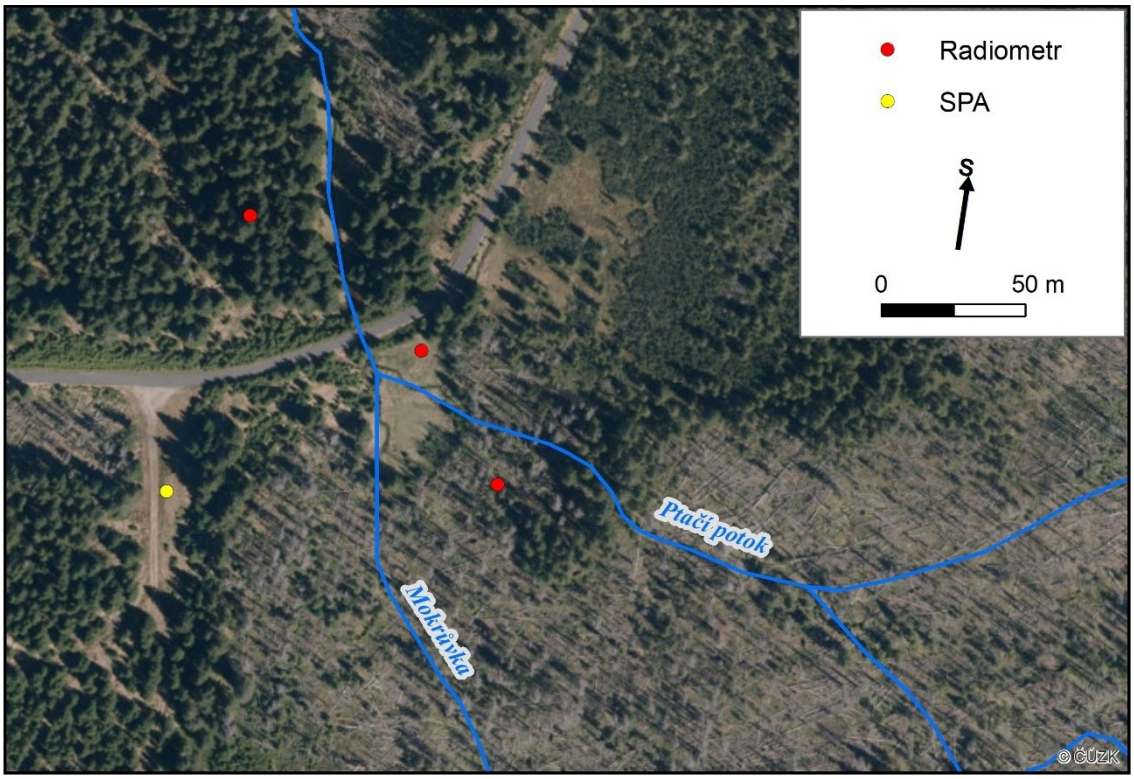
Stanice Filipova Huť měří automaticky srážky v hodinovém intervalu. Churáňov je stanicí zajišťující automatický sběr dat meteorologických prvků, která jsou ve stanovené hodiny odebírána odbornou obsluhou. Data (z let 1979-2014) z těchto stanic jsou použita ve fyzicko-geografické charakteristice území.

Automatické stanice nacházející se na Ptačím potoce jsou celkem čtyři. První tři stanice měří kontinuálně výšku sněhu ultrazvukovým čidlem, teplotu vzduchu, a především horním čidlem radiometru přicházející krátkovlnné a dlouhovlnné záření a spodním čidlem radiometru odražené krátkovlnné záření i povrchem vyzářené dlouhovlnné záření v 10minutovém intervalu (obr. 13).

Obrázek 13: Automatická stanice PřF UK měřící elektromagnetické záření na otevřené ploše u Ptačího potoka (foto vlastní)

Radiometrické stanice jsou rozmístěné ve třech odlišných lokalitách (obr. 14). První stanice se nachází v severním cípu *otevřené plochy* o rozloze přibližně 1300 m^2. Plocha je

ohraničená nízkým smrkovým porostem ze severní a západní strany, z východu a z jihu jí obklopuje smrkový les napaden lýkožroutem smrkovým. Druhá stanice je umístěná uvnitř zdravého smrkového lesa. Třetí stanice se nachází ve výše zmiňovaném disturbovaném lese, který je poškozený nejen kůrovcem, ale i vichřicí.



Obrázek 14: Rozmístění zájmových lokalit s polohou automatických stanic v okolí Ptačího potoka (ArcČR, ČÚZK, upraveno)

Poslední automatickou stanicí je SPA (Snow Pack Analyzer), která dokáže měřit nejen SWE (vodní hodnota sněhu) a výšku sněhu, ale i hustotu sněhu, obsah kapalné vody a ledu ve sněhové pokrývce na základě elektrické impedance. Stanice je opatřena teplotními senzory, které jsou v různé výšce od země pro měření teploty v odlišných vrstvách sněhu a pro teplotu vzduchu. Data jsou měřená nepřetržitě každých 10 minut a pro práci byla využita data pouze s hodinovým průměrem výšky sněhu od listopadu 2015.

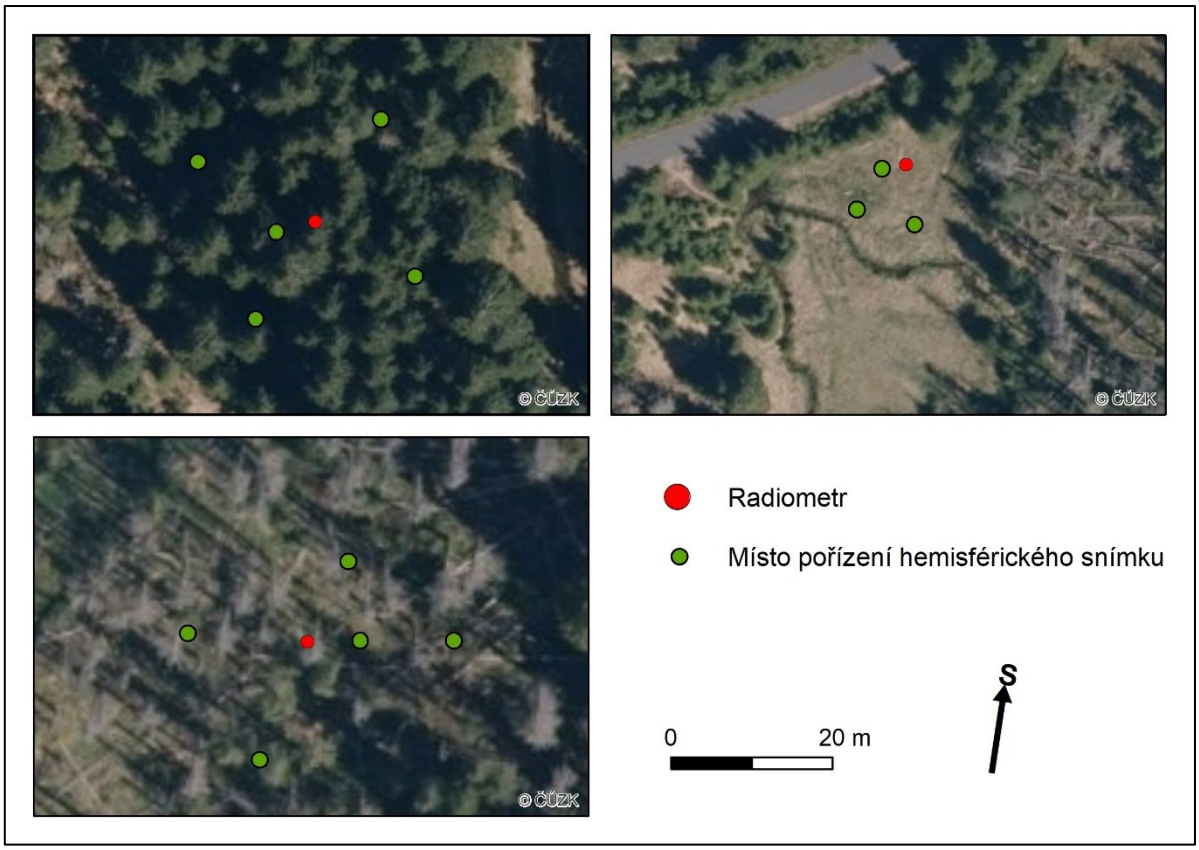
4.2 Terénní výzkum

Terénní měření výšky sněhu a SWE mělo pouze kontrolní charakter, kdy pomocí sněžného válce a ruční digitální váhy bylo spočítáno SWE (viz kap. 2.1.2) a porovnalo se s hodnotami naměřenými automatickou stanicí SPA. Hlavní terénní výzkum spočíval v pořízení hemisférických snímků vegetace ve výše zmíněných třech lokalitách kolem

radiometrických stanic. Ke snímání byl použit digitální zrcadlový fotoaparát Nikon D3200 s fisheye objektivem o úhlu záběru 180° – SIGMA 4,5 mm f/2,8 EX HSM DC Fisheye circular (obr. 15). Při pořizování hemisférického snímku bylo velmi důležité nastavení času expozice a clonového čísla, aby nedošlo k přesvícení snímku nebo naopak nebyl příliš tmavým. Čím je čas expozice delší a clonové číslo menší, tím více světla se dostane do objektivu a snímek je světlejší. Pro snímky pod zdravou vegetací byla délka clony kolem 1/80 s a na otevřené ploše kolem 1/200 s. Na fotoaparát se nastavil na manuální režim, aby bylo možné nastavit potřebné parametry včetně zaostření pro pořízení snímku. Velmi důležitým prvkem bylo také správné zaznamenání severu – buď správně natočeným fotoaparátem nebo umělým bodem viditelným na fotografii.

Obrázek 15: Digitální zrcadlový fotoaparát Nikon D3200 s objektivem fisheye na otevřené ploše (vlastní foto)

Pro každou lokalitu byly pořízeny snímky ve dvou různých dnech. Prvním dnem je 15. 3. 2019, kdy došlo k vydatným sněhovým srážkám a lesní vegetace byla pokryta sněhem. Značná intercepce sněhu výrazně ovlivní výsledky další analýzy, proto bylo potřeba pořídit nové snímky lokalit bez zasněžené vegetace. Druhým dnem je 10. 4. 2019 s polojasným počasím. Celkem vzniklo dvacet hemisférických snímků v lesních lokalitách a šest na otevřené ploše (obr. 16). Polovina snímků je pro zasněženou vegetaci, druhá polovina pro vegetaci bez intercepovaného sněhu.



Obrázek 16: Schéma pořízení hemisférických snímků vegetace (ArcČR, ČÚZK, upraveno)

4.3 Zpracování dat

4.3.1 Data z automatických stanic

Automatické stanice odesílají data na server, ze kterého je lze stáhnout ve formátu .csv. Jedná se o formát souboru, se kterým lze pracovat v prostředí softwaru Microsoft Office Excel. Data použitá pro tuto práci zahrnují různé časové intervaly, proto je bylo třeba upravit do jednotné podoby.

Ze stanic ČHMÚ jsou data z období 1979-2014 po jednotlivých dnech, konkrétně z Churáňova obsahují zpracovávaná data průměrnou výšku sněhu a celkový úhrn srážek za jeden den, z Filipovy Huti jsou zde pouze denní úhrny srážek. Pro fyzicko-geografickou charakteristiku území se data upravila do měsíčních průměrů, resp. průměrných úhrnů za měsíc. Použitá data byla pouze z let 1980-2013 z důvodu neúplnosti pro první a poslední rok.

Data ze stanice pro měření výšky sněhu a SWE na otevřené ploše (Snow Pack Analyzer) dostupná od 1. 11. 2015 v desetiminutovém kroku byla agregována do hodinových průměrů. Data ze zimy 2018/19 dosud neprošla kontrolou homogenity, a proto byla použita v této práci pouze pro grafické doplnění . Z datového souboru byla upravena data pouze pro výšky sněhu

jako průměrné hodnoty za jeden den, aby mohla být dále zpracovávána s daty z radiometrů. Data obsahují výpadek stanice v období 2.-6. 1. 2018 (obr. 11, kapitola 3.5).

Automatické stanice na Ptačím potoce poskytují kontinuální data měřená v desetiminutových intervalech od 14. 12. 2015 do 30. 6. 2019 a obsahují hodnoty přijatého záření z horního a spodního senzoru pro oba typy záření, teplotu vzduchu a výšku sněhu. Data musela být upravena před dalším zpracováním, protože obsahují nejen výpadky měření, ale i chyby v případě zasněženého horního čidla (radiometr není vyhřívaný). Nejrychlejší způsob vyřazení chybných hodnot spočívalo ve výpočtu albeda sněhové pokrývky z denního průměru krátkovlnného záření na otevřené ploše. V případě, že albedo bylo vyšší než 100 %, resp. odražené záření převyšovalo příchozí globální záření, docházelo k tomu, že horní pyranometr byl přikrytý vrstvou sněhu a nemohl přijímat příchozí krátkovlnné záření, ale spodní nezasněžený pyranometr odražené záření od sněhové pokrývky přijímal. Na základě těchto podmínek bylo vyřazeno pro každou zimní sezónu (1. 11.-30. 4.) velké množství událostí s zasněženým horním pyranometrem (tab. 5). Začátek každého období lze považovat jako začátek akumulace sněhové pokrývky a v průběhu dochází k začátku události tání a tím se znovu odkrylo zasněžené čidlo. Proto lze předpokládat, že ve dnech po vyřazených obdobích nedocházelo k akumulaci.

Tabulka 5: Vyřazená období se zasněženým horním pyranometrem (KFGG, vlastní zpracování)

2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019
4.-7. 1.	7.-12. 11.	11.-14. 11.	20. 11.
11.-24. 1.	2.-3. 12.	19.-21. 11.	26.-27. 11.
31. 1.	12.-19. 12.	26. 11.-20. 12.	1. 12.
4.-5. 2.	25. 12.	22.-23. 12.	9.-17. 12.
10.-13. 2.	28.-29. 12.	28.-30. 12.	20.-21. 12.
17. 2.	3.-18. 1.	2.-4. 1.	24.-26. 12.
24.-25. 2.	31. 1.	16.-23. 1.	30. 12.-20. 1.
1.-4. 3.	18. 2.	1.-15. 2.	26.-31. 1.
6.-8. 3.	28. 2.-1. 3.	18. 2.	3.-4. 2.
13. 3.	6.-7. 3.	28. 2.	11.-13. 2.
15.-16. 3.	17.-20. 4.	18.-19. 3.	12.-15. 3.
26. 3.	26. 4.		18. 3.
26.-28. 4.	28. 4.		

Na závěr bylo třeba stanovit dny, resp. období napříč všemi sezónami, které lze mezi s sebou porovnávat. Hlavními kritérii byla výše zmíněná vyřazená období, dále existující sněhová pokrývka, případně data o hloubce sněhové pokrývky bez měřících chyb. Podle těchto podmínek byla stanovena následující časová období: 17. 2., 19.-22. 2., 25.-27. 2., 8.-10. 3.,

17. 3., 20.-25. 3., 27. 3.-3. 4. (příloha 1). Kratší úseky jsou zejména z počátku větších událostí tání, kdy docházelo ke sněhovo-srážkovým epizodám, delší úseky jsou až později, kdy ubylo případů zasněžení čidla. Všechna období jsou platná pro otevřené prostranství a zdravý les. U disturbovaného lesa došlo k měřícímu výpadku navíc v časovém úseku od 23. 2. do 7. 3. 2018.

Další analýza dat spočívala ve výpočtu propustnosti krátkovlnného záření v poškozené a zdravé vegetaci ve čtyřech po sobě jdoucích letech ve stejném období během jarního tání. Nejdříve byla pro výpočty data upravená v hodinových průměrech pro vybrané období 27. 3.-3. 4. K dalšímu výpočtu se využil vzorec pro výpočet útlumu solární radiace (rovnice 7, rovnice 13), jejíž výsledkem je procentuální propustnost vegetace neboli podíl prošlého krátkovlnného záření:

$$\tau_c = \frac{K\downarrow_f}{K\downarrow} \tag{13}$$

kde $K\downarrow_f$ je příchozí krátkovlnná radiace pod vegetací naměřená pyranometrem a $K\downarrow$ je globální příchozí krátkovlnná radiace získaná pyranometrem na otevřené ploše. V programu MS Excel byla propustnost graficky znázorněna pro poškozený a zdravý les včetně průměrné hodnoty příchozí krátkovlnné radiace za jednotlivé roky.

Pro analýzu dat dlouhovlnné radiace se použily také hodinové intervaly průměrných hodnot. K výpočtu bilance dlouhovlnné radiace (rovnice 11, rovnice 14), která byla následně využita při porovnání variability mezi poškozeným a zdravým lesem v průběhu let 2016-2019, byl použit vzorec:

$$Q_{nl} = L\downarrow - L\uparrow \tag{14}$$

kde Q_{nl} sice značí výměnu energie z dlouhovlnného záření, ale lze jí použít i pro výpočet celkové bilance dlouhovlnné radiace na dané ploše. $L\downarrow$ značí příchozí a $L\uparrow$ odchozí dlouhovlnnou radiaci. K výpočtu všech statistik byl využit program MS Excel se svými statistickými funkcemi a k výpočtu korelace byl využit Pearsonův korelační koeficient.

4.3.2 Hemisférické snímky

Hemisférické snímky se zpracovávaly pomocí programu *Gap Light Analyzer 2.0* (dále GLA). Nejdříve se musely snímky upravit tak, aby se ve vertikální směru nahoru nacházel na snímku sever. Úprava proběhla v softwaru *Zoner Photo Studio 17*, kde se snímky správně natočily a upravila se zároveň velikost výřezu pro následné zpracování.

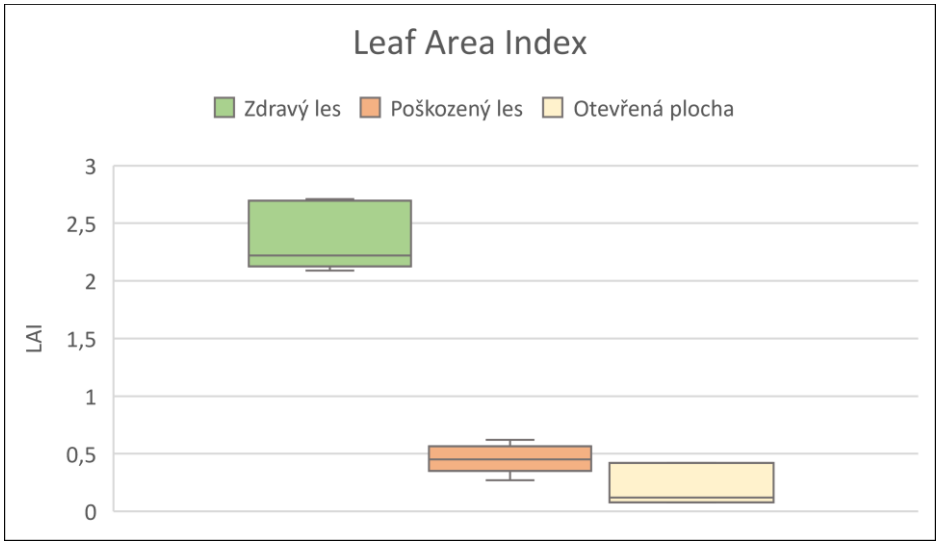
Po nahrání obrazu do GLA bylo prvním důležitým krokem nastavení konfigurace, ve které určujeme zadáváním hodnot geografickou pozici míst pořízení hemisférických snímků. Nastavovala se zde magnetická deklinace, resp. korekce, která udává o kolik je vychýlen magnetický sever od geografického. Pro oblast Ptačího potoka se hodnota pro 15. 3. 2019 a 10. 4. 2015 pohybovala okolo 3° 47‘. Je to důležitý faktor pro konečný výpočet pozice Slunce na obloze. S tím souvisí i nastavení zeměpisných souřadnic a nadmořské výšky. Všechny tři lokality jsou od sebe vzdáleny maximálně 200 m a rozdíl nadmořské výšky jsou přibližně 3 m (průměrná nadmořská výška je 1127 m n. m.). Rozdíl je tedy zanedbatelný a nebylo potřeba vytvořit různé konfigurace. Dále se nastavovala délka sněhové sezóny, která se stanovila od 1. listopadu do 30. dubna. Ostatní hodnoty byly nastaveny defaultně a pro pouhý výpočet LAI nejsou důležité (Frazer, Canham, Lertzman 1999).

Dalším krokem je registrace obrazu, kdy se vymezí přesný výřez oblohy, na kterém proběhne výpočet, Před konečnou kalkulací je nutné provést „prahování“ snímku funkcí *Threshold*, kterou se obraz převede do dvoubarevné bitmapy složené z černobílých pixelů. Prahová hodnota určuje, kolik pixelů z původního snímku se převede na černou, resp. bílou barvu. Její nastavení se liší podle kontrastu snímku (Frazer, Canham, Lertzman 1999).

5 Výsledky

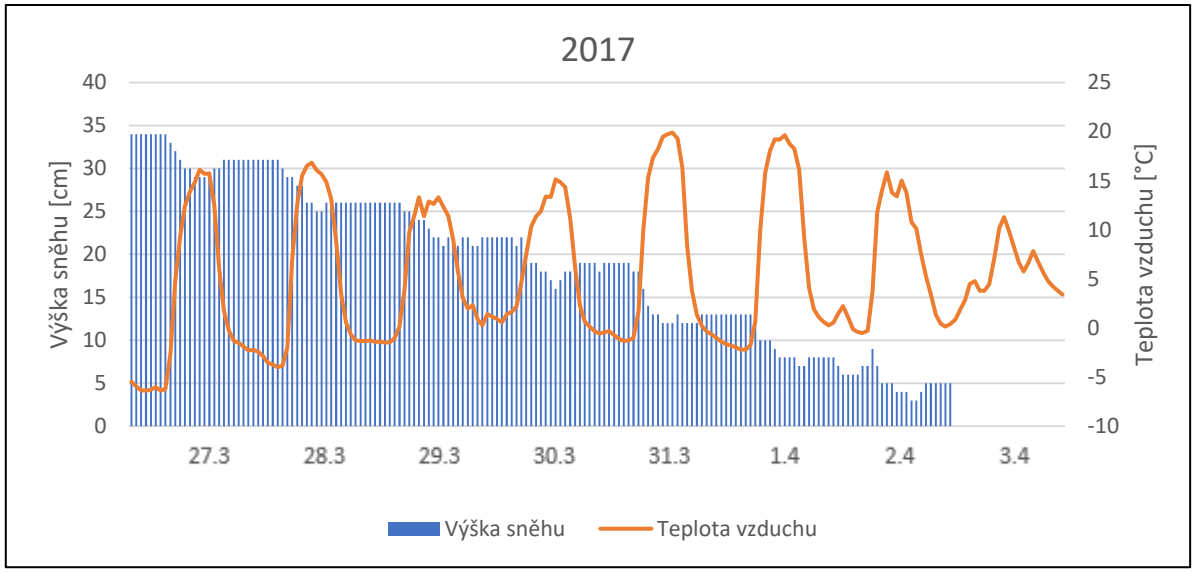
5.1 Charakteristika struktury vegetace a meteorologických prvků na lokalitách

Zastínění plochy lesní vegetací bylo kvantifikováno pomocí hemisférických snímků a vypočtením Leaf Area Indexu. Výsledný index se spočítal zprůměrováním pěti, resp. třech dílčích předem spočtených hodnot (obr. 17). Pro zdravý les se průměrná hodnota LAI pohybovala okolo 2,37, naopak pro poškozený les byl průměr LAI pouze 0,46, což se velmi přibližuje hodnotám otevřené plochy (LAI=0,21). Z vypočtených hodnot lze usuzovat velkou otevřenost plochy poškozené lesní vegetace oproti zdravém lesu.



Obrázek 17: Rozdíly v Leaf Area Indexu mezi jednotlivými lokalitami 10. 4. 2019 (vlastní zpracování)

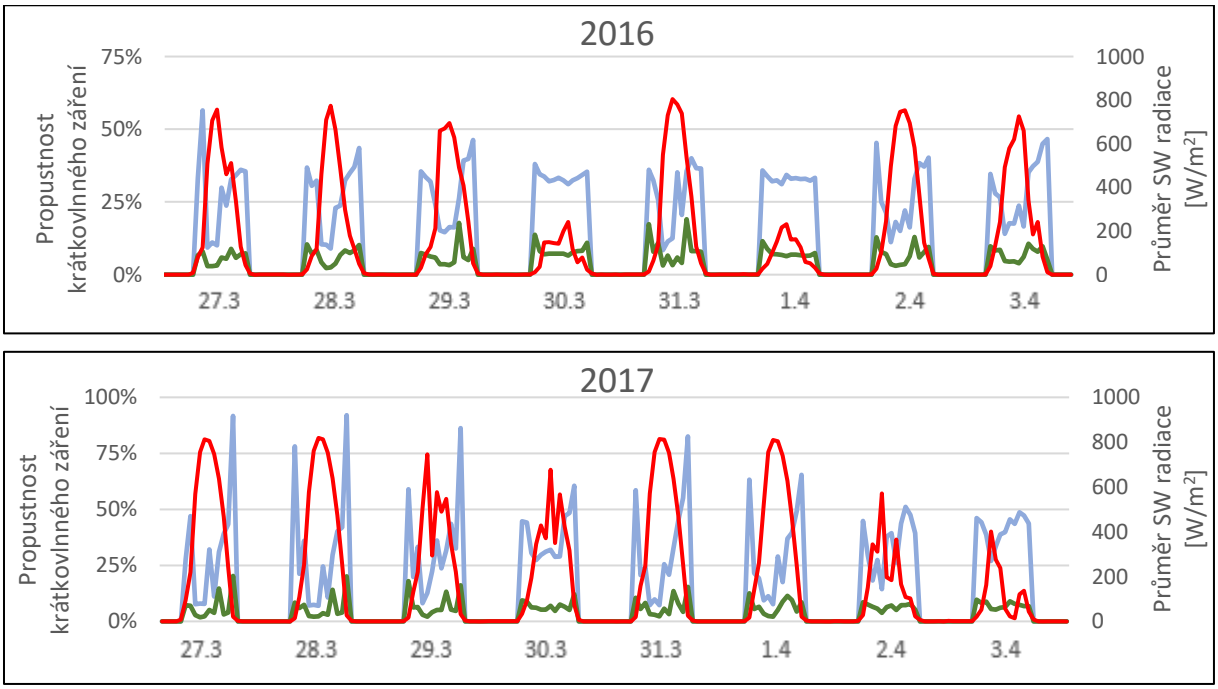
Pro hodnocené variability krátkovlnné a dlouhovlnné radiace bylo vybráno období od 27. 3. do 3. 4, které v případě všech čtyř analyzovaných let odpovídá závěrečné fázi jarního tání a také v jednotlivých letech vykazovalo podobné meteorologické podmínky (Příloha 1). Hlavní charakteristikou meteorologických prvků lokalit v tomto období je vysoké kolísání teploty vzduchu. Nejlépe interpretovatelný byl podle dat rok 2017 pro malý počet chyb zaznamenaných teplot vzduchu a pro minimální výpadky měření výšky sněhu (obr. 18). Denní chod teploty vzduchu ukazuje, že hodnoty se přes den vyšplhaly až k 15 °C, resp. 20 °C, naopak v noci klesaly dokonce pod bod mrazu. Pro vybrané období je v lokalitách charakteristické již pokročilé jarní tání, kdy se výška sněhu může během pár dnů snížit až o polovinu.

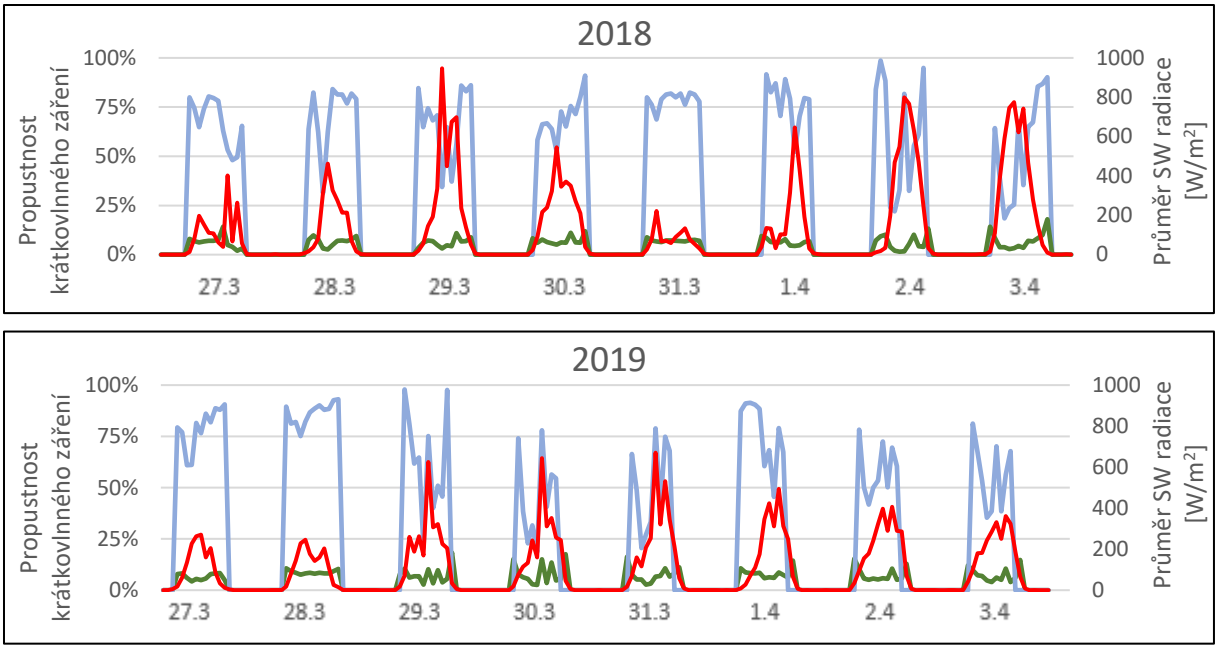


Obrázek 18: Průběh teploty vzduchu a výšky sněhu v období 27. 3.-3. 4. 2017 (KFGG, vlastní zpracování)

5.2 Variabilita krátkovlnné radiace

Krátkovlnná radiace je obecně velmi variabilní a je proměnná v čase. Hodnoty dopadajícího SW záření na povrch sněhové pokrývky se liší podle velkého množství faktorů. Nejčastěji jsou ovlivněny oblačností, následně pak vegetačním krytem. Na obrázku 19 jsou znázorněny grafy denního chodu příchozí krátkovlnné radiace (dále SW) a její procentuální propustnosti v disturbovaném a zdravém lese. Z dat vyplývá, že se podařilo zachytit období s jasným nebo polojasným počasím pro všechny roky, kdy červená křivka dosahuje vysokých hodinových průměrů příchozí SW.



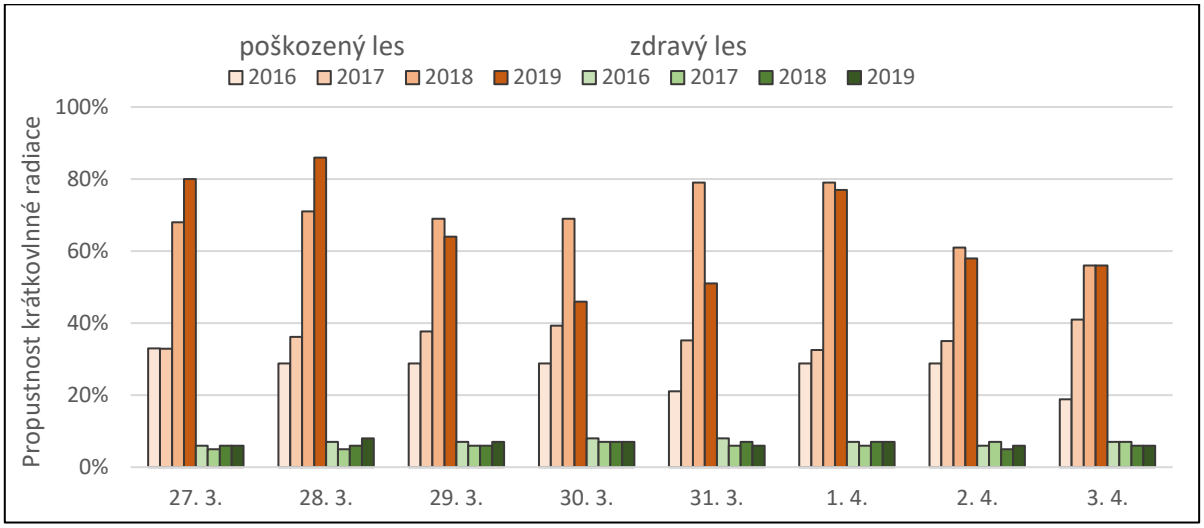


Obrázek 19: Hodinový průměr příchozí krátkovlnné radiace na otevřené ploše (červená) a podíl propuštěného krátkovlnného záření v poškozeném (modrá) a zdravém (zelená) lese v letech 2016-2019 (KFGG, vlastní zpracování)

Ve všech jarních obdobích se zelená křivka propustnosti záření ve zdravém lese pohybuje mezi 5-10 % a lze říci, že je neměnná, co se týče podílu množství propuštěného záření. Křivka navíc nemá příliš velké výkyvy v propustnosti a lze ji označit za spolehlivý ukazatel neměnnosti lesní vegetace v krátkém období. Změna nastává na ploše pod poškozenou lesní vegetací, u které se v průběhu let zvyšovala propustnost záření. Křivka propustnosti poškozené vegetace vykazuje velké výkyvy, kdy se propustnost měnila v rozpětí až 80 %. Z toho jasně vyplývá porušení homogenity lesní vegetace a její variabilní stínění zemského povrchu, resp. sněhové pokrývky. Pohyb Slunce po obloze, změny úhlů dopadů slunečního záření v průběhu dne a nerovnoměrnost zakrytí oblohy způsobuje výše zmíněné výkyvy v průběhu dne, kdy na jedno místo dopadá odlišná radiace v různý čas.

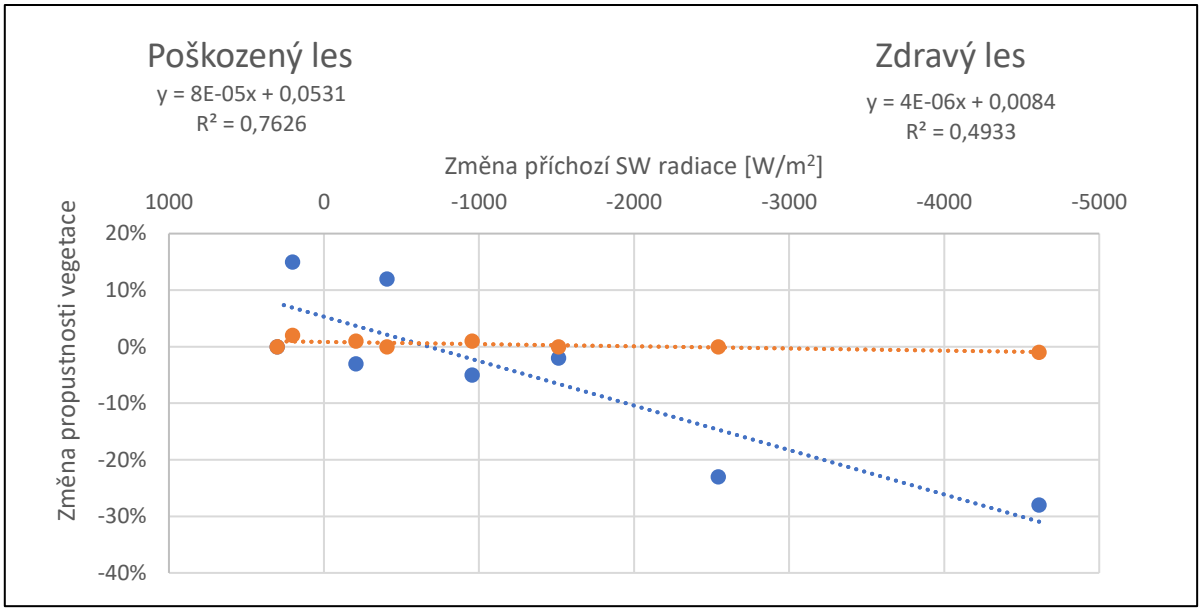
Porovnáme-li mezi sebou hodnoty propustnosti v po sobě jdoucích letech u poškozeného lesa, je patrné, že se postupně zvyšují (obr. 20). V roce 2016 se hodnoty propustnosti v poškozeném lese pohybovaly v průměru 27,1 %. V roce 2017 se hodnoty navýšily na průměr 36,2 %, což znamená, že poškozený les se musel více otevřít. Následující rok ještě více potvrzuje vliv disturbance na lesní vegetaci, když koncem října 2017 došlo v poškozeném lese k větrné disturbanci, při které velké množství odumřelých stromů popadalo, a plocha se ještě více otevřela. Proto nastává v roce 2018 výrazná změna v propustnosti, kdy došlo k velkému nárůstu a průměrné hodnoty dosahovaly 69 %. Rok 2019 se od předchozího

příliš neliší, dokonce vykazuje nižší hodnoty – průměr propustnosti je 64,8 %. Z výsledných hodnot lze usuzovat, že nedošlo k žádnému dalšímu rozpadu lesa nebo jen v minimální míře. Některé dny dokonce propustnost v roce 2019 klesla oproti předchozímu roku.



Obrázek 20: Průměrná propustnost krátkovlnného záření v jednotlivých dnech v poškozeném lese v letech 2016-2019 (KFGG, vlastní zpracování)

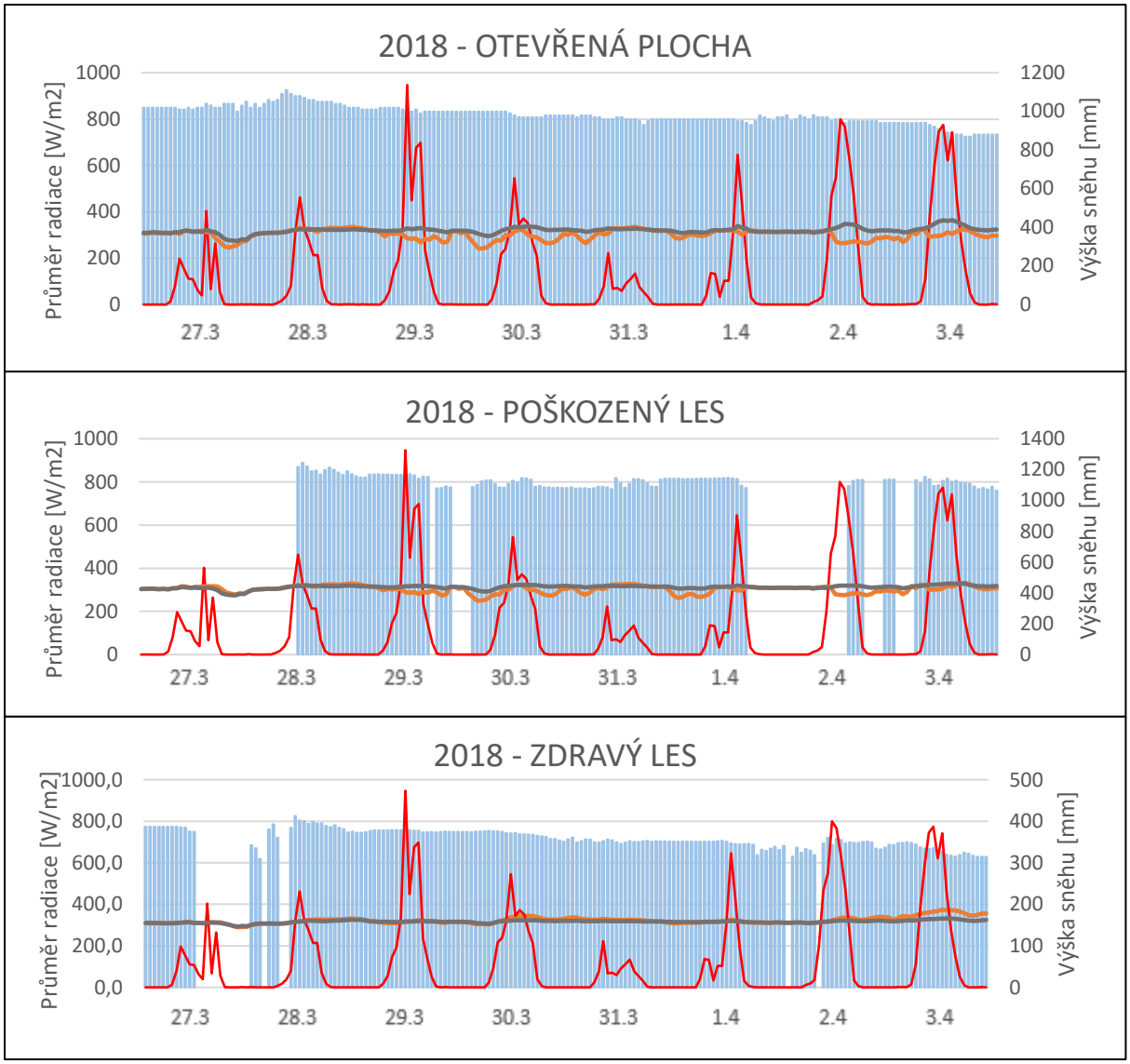
Rozdíly mezi jednotlivými dny jsou v meziročním porovnání nejvýraznější v poškozeném lese. Propustnost se v jednotlivé dny pro roky 2016-2018 zvyšuje. Změna nastává až v roce 2019, kdy některé dny je propustnost poškozeného lesa menší než v roce 2018. Pomocí Pearsonova korelačního koeficientu byla zjištěna vysoká korelace (r = 0,87) mezi změnou příchozího záření a změnou propustnosti mezi roky 2018 a 2019. Propustnost se v průměru snížila sice jen o 4,2 %, ale rozpětí hodnot se v jednotlivých dnech pohybovalo v širokém rozpětí od 0 do 28 %. Příchozí krátkovlnné záření bylo v období 27. 3.-3. 4. 2018 v průměru o 1216,5 W/m^2 vyšší než o rok později. U zdravého lesa snížení propustnosti nižším příchozím krátkovlnným záření platí také s vysokou hodnotou korelace r = 0,7. Z porovnání regresních přímek zdravého a poškozeného lesa vyplývá, že nižší příchozí krátkovlnné záření se více projeví ve změně propustnosti na otevřenější, resp. méně stíněné ploše (obr. 21). Snížení propustnosti lze přisuzovat meteorologickým vlivům, zejména oblačnosti, protože došlo ke snížení příchozí krátkovlnné radiace.



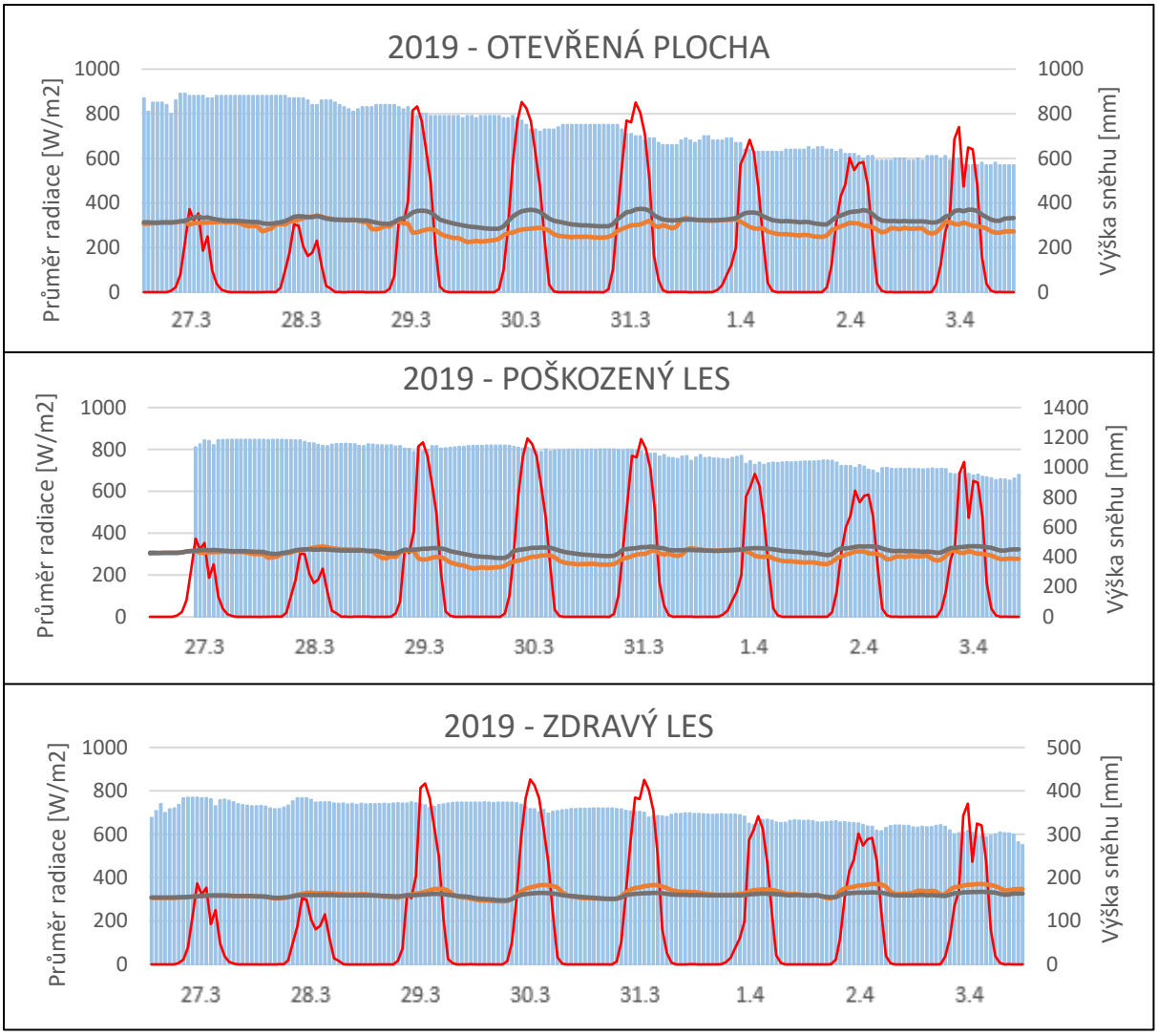
Obrázek 21: Závislost změny příchozího záření na změně propustnosti v poškozeném (modrá) a zdravém (oranžová) lese za období 27. 3.-3. 4. v letech 2018 a 2019 (KFGG, vlastní zpracování)

5.3 Variabilita dlouhovlnné radiace

S propustností krátkovlnné radiace úzce souvisí i bilance dlouhovlnného záření (dále LW), která se mění se slunečním zářením, jak je patrné v následujících grafech (obr. 22). Hodnota příchozí LW radiace je nižší než odchozí za slunečného počasí v případě otevřené plochy a poškozeného lesa. Naopak příchozí LW radiace u zdravého lesa v průběhu dne výrazně převyšuje vyzářené hodnoty. Lze to přičítat faktu, že stromy absorbují příchozí SW záření, zvýší svoji teplotu a tím vyzáří více LW radiace. Z grafů také ale vyplývá, že tento jev se objevuje pouze tehdy, pokud po sobě následuje větší množství dní s vysokým úhrnem SW radiace. Jak bylo zmíněno a potvrzeno výše (kap. 5.2), období v roce 2018 bylo výrazně slabší na příchozí SW radiaci a počet slunečných dní než období v roce 2019 (obr. 23). Celkovou bilanci krátkovlnného i dlouhovlnného záření v grafech doplňuje výška sněhu, u které lze spatřit, že na otevřené ploše docházelo k rychlejšímu odtávání sněhové pokrývky.



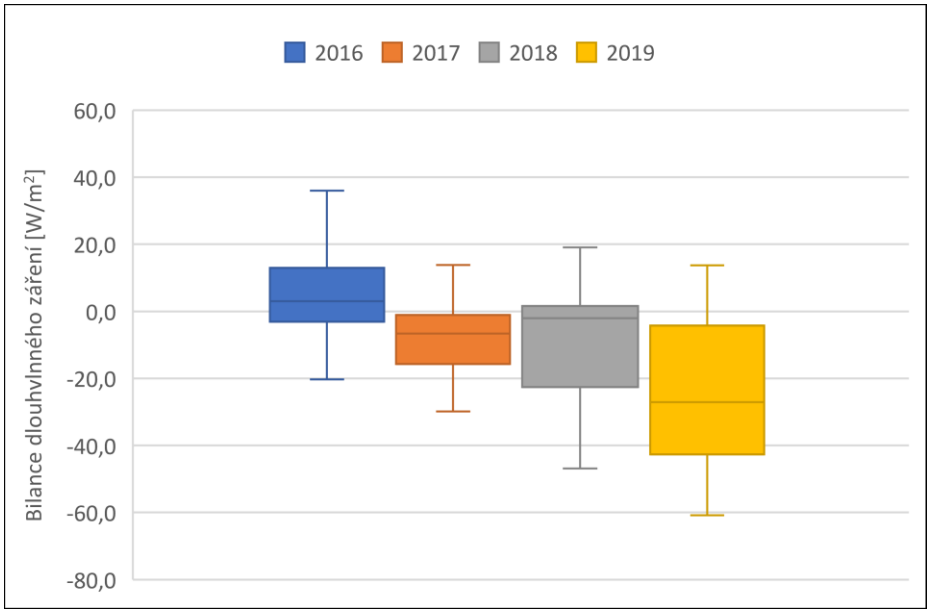
Obrázek 22: Vývoj příchozí krátkovlnné (červená) a dlouhovlnné radiace (oranžová), odchozí dlouhovlnné radiace (šedá) a výšky sněhové pokrývky (modré sloupce) ve třech lokalitách v období 27. 3.-3. 4. 2018 (KFGG, vlastní zpracování)



Obrázek 23: Vývoj příchozí krátkovlnné (červená) a dlouhovlnné radiace (oranžová), odchozí dlouhovlnné radiace (šedá) a výšky sněhové pokrývky (modré sloupce) ve třech lokalitách v období 27. 3.-3. 4. 2019 (KFGG, vlastní zpracování)

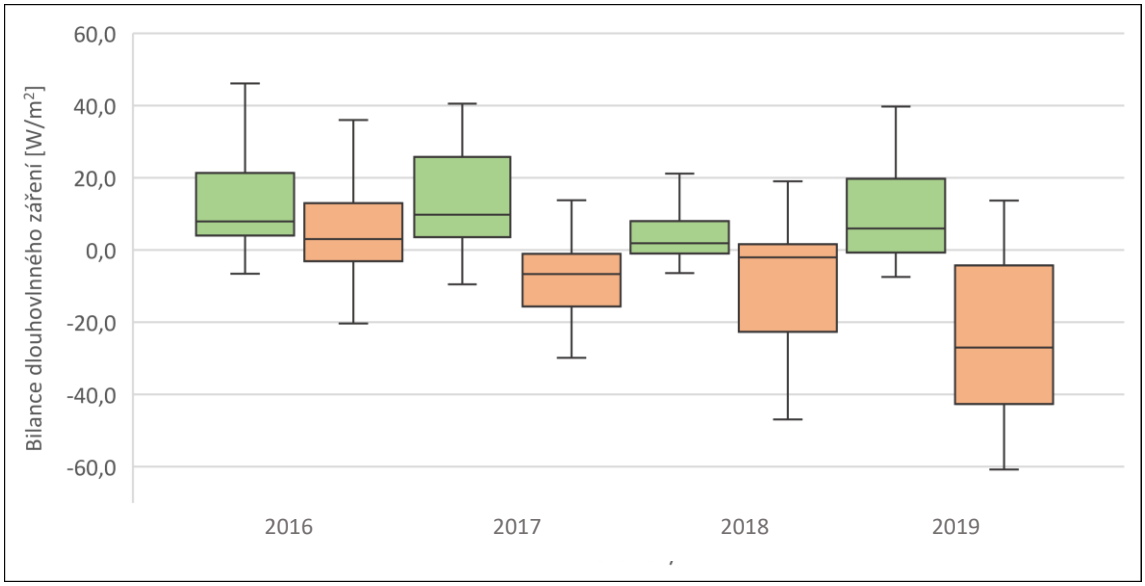
Změnu rozdílu v příchozí a odchozí LW radiaci v závislosti na struktuře lesa nejlépe vystihuje následující krabicový diagram (obr. 24). V roce 2016 byl les disturbovaný pouze kůrovcovou kalamitou a stále dostatečně stínil od SW radiace. Medián bilance dlouhovlnného záření je okolo hodnoty 3 W/m^2, což značí, že poškozená lesní vegetace stále částečně fungovala jako emitor LW radiace za slunečných dní. V následujících letech je velmi patrná změna bilance v příchozím a odchozím LW záření, která se postupně snižuje až k hodnotě mediánu -27,3 W/m^2. Zde je opět velmi dobře patrné, jak nižší počet slunečných dní ovlivní i dlouhovlnnou radiaci, emitovanou v případě poškozeného lesa z reliktů stromů. V roce 2018 je medián rozdílu LW radiace na hodnotě -2,03 W/m^2, což je o 4,59 vyšší než hodnota v roce 2017. Jak již bylo zmíněno výše, v říjnu 2017 došlo k větrné kalamitě a poškozený les se ještě

více otevřel, ale v bilanci dlouhovlnného záření se to neprojevuje. Lze to přisoudit faktu o výrazně nižší příchozí krátkovlnné radiaci v roce 2018 a tudíž nižší emitaci dlouhovlnného záření kmeny stromů.



Obrázek 24: Rozdíl mezi příchozím a vyzářeným dlouhovlnným zářením v poškozeném lese za období od 27. 3. do 3. 4. v letech 2016-2019 (KFGG, vlastní zpracování)

Stejnými výsledky disponuje i obrázek 25, ve kterém diagramy znázorňují rozdíl mezi příchozí a odchozí LW radiaci v porovnání mezi zdravým a poškozeným lesem. V případě zdravého lesa se medián hodnot bilance LW záření liší minimálně. Výjimku tvoří rok 2018, ve kterém je medián hodnot bilance LW záření pro zdravý les pouze 1,88 W/m^2. Tato hodnota podtrhuje důležitost příchozí krátkovlnné radiace na zvýšení emitace LW záření lesní vegetací. Lze si povšimnout i nižšího rozptylu hodnot v roce 2018 u zdravého lesa. I přes lehce zkreslující výsledky rokem s nízkým příchozím SW zářením z obrázku vyplývá zvyšování rozdílů v bilanci dlouhovlnné radiace v čase mezi zdravým a poškozeným lesem. Rozdíl v bilanci v poškozením lese mezi roky 2016 a 2017 je 4,83 W/m^2, ale mezi lety 2016 a 2019 se rozdíl zvýšil na 33,04 W/m^2. Takto velké zvýšení rozdílu v bilanci dlouhovlnného záření znamená značné snížení emitace LW radiace lesní vegetací neboli snížení celkového zastínění lesní plochy vegetací a větším otevřením plochy.



Obrázek 25: Rozdíly v příchozí a odchozí dlouhovlnné radiaci v poškozeném lese (okrová) a ve zdravém lese (zelená) za období od 27. 3. do 3. 4. v letech 2016-2019 (KFGG, vlastní zpracování)

Pro dokázání závislosti emitace dlouhovlnného záření lesní vegetace na příchozím krátkovlnném záření byly spočteny korelační koeficienty pro zdravou vegetaci v jednotlivých letech (tab. 6). Koeficienty ukazují nejen silnou závislost dlouhovlnné radiace na příchozí krátkovlnné radiaci, ale také dokazují, že se závislost mění s množstvím příchozí SW radiace. To znamená, že čím více krátkovlnné záření vegetaci ozáří, tím více LW záření vegetace emituje a také se zvyšuje závislost bilance LW záření na příchozím SW záření.

Tabulka 6: Příchozí SW radiace, medián rozdílů LW radiace a průměr propustnosti SW radiace vegetací v poškozeném lese a ve zdravém lese a Pearsonův korelační koeficient závislosti bilance LW radiace na celkovém úhrnu SW radiace ve zdravém lese v období od 27. 3. do 3. 4. v letech 2016-2019 (KFGG, vlastní zpracování)

27. 3.-3. 4.	Průměr SW na otevřené ploše [W/m^2]	Medián bilance LW poškozený les [W/m^2]	Průměr propustnosti SW poškozený les	Medián bilance LW zdravý les [W/m^2]	Průměr propustnosti SW zdravý les	Pearsonův korelační koeficient
2016	153,4	3,07	27,1 %	7,94	7,0 %	0,61
2017	176,8	-6,62	36,2 %	9,77	6,1 %	0,77
2018	119,6	-2,03	69,0 %	1,88	6,3 %	0,31
2019	170,3	-27,04	64,8 %	6,00	6,6 %	0,66

6 Diskuze

6.1 Nejistoty při sběru a zpracování dat

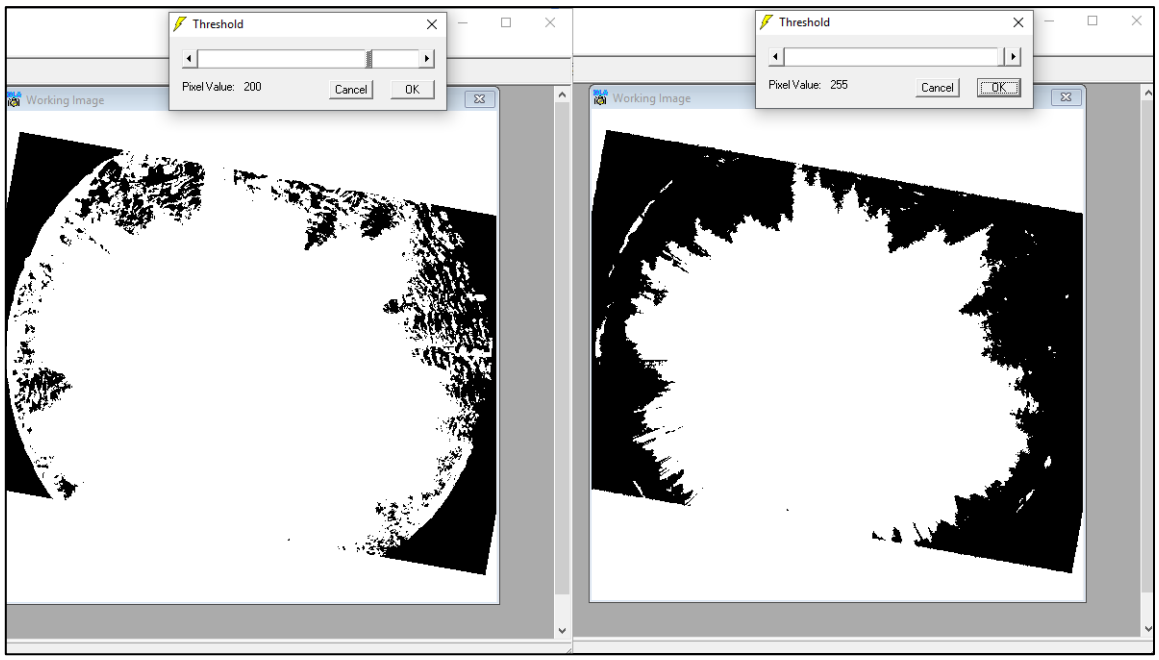
Největším problémem v datových sadách jsou výpadky měřících stanic. Velké množství dat je kvůli tomu neúplných a bylo velmi důležité vybrat období, kdy data automatická stanice měřila všechny parametry. Výpadky měření postihují automatické stanice na Ptačím potoce, konkrétně radiometry. Jak je již zmíněno v kapitole 4.1, stanice disponuje čtyřmi měřícími čidly – dvěma pyranometry měřící dlouhovlnnou a krátkovlnnou radiaci (jeden směřuje k obloze, druhý ke zemskému povrchu), čidlo měřící teplotu vzduchu a ultrazvukové čidlo měřící výšku sněhové pokrývky. Nejproblémovější je horní pyranometr, kdy v případě zasněžení čidla měří neplatné hodnoty nebo neměří vůbec. Čidlo není vyhřívané, proto sníh musí nejdříve odtát a než se tak stane, ztrácejí se data o příchozí globální radiaci. Data obsahující pouze správnou hodnotu odražené radiace přijatou spodním pyranometrem jsou nevypovídající a neúplná, proto je bylo třeba vyřadit na základě vypočteného albeda (kapitola 4.3.1, tab. 5, příloha 1).

Dále stanice trpí velkým množstvím výpadků při měření výšky sněhu. Navíc výška sněhu nemusí být přesná hned z několika důvodů. Hlavní roli hraje způsob měření, kdy se ultrazvuk odráží od povrchu sněhové pokrývky a podle odezvy se spočítá, jakou má sníh výšku. Při tomto způsobu měření může povrch sněhové pokrývky cokoliv narušit, například lesní zvěř vytvořením stop. Dalším důvodem je fakt, že při velmi nízké výšce sněhu se může odhalit travnatá vegetace, od které se ultrazvuk odrazí dříve, než se dostanu k povrchu sněhu (například stanice vrací pozitivní hodnoty o výšce sněhu i v srpnu právě kvůli vzrostlé vegetaci pod čidlem). Proto výška sněhu u automatické stanice na otevřené ploše mohla být nahrazena výškou sněhu ze stanice SPA, která je pouze několik desítek metrů vzdálená a stojí také na otevřeném prostranství. Další velkou komplikací automatických stanic je zdroj energie, který zajišťuje akumulátor. Ten má na rozdíl od stanic se solárním panelem pouze určitou kapacitu a po čase se zcela vybije. V tu chvíli stanice přestane měřit a je potřeba akumulátor vyměnit a do té doby stanice nezaznamenává žádná data.

V neposlední řadě velkým faktorem konečných výsledků je i subjektivita zpracovatele dat, kdy bylo třeba vytřídit data a vybrat ta, která se potenciálně nejvíce hodí ke zpracování. Například noční hodnoty příchozího krátkovlnného záření vykazovalo kladné hodnoty i přes to, že by měly být nulové. V těchto případech byly hodnoty zanedbány (nahrazeny hodnotou 0) nebo úplně vyřazeny.

Při pořizování hemisférických snímku je důležitý výběr míst pro jejich pořízení. Výběr míst velmi závisí na úsudku autora snímků a je také velmi subjektivní. Schopnost manipulace

s technikou je také důležitým prvkem pořízení kvalitních snímků ke zpracování. S tím souvisí správné nastavení fotoaparátu, které ovlivňuje výsledky při pozdějším zpracování snímků, protože pokud je snímek přesvícen, může ztratit velké množství informací o zakrytí oblohy vegetací, naopak nedostatečný průnik světla objektivem zvýší stupeň zakrytí oblohy. Lidský faktor vstupuje i při určování severu, který je pro konečné hodnocení velmi důležitým prvkem. Při samotném zpracovávání hemisférických snímků ovlivňuje subjektivní úsudek zpracovatele také nastavení prahové hodnoty (kapitola 4.3.2), kdy je třeba odhadnout, zda po prahování snímek zahrnuje všechny elementy zastiňující oblohu (obr. 26). Hodnoty LAI, využité při definování otevřenosti plochy v kapitole 5.1, jsou pro tuto práci dostupné pouze pro rok 2019, a proto je nelze využít v souvislosti se změnou struktury poškozené lesní vegetace v letech 2016-2019.



Obrázek 26: Výřez okna programu Gap Light Analyzer 2.0 zobrazuje nastevení prahu funkcí Threshold, kde je patrné, že různá hodnota může velmi ovlivnit výsledek celé analýzy snímku. Vlevo je nižší hodnota prahu, vpravo je hodnota vyšší (vlastní screenshot)

6.2 Zhodnocení variability krátkovlnné radiace

Ke zhodnocení variability krátkovlnného záření byla užita metoda výpočtu propustnosti záření lesní vegetací podle jednoduchého vzorce, ve kterém se vypočte podíl prošlého krátkovlnného záření na celkové globální krátkovlnné radiace. Výpočtem útlumu slunečního záření se zabývala velká řada autorů. Sicart et al. (2004) určili útlumový koeficient zdravé lesní vegetace nacházející se v alpinském typu pohoří v Yukon v Kanadě blížící se hodnotám až 90 %. To znamená, že lesní vegetace pohltila většinu příchozího krátkovlnného záření

a k zemskému povrchu se dostalo pouze 10 % z celkové krátkovlnné radiace. Výsledky v této práci hypotézu o vysokém útlumu záření vegetací potvrzují a celková propustnost zdravé lesní vegetace je dokonce nižší než ve studii z Kanady. Propustnost krátkovlnného záření vykazuje průměr 6,5 %, resp. koeficient útlumu záření vegetací dosahuje 93,5 %. Také studie od Aubin et al. (2000) z další kanadské provincie Quebec potvrzuje útlum záření zdravou lesní vegetací pohybující se okolo 87 % pro útlum (13 % pro propustnost). Zdá se, že smrkový les na Šumavě vykazuje vyšší stínění slunečního záření než případové studie ze dvou různých míst v Kanadě. To potvrzuje studie přímo ze Šumavy od autorů Jenicek, Hotovy, Matejka (2017), kde příchozí záření pod lesní vegetací činilo pouze 6,3 % oproti otevřené ploše. Tento fakt lze přisuzovat tomu, že v případě kanadských studií se jednalo o starší smrkový porost, naopak v šumavské lokalitě se jednalo o mladší lesní vegetaci s nižším vzrůstem. Platí to pouze za předpokladu, že mladý smrkový les je obecně hustší než starý les. Ve studii ze státu Idaho v USA od Hardy et al. (2004) se hodnota propustnosti krátkovlnného záření u dvou jehličnatých lesů pohybovala okolo 23 %. Tím se potvrzuje, že propustnost lesní vegetace je nízká, ovšem její konečná hodnota závisí na charakteru lokality a stáří, resp. hustotě lesní vegetace.

Přenosová schopnost poškozené lesní vegetace se výrazně liší od zdravé lesní vegetace. Les postižený disturbancí ztrácí charakter souvislého vegetačního krytu a dochází k odlišnému stínění solární radiace v čase. Odlišnosti v celkové propustnosti krátkovlnného záření potvrzuje mnoho zahraničních studií, mezi které patří i výše zmíněná studie z Kanady od Aubin et al. (2000), která se také zabývala porovnáním propustnosti krátkovlnného záření u lokalit s různou strukturou lesa. Autoři uvádějí zvýšení propustnosti u tzv. otevřeného lesa (autoři tím rozumějí velmi řídkou lesní vegetaci, kde spíše převládá keřovitý porost) až k 90 %, což se dá již považovat za otevřenou plochu. Výsledné hodnoty propustnosti v této práci se měnily v čase v závislosti na změně struktury poškozeného lesa, který se čím dál tím více otevíral. I přesto nejvyšších hodnot dosahovala propustnost krátkovlnného záření za jasných slunečných dnů 27. 3., 28. 3. a 1. 4. 2019 v maximu 86 %, což je nižší hodnota než průměr u výše zmíněné studie. Porovnáním výsledků s výzkumem od Jenicek, Hotovy, Matejka (2017) lze potvrdit postupné otevírání poškozené lesní vegetace a zvyšování její propustnosti. Propuštěné záření v poškozeném lese začátkem dubna v zimní sezóně 2015/2016 dosahovalo hodnoty 23,9 %, čímž se potvrzuje výsledná průměrná hodnota propustnosti krátkovlnného záření v této práci z období 27. 3.-3. 4. 2016, která byla 27,1 %. Poté došlo v následujících letech k výraznému navýšení propustnosti vlivem dalších disturbancí.

6.3 Zhodnocení variability dlouhovlnné radiace

Dlouhovlnná radiace se mění v závislosti na příchozí krátkovlnné radiaci a strukturou lesní vegetace, která povrch stíní. Na celkové bilanci dlouhovlnného záření pod lesní vegetací má vysoký vliv množství příchozí krátkovlnné radiace, a především její zachycení vegetací. Krátkovlnná radiace zvyšuje teplotu stromů a vyšší teplota znamená i vyšší emitaci dlouhovlnného záření, jak potvrzuje studie z provincie Alberta v Kanadě od Essery et al. (2008) a studie ze Švýcarských Alp od Webster et al. (2016). Závislost příchozí dlouhovlnné na krátkovlnné radiaci v této práci reprezentují výsledné hodnota korelace bilance LW záření na průměru příchozí LW radiace, které dosahovali v letech 2016-2019 vysokého koeficientu v průměru r = 0,68. Výjimku tvoří pouze rok 2018 (r = 0,31), který poukazuje na důležitost množství příchozího krátkovlnného záření – v období 27. 3.- 3. 4. 2018 byl průměrný příjem globálního krátkovlnného záření o 30 % menší než v letech 2016, 2017 a 2019.

S tím souvisí změna propustnosti krátkovlnného záření s jeho příchozím množství a celkovým vlivem na bilanci dlouhovlnného záření, kdy u poškozeného lesa byl koeficient korelace mezi příchozí SW radiací a propustností r = 0,87 a u zdravého lesa r = 0,7. Změna propustnosti krátkovlnného záření silně ovlivňuje bilanci dlouhovlnné radiace pod vegetačním krytem. Studie od Sicart et al. (2004) potvrzuje navýšení příchozí dlouhovlnné radiace za jasných dní až o 50 %. Dále uvádí, že za zatažené oblohy neboli za dne s nižší příchozí krátkovlnné radiaci se bilance dlouhovlnného záření snížila průměrné o 6 W/m^2. V této práci se v meziročním porovnání období snížil medián bilance dlouhovlnného záření ve zdravém lese v roce 2018 o 6,1 W/m^2 oproti průměru mediánu z let 2016, 2017 a 2019, což je o 76 % menší hodnota. Z výsledků také vyplývá změna propustnosti podle stupně zakrytí plochy vegetací, kdy více otevřená plocha má větší propustnost krátkovlnné radiace a tím se mění i celková bilance dlouhovlnné radiace na této lokalitě.

7 Závěr

V této práci byl formou rešerše české a zahraniční literatury popsán dosavadní výzkum vlivu zdravého a poškozeného lesa na příchozí krátkovlnné radiaci a celkovou bilanci dlouhovlnného záření v porovnání s otevřenou plochou. Na základě odborné literatury je příchozí krátkovlnné záření ovlivňováno nejen oblačností, ale i strukturou vegetačního krytu, podle kterého se mění propustnost právě krátkovlnného záření. Celková bilance dlouhovlnné radiace je závislá na propustnosti krátkovlnné radiace, resp. kolik SW radiace se zachytí vegetaci přímo ovlivňuje bilanci LW záření emitovaného lesní vegetací. Variabilita krátkovlnné i dlouhovlnné radiace vede k rozdílné dynamice tání sněhu na lokalitách s rozdílnou strukturou lesní vegetace. Podobné výsledky se podařilo zjistit na třech strukturně odlišných lokalitách (zdravý les, poškozený les, otevřená plocha) v rámci povodí Ptačího potoka na Šumavě ve vybraném období od 27. 3. do 3. 4. v letech 2016-2019:

- Leaf Area Index se pro jednotlivé plochy velmi liší. Nejvyšších hodnot dosahoval zdravý les s průměrem 2,37; nejnižších poškozený les 0,47 a otevřená plocha 0,21.
- Propustnost krátkovlnné radiace se liší mezi zdravým a poškozeným lesem, kdy hodnoty u zdravého lesa v závislosti na jeho struktuře byly téměř neměnné s průměrnou hodnotou 6,5 %, u poškozeného lesa se propustnost měnila v čase. V roce 2016 byla propustnost 27,1 %, v roce 2019 dosahovala průměrné hodnoty 64,8 %.
- Propustnost krátkovlnného záření se měnila také podle celkové příchozí SW radiace zejména u poškozeného lesa, kdy korelační koeficient dosahoval velmi vysoké hodnoty 0,87. U zdravého lesa byla závislost menší, ale dostatečně vysoká r = 0,7.
- Bilance dlouhovlnného záření se snižuje u poškozeného lesa kvůli jeho rozpadu. Rozdíl v mediánu hodnot bilance LW radiace mezi roky 2016 a 2019 je 33,04 W/m^2.
- Velikost příchozí krátkovlnné radiace ovlivňuje celkovou bilanci dlouhovlnného záření ve zdravém lese s vysokým koeficientem korelace r = 0,68. Zároveň se tato závislost mění i podle celkové příchozí globální SW radiace, kdy období v roce 2018 bylo nejchudší na celkový úhrn krátkovlnného záření a hodnota korelace závislosti LW radiace zde byla pouhých r = 0,31.

8 Použitá literatura a zdroje

8.1 Seznam použité literatury

AMARAL, T., WAKE, C. P., DIBB, J. E., BURAKOWSKI, E. A., STAMPONE, M. (2017): A simple model of snow albedo decay using observations from the Community Collaborative rain , hail , and snow-albedo (CoCoRaHS-Albedo) Network. Journal of Glaciology, 241, 63, 877–887.

ARCDATA PRAHA. Produkty a služby: ArcČR 500 [online].[cit. 28. 3. 2019]. Dostupné z: http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/geograficka-data/arccr- 500/.

AUBIN, I., BEAUDET, M., MESSIER, C. (2000): Light extinction coefficients specific to the understory vegetation of the light extinction coefficients specific to the understory vegetation of the southern boreal forest , Quebec. Canadian Journal for Forest Research, 30, 168–177.

BORMANN, K. J., WESTRA, S., EVANS, J. P., MCCABE, M. F. (2013): Spatial and temporal variability in seasonal snow density. Journal of Hydrology, 484, 63–73.

CHANG, A. T. C., FOSTER, J. L., HALL, D. K., RANGO, A., HARTLINE, B. K. (1981): Snow water equivalent determination by microwave radiometry. Cold Regions Science and Technology, 3, 5, 259–267.

CHANG, T. C., GLOERSEN, P., SCHMUGGE, T., WILHEIT, T. T., ZWALLY, H. J. (1976): Microwave emission from snow and glacier ice. Journal of Glaciology, 74, 16, 23–39.

CHUMAN, T. (2015): Půdní pokryv v Česku. Geografické rozhledy, 25, 8–9.

CLARK, M. P., HENDRIKX, J., SLATER, A. G., KAVETSKI, D., ANDERSON, B., CULLEN, N. J., KERR, T., HREINSSON, E. Ö., WOODS, R. A. (2011): Representing spatial variability of snow water equivalent in hydrologic and land-surface models : A review. Water Resources Research, 47, 1-23.

COHEN, J., RIND, D. (1991): The effect of snow cover on the climate. Journal of Climate, 7, 4, 689–706.

CUŘÍN, V. (2016): Variabilita akumulace a tání sněhu v lokálním měřítku s využitím dat vysokého prostorového rozlišení. Bakalářská práce, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha, 64 s.

ČGS – Česká geologická služba [online]. [cit. 20. 7. 2019]. Dostupné z: http://www.geology.cz/extranet/sluzby/aplikace.
ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav, Ministerstvo životního prostředí.

ČÚZK (2010): Prohlížecí služba WMS – Ortofoto [online]. [cit. 20. 7. 2019] Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMService.aspx.

DEMEK A KOL., J. (1987): Zeměpisný lexikon ČSR: Hory a nížiny. Academia, Praha, 584 s.

DEWALLE, D. R., RANGO, A. (2008): Principles of Snow Hydrology. Cambridge University Press, 410 s.

DIBAVOD - Digitální báze vodohospodářských dat [online]. [cit. 20. 7. 2019] © Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., odbor ochrany vod a informatiky, odd. GIS, Dostupné z http://www.dibavod.cz .

DUTKOVÁ, A. (2011): Ústup horských ledovců v alpách po malé době ledové a jeho vztah ke změnám klimatu. Bakalářská práce, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha, 56 s.

ESSERY, R., POMEROY, J., ELLIS, C., LINK, T. (2008): Modelling longwave radiation to snow beneath forest canopies using hemispherical photography or linear regression. Hydrological Processes, 22, 2788–2800.

FRAZER, G. W., CANHAM, C. D., LERTZMAN, K. P. (1999): Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, a the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York, 36 s.

GELFAN, A. N., POMEROY, J. W., KUCHMENT, L. S. (2004): Modeling forest cover influences on snow accumulation , sublimation , and melt. Journal of Hydrometeorology, 5, 5, 785–803.

HARDY, J. P., MELLOH, R., KOENIG, G., MARKS, D., WINSTRAL, A. (2004): Solar radiation transmission through conifer canopies. Agricultural and Forest Meteorology, 126, 257–270.

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

HRÍBIK, M., ŠKVARENINA, J. (2007): Vplyv bukového a smrekového lesa v rastovej fáze žrďoviny na vytváranie snehových zásob. In: Hríbik, M. et al. (ed.): 12. stretnutie snehárov: Zborník zo seminára. 88–98.

JENICEK, M., HOTOVY, O., MATEJKA, O. (2017): Snow accumulation and ablation in defferent canopy structures at a plot scale: Using degree-day approach and measured shortwave. AUC Geographica, 1, 61, 51–62.

JENICEK, M., PEVNA, H., MATEJKA, O. (2017): Canopy structure and topography effects on snow distribution at a catchment scale : Application of multivariate approaches. Journal of Hydrology, 65, 1–12.

LISTON, G. E. (1999): Interrelationships among snow distribution, snowmelt, and snow cover depletion : Implications for atmospheric, hydrologic, and ecologic modeling. Journal of Apliied Meteorology and Climatology, 38, 1474–1487.

LUNDQUIST, J. D., DETTINGER, M. D. (2005): How snowpack heterogeneity affects diurnal streamflow timing. Water Resources Research, 5, 41, 1–14.

MALMROS, J. K., MERNILD, S. H., WILSON, R., TAGESSON, T. (2018): Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000 – 2016). Remote Sensing of Environment, 209, 240–252.

MARKS, D., DOZIER, J. (1992): Climate and energy exchange at the snow Surface in the Alpine Region of the Sierra Nevada 2. Snow Cover Energy Balance. Water Resources Research, 11, 28, 3043–3054.

MÍSAŘ, Z. (1984): Geologie ČSSR I: Český masív. SPN, Praha, 380 s.

OAIDA, C. M., XUE, Y., FLANNER, M. G., SKILES, S. M., SALES, F. De, PAINTER, T. H. (2015): Improving snow albedo processes in WRF/SSiB regionalclimate model to assess impact of dust and blackcarbon in snow on surface energy balance andhydrology over western U.S. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120, 3228–3248.

POMEROY, J. W., DION, K. (1996): WInter radiation extinction and reflection in a boreal pine canopy: Measurements and modelling. Hydrological Processes, 10, 1591–1608.

POMEROY, J. W., GRANGER, R. J., PIETRONIRO, A., ELLIOT, J., TOTH, B., HEDSTROM, N. R. (1997): Hydrological Pathways in the Prince Albert Model Forest. NHRI Contribution Series CS-97004, Saskatoon, Saskatchewan, 154 s.

POMEROY, J. W., GRAY, D. M. (1995): Snowcover accumulation, relocation and Management. University of Saskatchewan, 144 s.

POMEROY, J. W., MARKS, D., LINK, T., ELLIS, C., HARDY, J., ROWLANDS, A., GRANGER, R. (2009): The impact of coniferous forest temperature on incoming longwave radiation to melting snow. Hydrological Processes, 23, 2513–2525.

QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Academia, Praha. 73 s.

SCHNEIDER, S. H. (1972): Cloudiness as a global feedback mechanism: The effects on the radiation balance and surface temperature of variations in cloudiness. Journal of the Atmospheric Sciences, 29, 1413–1422.

SEIBERT, J., JENÍČEK, M., HUSS, M., EWEN, T. (2015): Snow and ice in the hydrosphere. In: Shroder, J., F. et al.: Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. Academic Press, 99–130.

SICART, J. E., POMEROY, J. W., ESSERY, R. L. H., HARDY, J., LINK, T. E., MARKS, D. (2004): A sensitivity study of daytime net radiation during snowmelt to forest canopy and atmospheric conditions. Journal of Hydrometeorology, 5, 774–784.

ŠEFRNA, L. (2004): Pedologická charakteristika povodí Otavy ve vztahu k povodním. In Sborník příspěvků semináře grantu GAČR 205/Z052/03: Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní. GAČR, s. 196-212.

TAKALA, M., LUOJUS, K., PULLIAINEN, J., DERKSEN, C., LEMMETYINEN, J., KÄRNÄ, J., KOSKINEN, J., BOJKOV, B. (2011): Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. Remote Sensing of Environment, 115, 12, 3517-3529.

THUT, A. S. (2006): Snow density and its underlying variables. Atmospheric and Oceanic Sciences, 1–7.

USACE (1998): Engineering and design: Runoff from snowmelt. US Army Corps of Engineers Manual č. 1110- 2-1406. Washington. DC. USA. 100.

VARHOLA, A., COOPS, N. C., WEILER, M., MOORE, R. D. (2010): Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: An integrative review of empirical results. Journal of Hydrology, 3–4, 392, 219–233.

WEBSTER, C., JONAS, T. (2018): Influence of canopy shading and snow coverage on effective albedo in a snow-dominated evergreen needleleaf forest. Remote Sensing of Environment, 214, 48–58.

WEBSTER, C., RUTTER, N., ZAHNER, F., JONAS, T. (2016): Modeling subcanopy incoming longwave radiation to seasonal snow using air and tree trunk temperatures. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121, 1220–1235.

WENDLER, G., KELLEY, J. (1988): On the albedo of snow in antarctica: A contribution to interaction atmosphere-glacier-ocean. Journal of Glaciology, 116, 34, 19–25.

WINKLER, R., SPITTLEHOUSE, D., BOON, S., ZIMONICK, B. (2015): Forest disturbance effects on snow and water yield in interior British Columbia. Hydrology Research, 46, 4, 521-532.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Vztah mezi teplotou vzduchu měřenou ve výšce 1,22 m a hustotou nově napadaného sněhu v nadmořské výšce 2104 m v pohoří Sierra Nevada v Kalifornii

Obrázek 2: Útlum slunečního záření vegetací v závislosti na hustotě lesní vegetace během jarního tání

Obrázek 3: Teplota vzduchu měřená nad lesní vegetací a teplota kmene stromů snímaná termoelektrickými články v Seenhornwaldu

Obrázek 4: Výška sněhové pokrývky a její změn v průběhu zimy 2004/2005 v CHKO Poľana na Slovensku

Obrázek 5: Příklad poničené lesní vegetace po kůrovcové kalamitě v Belianských Tatrách na Slovensku

Obrázek 6: Zájmové území Ptačího potoka

Obrázek 7: Geologická mapa povodí Ptačího potoka

Obrázek 8: Výškové a sklonitostní poměry povodí Ptačího potoka

Obrázek 9: Vegetační pokryv povodí Ptačího potoka

Obrázek 10: Průměrné měsíční úhrny srážek z meteorologických stanic Churáňov a Filipova Huť a průměrná měsíční teplota na stanici Churáňov v letech 1980-2013

Obrázek 11: Graf znázorňující vývoj výšky sněhové pokrývky v zimních sezónách 2015/2016, 2016/2017 a 2017/2018 na automatické stanici SPA v povodí Ptačího potoka

Obrázek 12: Graf průměrných měsíčních průtoků profilu Vydra – Modrava v letech 1980-2013

Obrázek 13: Automatická stanice PřF UK měřící elektromagnetické záření na otevřené ploše u Ptačího potoka

Obrázek 14: Rozmístění zájmových lokalit s polohou automatických stanic v okolí Ptačího potoka

Obrázek 15: Digitální zrcadlový fotoaparát Nikon D3200 s objektivem fisheye na otevřené ploše

Obrázek 16: Schéma pořízení hemisférických snímků vegetace

Obrázek 17: Rozdíly v Leaf Area Indexu mezi jednotlivými lokaliatmi 10. 4. 2019

Obrázek 18: Průběh teploty vzduchu a výšky sněhu v období 27. 3.-3. 4. 2017

Obrázek 19: Hodinový průměr příchozí krátkovlnné radiace na otevřené ploše a podíl propuštěného krátkovlnného záření v poškozeném a zdravém lese v letech 2016-2019

Obrázek 20: Průměrná propustnost krátkovlnného záření v jednotlivých dnech v poškozeném lese v letech 2016-2019

Obrázek 21: Závislost změny příchozího záření na změně propustnosti v poškozeném a zdravém lese za období 27. 3.-3. 4. v letech 2018 a 2019
Obrázek 22: Vývoj příchozí krátkovlnné a dlouhovlnné radiace, odchozí dlouhovlnné radiace a výšky sněhové pokrývky ve třech lokalitách v období 27. 3.-3. 4. 2018
Obrázek 23: Vývoj příchozí krátkovlnné a dlouhovlnné radiace, odchozí dlouhovlnné radiace a výšky sněhové pokrývkyve třech lokalitách v období 27. 3.-3. 4. 2019
Obrázek 24: Rozdíl mezi příchozím a vyzářeným dlouhovlnným zářením v poškozeném lese za období od 27. 3. do 3. 4. v letech 2016-2019
Obrázek 25: Rozdíly v příchozí a odchozí dlouhovlnné radiaci v poškozeném lese a ve zdravém lese za období od 27. 3. do 3. 4. v letech 2016-2019
Obrázek 26: Výřez okna programu Gap Light Analyzer 2.0 zobrazuje nastevení prahu funkcí Threshold

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Typické hodnoty hustoty sněhu pro odlišné druhy sněhové pokrývky

Tabulka 2: Přehled hlavních metamorfických procesů ovlivňujících hustotu a strukturu sněhu

Tabulka 3: Průměrná hodnota albeda sněhu a ledu odlišného stáří

Tabulka 4: Podíl příchozí radiační energie v celkové energetické bilanci sněhové pokrývky v daný měsíc u chráněné a nechráněné plochy před vnějšími vlivy v období od listopadu do konce června v blízkosti Smaragdového jezera, Britská Kolumbie, Kanada

Tabulka 5: Vyřazená období se zasněženým horním pyranometrem

Tabulka 6: Příchozí SW radiace, medián rozdílů LW radiace a průměr propustnosti SW radiace vegetací v poškozeném lese a ve zdravém lese a Pearsonův korelační koeficient závislosti bilance LW radiace na celkovém úhrnu SW radiace ve zdravém lese v období od 27. 3. do 3. 4. v letech 2016-2019

Přílohy

Příloha 1: Tabulka hloubky sněhové pokrývky s vyznačenými průniky dnů bez měřících chyb stanic pro definování porovnatelných období (modré podbarvení) v závěru čtyř po sobě jdoucích zimních sezón (15. 2.-30. 4.; sezóna 2015/2016 je uvedena od 16. 2. z důvodu přestupného dne). Červené datum značí dny se zasněženým čidlem (tab. 5, kapitola 4.3.1), černé datum značí dny bez měřících chyb záření, žluté datum dny bez sněhové pokrývky a modré datum dny, které lze porovnat v rámci sezón (KFGG, ČHMÚ, vlastní zpracování)

2015/2016		2016/2017		2017/2018		2018/2019	
datum	výška sněhu [cm]	datum	výška sněhu [cm]	datum	výška sněhu [cm]	datum	výška sněhu [cm]
16.2.2016	65,3	15.2.2017	69,8	15.2.2018	124,5	15.2.2019	X
17.2.2016	68,7	16.2.2017	68,5	16.2.2018	125,1	16.2.2019	138,0
18.2.2016	68,2	17.2.2017	68,3	17.2.2018	125,5	17.2.2019	135,8
19.2.2016	68,4	18.2.2017	70,9	18.2.2018	131,1	18.2.2019	137,5
20.2.2016	69,8	19.2.2017	69,3	19.2.2018	131,1	19.2.2019	136,1
21.2.2016	73,0	20.2.2017	68,8	20.2.2018	130,6	20.2.2019	136,4
22.2.2016	59,6	21.2.2017	68,1	21.2.2018	128,8	21.2.2019	133,8
23.2.2016	53,1	22.2.2017	62,0	22.2.2018	130,5	22.2.2019	129,7
24.2.2016	54,7	23.2.2017	53,6	23.2.2018	130,2	23.2.2019	128,3
25.2.2016	54,9	24.2.2017	49,7	24.2.2018	129,8	24.2.2019	128,8
26.2.2016	55,2	25.2.2017	50,6	25.2.2018	129,7	25.2.2019	125,9
27.2.2016	55,5	26.2.2017	50,2	26.2.2018	129,9	26.2.2019	125,3
28.2.2016	55,3	27.2.2017	48,5	27.2.2018	129,8	27.2.2019	124,3
29.2.2016	56,0	28.2.2017	53,0	28.2.2018	130,5	28.2.2019	123,4
1.3.2016	65,0	1.3.2017	71,8	1.3.2018	130,5	1.3.2019	123,2
2.3.2016	66,5	2.3.2017	78,0	2.3.2018	130,5	2.3.2019	121,7
3.3.2016	69,1	3.3.2017	73,9	3.3.2018	129,1	3.3.2019	120,8
4.3.2016	67,0	4.3.2017	69,4	4.3.2018	128,8	4.3.2019	117,1
5.3.2016	65,6	5.3.2017	66,3	5.3.2018	128,3	5.3.2019	X
6.3.2016	63,8	6.3.2017	69,2	6.3.2018	127,7	6.3.2019	123,4
7.3.2016	66,8	7.3.2017	72,4	7.3.2018	127,3	7.3.2019	119,5
8.3.2016	70,0	8.3.2017	73,5	8.3.2018	127,1	8.3.2019	117,2
9.3.2016	68,2	9.3.2017	78,4	9.3.2018	127,0	9.3.2019	117,2
10.3.2016	66,9	10.3.2017	74,5	10.3.2018	123,8	10.3.2019	117,1
11.3.2016	67,4	11.3.2017	73,2	11.3.2018	118,9	11.3.2019	X
12.3.2016	67,0	12.3.2017	71,9	12.3.2018	115,0	12.3.2019	X
13.3.2016	67,8	13.3.2017	71,2	13.3.2018	109,5	13.3.2019	X
14.3.2016	67,8	14.3.2017	70,2	14.3.2018	102,1	14.3.2019	X
15.3.2016	72,5	15.3.2017	68,8	15.3.2018	104,5	15.3.2019	143,6
16.3.2016	80,0	16.3.2017	66,8	16.3.2018	106,4	16.3.2019	128,8
17.3.2016	75,9	17.3.2017	63,9	17.3.2018	105,9	17.3.2019	124,0
18.3.2016	70,1	18.3.2017	62,1	18.3.2018	105,0	18.3.2019	X
19.3.2016	67,2	19.3.2017	60,4	19.3.2018	104,0	19.3.2019	X

20.3.2016	65,9	20.3.2017	53,3	20.3.2018	103,6	20.3.2019	123,9
21.3.2016	64,7	21.3.2017	49,0	21.3.2018	106,5	21.3.2019	124,3
22.3.2016	61,3	22.3.2017	47,1	22.3.2018	105,8	22.3.2019	123,2
23.3.2016	63,4	23.3.2017	43,8	23.3.2018	107,7	23.3.2019	120,3
24.3.2016	62,8	24.3.2017	40,8	24.3.2018	107,6	24.3.2019	117,4
25.3.2016	62,5	25.3.2017	38,0	25.3.2018	103,9	25.3.2019	116,0
26.3.2016	67,3	26.3.2017	34,9	26.3.2018	102,7	26.3.2019	X
27.3.2016	65,7	27.3.2017	31,6	27.3.2018	102,3	27.3.2019	117,9
28.3.2016	61,4	28.3.2017	28,0	28.3.2018	105,3	28.3.2019	116,7
29.3.2016	55,8	29.3.2017	23,7	29.3.2018	100,7	29.3.2019	113,6
30.3.2016	52,8	30.3.2017	19,7	30.3.2018	98,6	30.3.2019	112,8
31.3.2016	47,5	31.3.2017	15,0	31.3.2018	96,3	31.3.2019	109,7
1.4.2016	42,8	1.4.2017	10,0	1.4.2018	95,8	1.4.2019	104,7
2.4.2016	38,4	2.4.2017	5,5	2.4.2018	95,7	2.4.2019	101,1
3.4.2016	33,7	3.4.2017	0,2	3.4.2018	90,6	3.4.2019	95,7
4.4.2016	28,5	4.4.2017	0	4.4.2018	86,4	4.4.2019	91,5
5.4.2016	23,0	5.4.2017	0	5.4.2018	82,8	5.4.2019	86,5
6.4.2016	19,0	6.4.2017	0	6.4.2018	78,8	6.4.2019	80,5
7.4.2016	15,1	7.4.2017	0	7.4.2018	73,6	7.4.2019	76,7
8.4.2016	10,9	8.4.2017	0	8.4.2018	69,2	8.4.2019	74,4
9.4.2016	0	9.4.2017	0	9.4.2018	65,1	9.4.2019	70,4
10.4.2016	0	10.4.2017	0	10.4.2018	63,5	10.4.2019	67,7
11.4.2016	0	11.4.2017	0	11.4.2018	59,7	11.4.2019	63,5
12.4.2016	0	12.4.2017	0	12.4.2018	53,6	12.4.2019	62,2
13.4.2016	0	13.4.2017	0	13.4.2018	47,7	13.4.2019	62,6
14.4.2016	0	14.4.2017	0	14.4.2018	41,2	14.4.2019	61,4
15.4.2016	0	15.4.2017	0	15.4.2018	34,3	15.4.2019	60,3
16.4.2016	0	16.4.2017	0	16.4.2018	30,4	16.4.2019	56,7
17.4.2016	0	17.4.2017	4,1	17.4.2018	24,3	17.4.2019	53,2
18.4.2016	0	18.4.2017	12,4	18.4.2018	18,5	18.4.2019	48,6
19.4.2016	0	19.4.2017	22,5	19.4.2018	12,6	19.4.2019	43,3
20.4.2016	0	20.4.2017	18,0	20.4.2018	4,2	20.4.2019	36,7
21.4.2016	0	21.4.2017	14,3	21.4.2018	0	21.4.2019	31,0
22.4.2016	0	22.4.2017	7,5	22.4.2018	0	22.4.2019	28,5
23.4.2016	0	23.4.2017	5,7	23.4.2018	0	23.4.2019	23,6
24.4.2016	0	24.4.2017	3,0	24.4.2018	0	24.4.2019	0
25.4.2016	0	25.4.2017	0	25.4.2018	0	25.4.2019	0
26.4.2016	19,8	26.4.2017	1,1	26.4.2018	0	26.4.2019	0
27.4.2016	26,8	27.4.2017	12,3	27.4.2018	0	27.4.2019	0
28.4.2016	24,3	28.4.2017	24,4	28.4.2018	0	28.4.2019	0
29.4.2016	19,6	29.4.2017	27,0	29.4.2018	0	29.4.2019	0
30.4.2016	7,7	30.4.2017	19,1	30.4.2018	0	30.4.2019	0