

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STAVEBNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2020

**ABIGAIL
KLEJCHOVÁ**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Klejchová</u>	Jméno: <u>Abigail</u>	Osobní číslo: <u>468434</u>
Zadávací katedra: <u>K141</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Inženýrství životního prostředí</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Využití gamaspektroskopie k detekci vodní hodnoty sněhu a půdní vlhkosti

Název bakalářské práce anglicky: Use of proximal gamma-ray spectroscopy for detection of snow water equivalent and soil moisture content

Pokyny pro vypracování:

Řešerše využití gamma spektroskopie v hydrologii se zaměřením na sněhovou hydrologii. Analýza principu měření vodní hodnoty sněhu ve vztahu k výstupům z čidla CS725 (vč. případné komunikace s výrobcem). Vyhodnocení měření vodní hodnoty sněhu na Nové louce (Jizerské hory) v zimní sezóně 2018-2019. Porovnání měření vodní hodnoty sněhu s výsledky měření sněhové pokrývky na povodí Uhlířská.

Seznam doporučené literatury:

Manuál čidla vodní hodnoty sněhu CS725 (Campbell Sci. Ltd).

Choquette, Y., Lavigne, P., Ducharme, P., Houdayer, A., Martin, J.P. 2010. Apparatus and method for monitoring snow water equivalent and SM content using natural gamma radiation, US Patent 7,800,051 B2.

Smith, C. D., Kontu, A., Laffin, R., and Pomeroy, J. W.: An assessment of two automated snow water equivalent instruments during the WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment, The Cryosphere, 11, 101–116, 2017.

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Michal Dohnal, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 17. 1. 2020

Termín odevzdání bakalářské práce: 17. 5. 2020

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

17.2.2020

Datum převzetí zadání

7 Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „*Využití gamaspektroskopie k detekci vodní hodnoty sněhu a půdní vlhkosti*“ vypracovala samostatně a že jsem uvedla všechny podklady, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne

.....
Abigail Klejchová

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Michalu Dohnalovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, cenné poznámky, rychlé a ochotné konzultace a poskytnutí dat. Dále děkuji pozorovatelce ČVUT v Praze Ing. Aleně Kulasové za pořízení ručních měření na lokalitě Tomšovka a jejich poskytnutí. Děkuji Mgr. Václavu Vajskebrovi (Český hydrometeorologický ústav) za poskytnutá data z okolních stanic. Děkuji Francescovi Casulemu (Campbell Scientific, Ltd.) za odbornou konzultaci ohledně čidla CS725.

Při zpracování této práce byly využity infrastruktury pořízené v rámci projektu OPVTV – ERDF CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_017/0002626 „Modernizace a doplnění infrastruktur výzkumně zaměřených programů v oblasti vodního hospodářství a environmentálního inženýrství“. Výzkum byl podpořen z projektu Grantové agentury České republiky 20-00788S.

Abstrakt

V roce 2018 bylo v Jizerských horách na lokalitě Nová Louka umístěno čidlo CS725, které využívá útlumu přirozeného terestriálního gama záření pro detekci vodní hodnoty sněhu a půdní vlhkosti. Získaná data vodní hodnoty sněhu byla porovnána s jinými způsoby měření, jak na lokalitě Nová Louka, tak na blízkých lokalitách v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020. Vodní hodnoty sněhu získané čidlem jsou věrohodné a čidlo se tedy zdá být vhodným nástrojem pro jejich stanovení. Čidlo poskytuje automatická a kontinuální měření a nabízí tak možnost získání přesnějších datových řad než sporadicky prováděná ruční měření. Navíc naměřené vodní hodnoty sněhu jsou prostorově průměrovanou informací reprezentující plochu v řádu 100 m².

Klíčová slova

Gamaspektroskopie, vodní hodnota sněhu, půdní vlhkost, prostorová variabilita měření, kontinuální měření

Abstract

In 2018, a sensor CS725 was placed at the location Nová Louka in the Jizera Mountains. The sensor uses attenuation of natural terrestrial gamma radiation for the detection of snow water equivalent and soil moisture. The acquired data of snow water equivalent were compared with other methods of measurement both at the location Nová Louka and other nearby locations during winter seasons 2018/2019 and 2019/2020. Snow water equivalent measured by the sensor was found to be credible, and the sensor seems to be an adequate tool for its determination. The sensor provides automatic and continuous measurements, and so it offers the possibility of gaining more accurate data series than sporadically conducted manual measurement. In addition, measured snow water equivalent is spatially averaged information representing an area in the order of 100 m².

Key words

Gamma-ray spectroscopy, snow water equivalent, soil moisture, spatial variability of measurement, continuous measurement

1. Obsah

1. Úvod	9
2. Cíl práce.....	10
3. Materiály a metody	11
3.1 Charakteristiky sněhové pokrývky.....	11
3.1.1 Základní rozdělení atmosférických srážek	11
3.1.2 Definice sněhu	11
3.1.3 Výška sněhové pokrývky.....	12
3.1.4 Hustota sněhu.....	12
3.1.5 Vodní hodnota sněhu	13
3.2 Půdní vlhkost.....	14
3.3 Radionuklidy	15
3.4 Senzor CS725.....	17
3.5 Lokality měření	18
3.5.1 Charakteristiky území Jizerské hory	18
3.5.1.1 Geomorfologické poměry	18
3.5.1.2 Klimatické poměry	18
3.5.1.3 Hydrologické poměry.....	19
3.5.1.4 Geologické a půdní poměry	19
3.5.1.5 Volba lokality pro instalaci čidla CS725	19
3.5.2 Nová Louka.....	21
3.5.3 Tomšovka.....	22
3.5.4 Další lokality v širším okolí.....	23
3.6 Dostupná hydrologická měření	25
3.6.1 Sensor CS725.....	25
3.6.2 Ultrazvukový hladinoměr US4200	25
3.6.3 Váhový sněhoměr	26

3.6.4	Sněhoměrná lať a kamera Brinno BCC100	26
3.6.5	Manuální měření výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu.....	26
3.6.6	Váhový srážkoměr MRW500	27
3.6.7	Teplotní snímač PT100-XM	27
3.6.8	Čidla CS650	27
3.7	Výpočet <i>SWE</i>	29
3.8	Výpočet <i>SM</i>	31
4.	Výsledky.....	32
4.1	Dostupná data.....	32
4.2	Provedené analýzy	33
4.2.1	Vztah mezi vyzařovaným signálem a vodní hodnotou sněhu.....	33
4.2.2	Analýza doporučeného postupu určení <i>SWE</i>	34
4.2.3	Draslík vs. thalium.....	38
4.2.4	Porovnání zimních období 2018/2019 a 2019/2020	39
4.2.5	Výška sněhové pokrývky a její hustota	40
4.2.6	Porovnání dat z CS725 na Nové Louce a dat z ostatních lokalit.....	42
4.2.6.1	Oprava dat měření váhového sněhoměru Tomšovka	42
4.2.6.2	Porovnání dat	44
4.2.7	Analýza přechodových období	49
4.2.8	Výpočet půdní vlhkosti čidlem CS725	52
5.	Závěr.....	55
6.	Seznam použitých zdrojů	57
7.	Seznam obrázků.....	57
8.	Seznam tabulek.....	61
9.	Seznam rovnic	61

1. Úvod

Sledování výšky sněhové pokrývky a její vodní hodnoty je z hydrologického hlediska velice důležité. Informace o vodní hodnotě sněhu (*snow water equivalent, SWE*) jsou nezbytné pro řadu aplikací ve vodním hospodářství. Zemědělské činnosti a předpovědi množství dostupné pitné vody jsou ovlivněny doplňováním zásob vod v půdě a zásob podzemní vody v období tání, které do značné míry závisí na maximální vodní hodnotě sněhu. Je také užitečné znát intenzitu tání sněhu, aby bylo možné optimalizovat provoz hydrotechnických děl nebo zmírnit dopady povodní (Choquette et al. 2013).

Sporadické manuální průzkumy vodní hodnoty sněhu nejsou ideální pro zjištění reprezentativní hodnoty *SWE* (Choquette et al. 2013). Vysoko položená místa nejsou mnohdy ani celoročně dostupná a nelze tedy často manuální měření provést. Proto dochází k vývoji automatických přístrojů pro získání požadovaných veličin. Automatické přístroje poskytují kontinuální měření, které umožňuje získávat data a vytvářet předpovědi množství vody obsažené ve sněhové pokrývce nebo půdním podloží v reálném čase. Kontinuální měření *SWE* jsou také ideálním nástrojem pro přesné časové určení maximální hodnoty *SWE* (Wright et al. 2011).

Jednou z metod automatického a zároveň kontinuálního měření vodní hodnoty sněhu je gamaspektroskopie. Vědci pomocí měření založených na útlumu přirozeného gama záření stanovují *SWE*, a do jisté míry i půdní vlhkost, již desetiletí (Ducharme et al. 2015).

Gamaspektroskopie je výborný spojovací článek mezi měřeními *SWE* satelitními metodami a manuálními bodovými měřeními. Vzhledem k velké prostorové variabilitě sněhové pokrývky je využití plošných integrovaných měření (v rádech 50 - 100 m²) výhodou oproti ručním bodovým měřením (Baldoncini et al. 2019). Naopak satelitní měření mají měřítka dosud příliš velká a nemusí tak dojít k dosažení požadované přesnosti. Při použití satelitních metod k měření *SWE* jsou také nutné dobré atmosférické podmínky (bez stínění mraky, dobré světelné podmínky apod.), které ale při terestriálních měřeních problém nepředstavují.

Překlenutí mezery mezi bodovým měřením (v řádu cm²) a měřítkem povodí (v řádu hektarů) je také otevřený problém měření půdní vlhkosti (*soil moisture, SM*), který v poslední době podpořil rozvoj alternativních technik postavených právě na detekci neutronových kosmických paprsků a terestriálního gama záření. Manuální bodové měření

provedené elektromagnetickými nebo gravimetrickými metodami začínají překonávat inovativní technologie měření půdní vlhkosti, které jsou neinvazivní, kontinuální a poskytující výsledek reprezentující větší prostorová měřítka. Baldoncini et al. (2019) pokládá gamaspektroskopii s trvale umístěnými stanicemi za jednu z nejlepších metod, která dokáže poskytnout časové řady vlhkosti půdy a současně minimalizovat náklady a pracovní sílu, a to díky sensorům, které získávají data v reálném čase a na dálku (Baldoncini et al. 2019). Proveditelnost a spolehlivost monitorování obsahu půdní vody pomocí terestrického gama záření byly potvrzeny například při sedmiměsíčním kontinuálním měření v testovacím rajčatovém poli v období 4. dubna – 2. listopadu 2017 v areálu Acqua, výzkumném středisku blízko Bologny (Strati et al. 2018).

2. Cíl práce

Cílem práce je analyzovat měření vodní hodnoty sněhu a půdní vlhkosti čidlem CS725 na lokalitě Nová Louka v Jizerských horách, které zde probíhá od listopadu 2018. Práce se zabývá nejprve čidlem samotným, tedy vztahem mezi signálem detekovaným čidlem a vodní hodnotou sněhu a interním přepočtem pomocí rovnice, dle které čidlo vodní hodnotu sněhu počítá. Dále pak porovnáním vodní hodnoty sněhu získané z měření gama záření izotopu draslíku (^{40}K) a izotopu thalia (^{208}Tl) a porovnáním provedených měření v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020 na lokalitě Nová Louka s jinými lokalitami. V neposlední řadě se práce zaměřuje na přechodová období nárůstu sněhové pokrývky nebo naopak tání sněhu a půdní vlhkost.

3. Materiály a metody

3.1 Charakteristiky sněhové pokrývky

V následujících kapitolách jsou uvedeny definice základních pojmů meteorologie srážek a sněhové hydrologie.

3.1.1 Základní rozdělení atmosférických srážek

V celé práci jsou základní pojmy definovány shodně s meteorologickým slovníkem (Bednář et al. 1993). Za atmosférické srážky jsou považovány částice vzniklé následkem kondenzace vodní páry v ovzduší a vyskytující se v atmosféře, na půdním povrchu nebo na předmětech v kapalně nebo pevně fázi (Bednář et al. 1993).

Srážky kapalně jsou hydrometeory tvořené vodními kapkami dopadajícími z oblaků na zemský povrch nebo usazenými na předmětech na zemském povrchu. Mezi padající kapalně srážky patří déšť a mrholení, k usazeným srážkám kapalným patří rosa. Srážky tuhé jsou hydrometeory, které jsou tvořené ledovými částicemi dopadajícími z oblaků na zemský povrch nebo usazenými na předmětech na zemském povrchu. Mezi padající srážky tuhé patří mrznoucí déšť, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, zmrzlý déšť, zmrzlé krupky, kroupy a ledové jehličky. Mezi usazené srážky tuhé patří zmrzlá rosa, jíní, námraza a ledovka (Bednář et al. 1993).

3.1.2 Definice sněhu

Sníh je jeden z hydrometeorů tuhého skupenství vypadávající z oblaků. Sníh je tvořen z ledových krystalků a po dopadu na zem s teplotou pod 0 °C vytváří sněhovou pokrývkou nebo poprašek. Klasická meteorologie rozlišuje sníh starý a nový (Bednář et al. 1993).

Sníh starý je v meteorologické praxi výška sněhové pokrývky (*snow cover extent, SCE*), která ležela na zemském povrchu před termínem pozorování, od něhož mohl napadnout sníh nový. Sníh nový je výška sněhové pokrývky, která se vytvořila ze sněhu napadlého mezi příslušnými daty pozorování (Bednář et al. 1993). V dnešní době, kdy dochází k automatizaci měření a s tím spojené vyšší četnosti měření, přestává být toto dělení aktuální. Význam má pro zachování kontinuity měření.

3.1.3 Výška sněhové pokrývky

Výšku sněhové pokrývky definuje meteorologický slovník (Bednář et al. 1993) jako vertikální vzdálenost mezi povrchem sněhové pokrývky a povrchem půdy. Výška pokrývky závisí na množství napadlých tuhých srážek a teplotě vzduchu a povrchu (Dub a Němec 1969), na rychlosti a směru větru a expozici stanoviště. Je rozlišována celková výška sněhové pokrývky a průměrná výška sněhové pokrývky (Bednář et al. 1993).

Celková výška sněhové pokrývky je součet výšky starého a nového sněhu. Průměrná výška sněhové pokrývky je klimatologická charakteristika sněhových poměrů místa nebo oblasti, definovaná jako součet celkových výšek sněhové pokrývky dělený počtem dní se sněhovou pokrývkou v daném měsíci. Průměrná výška sněhu je naproti tomu definovaná jako součet celkových výšek pokrývky v daném měsíci dělený počtem všech dní příslušného měsíce (Bednář et al. 1993). Průměrná výška sněhu je tedy menší nebo rovna výšce sněhové pokrývky.

Sněhová pokrývka podléhá vlivem gravitace, působení krátkovlnného záření ze Slunce a dlouhovlnného záření zemského povrchu nebo rekrystalizace sněhových zrn změnám. Nejvýznamnějšími důsledky jsou zvyšování hustoty sněhu a snižování celkové výšky sněhové pokrývky během zimní sezóny (Dub a Němec 1969).

3.1.4 Hustota sněhu

Hustotou sněhu se rozumí hmotnost objemové jednotky sněhové pokrývky vyjádřená v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Bednář et al. 1993). Hustota sněhu je významnou charakteristikou sněhové pokrývky, protože s ní úzce souvisí další vlastnosti sněhu (Dub a Němec 1969). Hustota sněhu se většinou zvyšuje v období tání sněhu.

Výpočet hustoty sněhu:

$$\rho_s = \frac{m}{S \cdot h} \quad , \quad (1)$$

kde:

ρ_s ... hustota sněhu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

m ... hmotnost sněhu (kg)

S ... průřezová plocha sněhoměru (m^2)

h ... výška sněhové pokrývky (m)

3.1.5 Vodní hodnota sněhu

Vodní hodnota sněhové pokrývky je definovaná jako tloušťka vodní vrstvy v mm, která vznikne rozpuštěním sněhové pokrývky. Vodní hodnota nově napadlého 1 cm prachového sněhu (prašanu) činí asi 0,6 - 1 mm, firnu kolem 3 mm a sněhu lepkavého, popřípadě až rozbředlého, více než 4 mm vodního sloupce (Bednář et al. 1993).

Vodní hodnota sněhu souvisí s hustotou sněhu. Čím vyšší je vodní hodnota sněhu, tím vyšší je i jeho hustota. Při ručním měření se hustota z vodní hodnoty sněhu počítá.

3.2 Půdní vlhkost

Vlhkost půdy je množství vody obsažené v půdních pórech. Vyjadřuje se jako poměr hmotnosti vody obsažené ve vzorku půdy k celkovému objemu, nebo k celkové hmotnosti vzorku vysušeného při teplotě 105 °C. Dle toho rozlišujeme půdní vlhkost objemovou a hmotnostní (Bednář et al. 1993). Hmotnostní vlhkost půdy je tedy poměr hmotnosti vody ku hmotnosti půdního skeletu. Objemová vlhkost půdy je potom poměr objemu vody k objemu vzorku půdy (Kutílek 1978).

Hmotnostní vlhkost půdy:

$$w = \frac{m_w}{m_z} \quad , \quad (2)$$

kde:

w ...hmotnostní vlhkost půdy (-)

m_w ...hmotnost vody obsažené ve vzorku půdy (kg)

m_z ...hmotnost vzorku vysušeného při 105 °C (kg)

Objemová vlhkost půdy:

$$\Theta = \frac{V_w}{V_s} \quad , \quad (3)$$

kde:

Θ ... objemová vlhkost půdy ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

V_w ...objem vody obsažené v půdním vzorku (m^3)

V_s ... objem vzorku (m^3)

Po vynásobení pravé části rovnic (2) a (3) číslem 100 je možné výslednou vlhkost vyjádřit v procentech. Vlhkost půdy se mění během roku ve velmi širokém rozmezí, je závislá na srážkách, výparu, odtokových poměrech stanoviště, spotřebě vody na transpiraci rostlin, na poloze hladiny podzemní vody aj. Také po výšce půdního profilu je vlhkost značně proměnná a kromě hydrologických vlivů se uplatňují i zvrstvení půdy a celkové fyzikální poměry v profilu (Kutílek 1978).

Pro výpočet vodní hodnoty sněhu pomocí čidla CS725 je důležité znát správnou hodnotu půdní vlhkosti (*soil moisture*, *SM*). V zimním období se předpokládá nasycená půdní vlhkost (*saturated soil moisture*, *SSM*) nebo vlhkost této vlhkosti blízká. Tato hodnota se uvažuje jako konstantní. Předpoklad, že půdní vlhkost je konstantní pod sněhovou pokrývkou o tloušťce 20-30 cm ověřovali například Choquette et al. (2013) experimentálními měřeními na lokalitě Gouin v letech 2007 - 2010.

3.3 Radionuklidy

Radionuklidy nazýváme radioaktivní prvky, které emitují gama záření. Gama paprsky jsou kvanta nebo fotony o vysoké energii a elektromagnetickém záření s krátkou vlnovou délkou emitované z přirozeně se vyskytujících izotopů (Mahmood et al. 2013).

Radionuklidy, které se vyskytují v půdním podloží, horninách, vodě nebo zemské atmosféře, se nazývají terestriální radionuklidy. Tyto radionuklidy se v zemi mohou vyskytovat přirozeně, nebo mohou být uměle dodané do půdy člověkem. Terestriální radionuklidy produkují terestriální gama záření. Jeho intenzita může kolísat v závislosti na lokalitě (McMahon 2020).

Množství a distribuci radionuklidů ovlivňují geomorfologické procesy (Mahmood et al. 2013). Obecně, ale nikoli výhradně, půda obsahující anorganický materiál emituje více záření gama než půdy obsahující vysoký podíl organické složky (např. rašelina) (Choquette et al. 2010). Dále existuje závislost mezi strukturou půdy a přítomností různých radionuklidů. Například písčité půdy s vylouhovanými profily lze snadno rozpoznat díky nízké koncentraci radionuklidů. Naproti tomu jílovité půdy jsou schopné adsorbovat ^{232}Th a proto zjištěním koncentrace ^{232}Th lze zjistit obsah jílu v půdě. Granitové podloží obsahuje draselné živce. Čerstvě zvětralá žula s mělkým půdním profilem má vysokou hodnotu izotopu draslíku ^{40}K . Obecně se koncentrace ^{40}K , ^{232}Th a ^{238}U v půdě a horninách zvyšuje se zvyšujícím se obsahem oxidu křemičitého (Mahmood et al. 2013). Díky znalosti těchto závislostí je možné předem odhadnout vhodnost stanoviště pro využití gamaspektroskopických měření.

Vlnové délky, na kterých terestriální radionuklidy emitují záření nebo jejich intenzita nejsou pro lidské zdraví nebezpečné (McMahon 2020). Do skupiny terestriálních radionuklidů patří mimo jiné také draslík-40 a thalium-208, kterými se tato práce zabývá.

Draslík-40 (^{40}K) je radioizotop draslíku s poločasem rozpadu přibližně $1,25 \times 10^9$ let. Předpokládá se, že zemská kůra obsahuje 2,0 – 2,4 % draslíku a řadí tak draslík na 6. místo ve výskytu prvků na zemi. Radioizotop ^{40}K tvoří zhruba 0,012 % přírodního draslíku. Produkty rozpadu je vápník-40 (^{40}Ca) a argon-40 (^{40}Ar) (Příspěvatelé Wikipedie 2020a). Draslík-40 emituje gama záření o energii 1,46 MeV (Choquette et al. 2010).

Thalium-208 (^{208}Tl) je radioizotop thalia s poločasem rozpadu přibližně 3,058 min. Produktem rozpadu izotopu ^{208}Tl je olovo-208 (^{208}Pb) (Přispěvatelé Wikipedie 2019). Thalium-208 emituje gama záření o energii 2,613 MeV (Choquette et al. 2010).

3.4 Senzor CS725

CS725 je senzor patentovaný a v současnosti vyráběný firmou Hydro – Quebec (Institut de recherche d'Hydro-Quebec (IREQ), Varennes, Qc, CANADA). Jedná se o gamaspektrometr, který byl primárně vyvinut pro zjištění vodní hodnoty sněhu (*SWE*) (Campbell Scientific, Inc. 2012). Čidlo je však možné využít také k odhadu půdní vlhkosti.

Gama záření je přirozeně produkováno některými prvky v půdě. Mimo jiné se jedná o izotop Draslíku-40 (^{40}K) a Thalia-208 (^{208}Tl). Útlum gama signálu se mění v závislosti na přítomnosti vody mezi zdrojem záření v hornině/půdě a čidlem. Půdní vlhkost (*SM*) a sněhová pokrývka tedy snižují počet detekovaných elektromagnetických záření (*N*) zaznamenaných za časové období čidlem CS725. S výjimkou krátkých statistických výkyvů je úroveň radioaktivity půdy konstantní nad sledovanými energetickými okny. Signál vyzařovaný zcela suchou půdou a bez sněhu nebo vody na půdním povrchu je tedy konstantní (N_0) (Choquette et al. 2013). Senzor CS725 používá k detekci gama záření krystal jodidu sodného dotovaný thaliem (Choquette et al. 2010). Senzor detekuje počet elektromagnetických záření za určitou dobu (*N*) a následně z útlumové rovnice (blíže viz kapitola 3.6) vypočte vodní hodnotu sněhu (*SWE*).

Senzor umístěný na lokalitě Nová Louka je opatřen kolimátorem. Ten slouží k ochraně před gama zářením vyzařovaným ze zdrojů, které nejsou v cílové oblasti (Smith et al. 2017). Kolimátor také usměrňuje zorné pole na 120° (Choquette et al. 2010). Jedná se o pasivní měření (čidlo samotné gama záření nevyzařuje), které pokrývá poměrně velkou plochu. Typicky se jedná o plochu 50 - 100 m², a to za předpokladu, že je čidlo umístěno 300 cm nad zemí. Spodní hrana čidla na lokalitě Nová Louka je ve výšce 353 cm nad zemí, spodní hrana kolimátoru je pak 345 cm nad zemí. Čidlo na Nové Louce tudíž detekuje gama záření z oblasti cca 117 m².

Vzhledem k využití dvou zdrojů gama záření, jsou výsledkem také dvě hodnoty *SWE*. Proto jsou dále rozlišovány hodnoty SWE_K pro vodní hodnotu sněhu získanou z počtu záblesků emitovaných při rozpadu izotopu ^{40}K a SWE_{Tl} pro vodní hodnotu sněhu získanou z izotopu ^{208}Tl . Stejně tak je rozlišován počet detekovaných elektromagnetických záření N_K a N_{Tl} a N_{0K} a N_{0Tl} . Čidlo hodnoty *SWE* a *SM* počítá čtyřikrát denně (z důvodu nutnosti kumulace dostatečného množství detekovaných elektromagnetických záření). Čidlo je schopno detekovat *SWE* až do hodnoty 600 mm (Choquette et al. 2013). Nicméně, testy provedené

autory studie v laboratoři ukázaly potenciál této technologie i pro měření vyšších hodnot *SWE*.

3.5 Lokality měření

3.5.1 Charakteristiky území Jizerské hory

Všechny studované lokality se nachází v Jizerských horách. Hlavní lokality - lokalita Nová Louka a lokalita Tomšovka - jsou od sebe vzdáleny přibližně 3 km. Vzhledem k vzájemné blízkosti stanovišť jsou zde obdobné geomorfologické, klimatologické, hydrologické, geologické a půdní poměry. V následující části jsou proto tyto charakteristiky popsány společně pro celé území Jizerské hory.

3.5.1.1 Geomorfologické poměry

Jizerské hory se nacházejí na severu České republiky. Náleží Jizerské a Smrčské hornatině, Hercynském systému, Krkonošsko - jesenické soustavě (ESRI nedatováno). Lokalita Nová Louka i Tomšovka se nachází v Jizerské hornatině.

Pro Jizerské hory jsou charakteristické zarovnané povrchy ve vrcholových oblastech, tvořící vysoko položené náhorní plošiny, ze kterých se zvedají žulové vrcholky a na nichž se často vyskytují mělké deprese s četnými rašeliništi (Příspěvatelé Wikipedie 2020b).

3.5.1.2 Klimatické poměry

Jizerské hory jsou prvním vyšším celistvým útvarem na severozápadní okraji Krkonošsko-jesenické soustavy, díky tomu velmi výrazně ovlivňují počasí a podnebí v širším okolí (proudění vzduchu, srážkové a teplotní poměry apod.). Také velká členitost reliéfu výrazně ovlivňuje místní klimatické podmínky. Území patří do chladné klimatické oblasti.

Průměrná roční teplota: 4 až 7 °C

Průměrné lednové teploty: -7 až -3 °C

Průměrné červencové teploty: 12 až 16 °C

(Zdroj AOPK ČR nedatováno)

Jizerské hory patří k oblastem s velmi vysokými srážkovými úhrny, 800 – 1 700 mm/rok. Území drží republiková prvenství v denních, měsíčních a ročních srážkových úhrnech. Například v roce 1897 na Nové Louce u Bedřichova napršelo za 24 hodin 345 mm vody. Sněhová pokrývka zde leží v průměru 140 – 160 dnů v roce. V nejvyšších polohách dosahuje koncem zimy výšky kolem 150 cm (případně až 300 cm) (Zdroj AOPK ČR nedatováno).

3.5.1.3 Hydrologické poměry

V návaznosti na výše uvedené Jizerské hory mají velmi hustou říční síť a jsou mimořádně bohaté na přírodní zdroje povrchové vody. Území má tedy značný význam pro zásobování liberecko-jablonecké aglomerace pitnou vodou. Vodní režim je významně ovlivňován lesními komplexy, které jsou společně s rašeliništi pro Jizerské hory typické (Zdroj AOPK ČR nedatováno).

3.5.1.4 Geologické a půdní poměry

Převážná část pohoří je tvořena krkonoško-jizerskými magmatickými horninami, což ovlivňuje jeho geomorfologii, složení půdy a tím i charakter vegetace. Na několika místech jej prostupují výlevné vyvěřeliny a na okrajích jsou zastoupeny přeměněné horniny. Na úbočích a v údolích se pak místy objevují čtvrtohorními sedimenty, ve vyšších polohách vrstvy rašeliny (Zdroj AOPK ČR nedatováno).

V centrální části CHKO Jizerské hory se vyskytují zejména kambizemní podzoly, často zrašelinělé. Podzoly jsou pak uváděny jako typické hlavně ve vrcholových polohách (nad 1000 m n.m.). Zastoupeny jsou též kambizemě, organozemě a organozemní gleje (vrchovištní rašeliniště), litozemě a rankery (severní skalnaté svahy) (Zdroj AOPK ČR nedatováno).

3.5.1.5 Volba lokality pro instalaci čidla CS725

Správná funkce čidla CS725 závisí na dostatečném množství izotopů draslíku-40 a thalia-208 přítomném v půdním podloží (Campbell Scientific, Inc. 2012). Intenzita gama záření, jak už bylo uvedeno výše, se v různých lokalitách liší dle typu podloží. Je tedy nutné zvolit pro instalaci čidla vhodnou lokalitu. Při nízkých hodnotách N_K a N_{Tl} čidlo nemusí být schopné správně vyhodnotit SWE . Zda je lokalita vhodná pro instalaci čidla lze zjistit spuštěním čidla v kalibračním módu nebo spuštěním čidla v tetovacím režimu na 24h (Campbell Scientific, Inc. 2012). V následujících tabulkách jsou uvedeny rozsahy hodnot N_K (tabulka 1) a N_{Tl} (tabulka 2) s doporučením, zda je lokalita vhodná pro umístění čidla CS725 a tedy pro měření SWE pomocí tohoto čidla.

Tabulka 1 Rozsah N_K za 1 hodinu s doporučením, zda je lokalita vhodná pro umístění čidla (převzato z Campbell Scientific, Inc. 2012)

Draslík (K) Rozsah detekovaných elektromagnetických záření		
Rozsah N_K za 24 hod	Rozsah N_K za 1 hod	Doporučení
0 - 96000	0 - 4000	K měření <i>SWE</i> čidlem CS725 není dostatečný počet detekovaných elektromagnetických záření.
96000 - 180000	4000 - 7500	Použitelný rozsah pro měření <i>SWE</i> čidlem CS725. Mohou vzniknout větší chyby pro vyšší hodnoty <i>SWE</i> .
180000 - 264000	7500 - 11000	Dobry rozsah pro měření <i>SWE</i> čidlem CS725. Mělo by být možné zachovat výrobcem stanovené operační charakteristiky.
264000 nebo vyšší	11000 nebo vyšší	Vynikající rozsah pro měření <i>SWE</i> pomocí čidla CS725.

Tabulka 2 Rozsah N_{TI} za 1 hodinu s doporučením, zda je lokalita vhodná pro umístění čidla (převzato z Campbell Scientific, Inc. 2012)

Thalium (TI) Rozsah detekovaných elektromagnetických záření		
Rozsah N_{TI} za 24 hod	Rozsah N_{TI} za 1 hod	Doporučení
0 - 9600	0 - 400	K měření <i>SWE</i> čidlem CS725 není dostatečný počet detekovaných elektromagnetických záření.
9600 - 36000	400 - 1500	Použitelný rozsah pro měření <i>SWE</i> čidlem CS725. Mohou vzniknout větší chyby pro vyšší hodnoty <i>SWE</i> .
36000 - 48000	1500 - 2000	Dobry rozsah pro měření <i>SWE</i> čidlem CS725. Mělo by být možné zachovat výrobcem stanovené operační charakteristiky.
48000 nebo vyšší	2000 nebo vyšší	Vynikající rozsah pro měření <i>SWE</i> pomocí čidla CS725.

Čidlo CS725 na lokalitě Nová Louka detekuje hodinové hodnoty v období bez sněhové pokrývky $N_K \approx 40\,000\text{ h}^{-1}$ a $N_{TI} \approx 9\,000\text{ h}^{-1}$. Tato lokalita je tedy z hlediska přítomnosti obou radionuklidů vhodná pro instalaci čidla (vynikající rozsah pro měření *SWE*).

Volba místa instalace čidla a využití kolimátoru závisí také na charakteristikách okolí. Přítomnost stromů, budov a předpokládaná hodnota *SWE* jsou faktory, které ovlivňují funkci čidla. Například dřevní hmota může obsahovat draslík a thalium, které mohou být zdrojem gama záření a mohly by ovlivňovat měření (Campbell Scientific, Inc. 2012). Stejně tak ostatní materiály, které obsahují draslík nebo thalium a nacházejí se nad sněhovou pokrývkou mohou měření ovlivnit. Je proto vhodné se míst s možností dalších zdrojů gama záření vyvarovat.

3.5.2 Nová Louka

Lokalita Nová Louka je situována přibližně 1,5 km od vodní nádrže Bedřichov v Jizerských horách. Nachází se v mírném svahu v nadmořské výšce 778,6 m n. m. Svah je orientován na severovýchod a je ve sklonu 5-7° (ČÚZK 2020). Poprvé se zde začalo měřit již v roce 1878 u zdejší myslivny a zámečku na lesní mýtině, měření však probíhalo pouze do konce 80. let 19. století. Stanice byla následně obnovena 1. ledna 1891. Na stanici Nová Louka se tehdy dle ročenky měřily kromě atmosférických srážek i další meteorologické prvky - tlak a teplota vzduchu, směr a rychlost větru. Pozorování v této lokalitě probíhala až do začátku roku 1943. Tehdy byla meteorologická stanice přemístěna cca 1,5km na západ, na hráz vodní nádrže Bedřichov na řece Černá Nisa (Munzar a Ondráček 2010). Nyní je na Nové Louce automatická meteorologická stanice provozovaná Ústavem pro hydrodynamiku Akademie věd ČR (AV ČR). ČHMÚ má na lokalitě umístěnou automatickou klimatologickou stanici IV. typu a provádí zde měření výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu (ČHMÚ nedatováno).

Měření je zde prováděno na otevřeném stanovišti. Na stanici je umístěno čidlo CS725, váhový srážkoměr, ultrazvukové čidlo výšky sněhové pokrývky, sněhoměrná lať a teploměr s radiačním krytem. Probíhá zde také ruční měření výšky sněhové pokrývky vodní hodnoty sněhu.



Obrázek 1 Meteorologická stanice Ústavu pro hydrodynamiku AV ČR na lokalitě Nová Louka (fotografie pořízena Dr. Miroslavem Tesařem, ÚH Akademie věd ČR)

3.5.3 Tomšovka

Lokalita Tomšovka se nachází na povodí Uhlířská a je vzdálena zhruba 3 km severozápadně od hlavní lokality Nová Louka a přibližně 1,5 km severně od vodní nádrže Bedřichov. Měření jsou prováděna ve svahu v nadmořské výšce 826,4 m n. m. Svah je orientován na východ a má proměnlivý sklon mezi 5-10°. Hydrologická měření zde probíhají od roku 1982. Pravidelně v zimním období jsou prováděna ruční měření výšky a vodní hodnoty sněhové pokrývky (Šmídl 2010). Měření probíhá na mýtině v mladém smrkovém lese, lokalita je tak pravděpodobně více chráněná před vlivem větru než lokalita Nová Louka. Jedná se o experimentální povodí provozované experimentálním oddělením Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT v Praze, Českou geologickou službou a Výzkumným ústavem vodohospodářským T.G. Masaryka. Na této lokalitě je umístěno více hydrologických a hydropedologických měření. Pro tuto práci jsou využita data z váhového sněhoměru, ručního měření výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu.

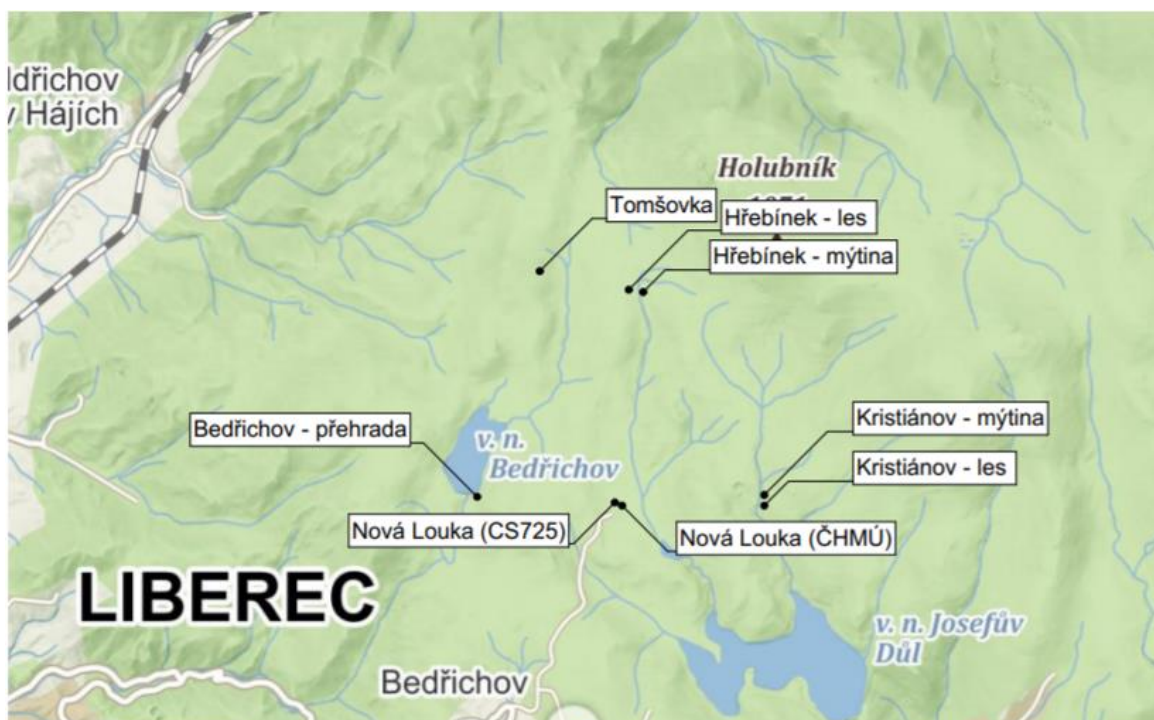
3.5.4 Další lokality v širším okolí

Pro porovnání vodní hodnoty sněhu a výšky sněhové pokrývky byly využity také lokality Nová Louka (ČHMÚ), Hřebínek - les, Hřebínek - mýtina, Kristiánov - les, Kristiánov - mýtina a Bedřichov - přehrada, kde tyto veličiny měří ČHMÚ. Všechny tyto lokality se nacházejí v okolí hlavní lokality Nová Louka (obrázek 2).

Lokalita Hřebínek - mýtina se nachází ve svahu, v nadmořské výšce 824,7 m n. m. přibližně 2,3 km severně od lokality Nová Louka. Svah je orientován jihozápadně a sklon se pohybuje mezi 17-20° (ČÚZK 2020). Měření zde probíhá 1x týdně v pondělí (Vajskebr 2020 - e-mailová komunikace).

Lokalita Hřebínek - les se nachází ve svahu, v nadmořské výšce 832,8 m n. m. přibližně 2,3 km severně od lokality Nová Louka. Svah je orientován jihovýchodně a sklon se pohybuje mezi 7-10° (ČÚZK 2020). Měření zde probíhá 1x týdně v pondělí (Vajskebr 2020 - e-mailová komunikace).

Lokalita Nová Louka (ČHMÚ) se nachází ve svahu, v nadmořské výšce 773,4 m n. m. přibližně 100 m jihovýchodně od umístění čidla CS725. Svah je orientován jihovýchodně a sklon se pohybuje mezi 5-7° (ČÚZK 2020). Měření zde probíhá 1x za 2 týdny ve středu (Vajskebr 2020 - e-mailová komunikace).



Obrázek 2 Lokality měření sněhových charakteristik využitě v bakalářské práci (upraveno z: mapy.cz)

Lokalita Bedřichov - přehrada se nachází ve svahu, v nadmořské výšce 772,6 m n. m. přibližně 1,5 km západně od lokality Nová Louka. Svah je orientován západně a sklon se pohybuje mezi 5-7° (ČÚZK 2020). Měření *SCE* zde probíhá denně, *SWE* 1x týdně v pondělí (Vajskebr 2020 - e-mailová komunikace).

Lokalita Kristiánov - mýtina se nachází ve svahu, v nadmořské výšce 804,6 m n. m. přibližně 1,6 km východně od lokality Nová Louka. Svah je orientován severozápadně a sklon se pohybuje mezi 7-10° (ČÚZK 2020). Měření 1x za 2 týdny ve středu (Vajskebr 2020 - e-mailová komunikace).

Lokalita Kristiánov - les se nachází ve svahu, v nadmořské výšce 797,4 m n. m. přibližně 1,6 km východně od lokality Nová Louka. Svah je orientován západně a sklon se pohybuje mezi 5-7° (ČÚZK 2020). Měření zde probíhá 1x za 2 týdny ve středu (Vajskebr 2020 - e-mailová komunikace).

3.6 Dostupná hydrologická měření

V lokalitách bylo prováděno mnoho různých měření hydrologických a ostatních veličin. Použity byly metody manuální i automatické. V následující části jsou popsána vybraná, pro bakalářskou práci relevantní, provedená měření.

Tabulka 3 Přehled měřících přístrojů využitých v bakalářské práci s jejich výškou umístění

Čidlo	Měřené veličiny	Výška čidla
Čidlo CS725	Vodní hodnota sněhu	353 cm
	Hmotnostní půdní vlhkost	
Ultrazvukový hladinoměr US4200	Výška sněhové pokrývky	343 cm
	Teplota hladinoměru	
Váhový sněhoměr	Vodní hodnota sněhu	-
Váhový srážkoměr MRW500	Množství srážek	283 cm
	Teplota vzduchu	(horní hrana)
Sněhoměrná lať	Výška sněhové pokrývky	-
Kamera Brinno BCC100	Monitoring pod čidlem CS725	360 cm
Manuální měření	Výška sněhové pokrývky	-
	Vodní hodnota sněhu	
Teplotní snímač PT100-XM	Teplota vzduchu	371 cm
Čidla CS650	Objemová půdní vlhkost	-10 cm
		-20 cm
		-30 cm
		-40 cm

3.6.1 Sensor CS725

Princip měření čidlem CS725 je popsán v kapitole 3.3.

3.6.2 Ultrazvukový hladinoměr US4200

Ultrazvukový hladinoměr je umístěn na lokalitě Nová Louka ve výšce 343 cm nad zemí. Hladinoměr je primárně určen na měření výšky hladiny s kompenzací interně měřené teploty vzduchu. Měření výšky sněhové pokrývky ultrazvukovým hladinoměrem je založeno na měření časové prodlevy mezi vyslaným a přijatým odraženým ultrazvukovým impulsem. Měřicí rozsah snímače je 0,35 m až 4,2 m. Rozlišení je 1 mm. Přesnost měření je $< 0,2 \%$ z rozsahu ± 1 mm. (FIEDLER AMS s.r.o. 2017b) Hladinoměr je opatřen radiačním krytem.

3.6.3 Váhový sněhoměr

Váhový sněhoměr je umístěný na lokalitě Tomšovka a je určen ke stanovení vodní hodnoty sněhu. Skládá se z voděodolné dřevěné konstrukční překližkové desky, obdélníkové ocelové rámové podpory se třemi připojenými vážnými čidly. Zaznamenává se váha naměřená každým čidlem zvlášť a hodnoty se následně sečtou a přepočítají na vodní hodnotu sněhu. Váhový sněhoměr je také vybaven svodem, který odvádí tající sníh do překlopného průtokoměru, jehož překlopení se registrují na záznamové jednotce. Maximální registrované množství odhadnuté kapacity vážných čidel je přibližně 700 mm vody ve sněhu. (Funkční vzorek, databáze Výzkum a vývoj v ČR 2009)

3.6.4 Sněhoměrná lať a kamera Brinno BCC100

Na lokalitě Nová Louka je umístěna sněhoměrná lať. Jedná se o červenobílou lať vysokou 1 m, s dílky po 100 mm. Na stanici je umístěna také kamera Brinno BCC100, která slouží především ke sledování prostoru v okolí čidla CS725. Tuto kameru je však možné využít i pro odečtení výšky sněhové pokrývky ze sněhoměrné latě. Nevýhodou tohoto postupu je skutečnost, že se kamera může dočasně zapotit a znemožnit odečíst přesnou výšku sněhové pokrývky. Další nepřesnost může vzniknout samotným čtením na lati, kamera je umístěna ve velké vzdálenosti od tyče (cca 5 m) a není tedy možné odečíst srovnatelně přesnou hodnotu, jako u případného manuálního čtení přímo na místě.

Kamera Brinno BCC100 má rozměry 64 x 46 x 106 mm a váží 120g (bez baterií). Využívá asférickou skleněnou čočku, kterou lze otočit o 120°. Úhel záběru je 140°. Kamera je opatřena vodotěsným krytem odolným vůči povětrnostním vlivům. Kamera zaznamenává časosběrné video nebo pořizuje fotografie s rozlišením 1280 x 720 případně 640 x 480. (Brinno Inc. nedatováno)

3.6.5 Manuální měření výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu

Manuální měření výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu probíhá na lokalitě Tomšovka, Nová Louka a dalších lokalitách ČHMÚ (viz kapitola 3.5.4). Na lokalitě Tomšovka toto měření provádí místní pozorovatelka ČVUT v Praze Ing. Alena Kulasová a probíhá v nepravidelných intervalech, přibližně po 14 dnech, v závislosti na dostupnosti území. Vodní hodnota sněhu je získána odebráním vzorku sněhu tubusem o průměru 5,7 cm. Vzorek sněhu se nechá roztát. Vodní hodnotu sněhu lze vypočíst vydělením objemu vody plochou tubusu.

Na lokalitě Nová Louka je toto měření v režii ČHMÚ. Na lokalitách Kristiánov - les, Kristiánov - mýtina, Hřebínek - les, Hřebínek - mýtina jsou měření prováděna pečlivěji, než na ostatních uvedených ČHMÚ lokalitách. *SCE* je na těchto lokalitách měřeno 10x a *SWE* 3x, tyto hodnoty se poté přepočtou na hustotu sněhové pokrývky a po přenásobení průměrným *SCE* je získána hodnota průměrného *SWE* v daném profilu (Vajskebr 2020 - e-mailová komunikace).

3.6.6 Váhový srážkoměr MRW500

Na lokalitě Nová Louka je umístěn váhový srážkoměr. Jeho horní hrana je ve výšce 283 cm nad zemí. Jedná se o srážkoměr MRW500 se zachytnou plochou 500 cm². Je určen pro měření tekutých i tuhých srážek. Základem měření je tenzometrická váha, která je připojena na řídicí elektroniku a která kontinuálně vyhodnocuje měření a řídí další části srážkoměru. Srážkoměr se skládá ze dvou nádob, přenos kapalin mezi nimi je realizován pomocí čerpadel. Horní, vážená nádoba zachytává padající srážky a obsahuje nemrznoucí kapalinu, v níž se tuhé srážky rozpouštějí. Také je v ní vrstva silikonového oleje, která zabraňuje vypařování srážek. Srážkoměr má integrovaný detektor srážek, který mu umožňuje rozlišit tuhé a tekuté srážky a pomáhá tak řešit nestandardní situace. Výstupní zaručené rozlišení je 0,1 mm srážek (pracovní rozlišení je 0,01 mm srážek). Přesnost srážkoměru je $\pm 0,1$ mm srážek. (Meteoservis V.o.s. 2008)

3.6.7 Teplotní snímač PT100-XM

Jedná se o teplotní senzor Pt100 třídy A. Senzor je vodotěsně umístěn v nerezovém pouzdru a opatřen polyuretanovým kabelem o rozměrech pouhých 2 x 5 x 1 mm. Teplotní rozsah je -50 °C až 120 °C. Maximální chyba snímače závisí na teplotě vzduchu. (FIEDLER AMS s.r.o. 2017a) Snímač je umístěn na lokalitě Nová Louka ve výšce 380 cm nad zemí. Je opatřen radiálním krytem.

3.6.8 Čidla CS650

Na lokalitě Nová Louka se od podzimu 2019 nachází také čtyři čidla CS650, která jsou umístěna v hloubkách 10, 20, 30 a 45 cm pod povrchem země.

Každé čidlo se skládá ze dvou 30 cm hrotů z nerezové oceli, které jsou připojené ke hlavici sondy. Hlavice sondy je o rozměrech 85 x 63 x 18 mm a je propojena s registrační jednotkou. Čidlo měří dobu šíření signálu, útlum signálu a teplotu. Z těchto veličin je pak vypočítána dielektrická permitivita, objemová půdní vlhkost a objemová elektrická vodivost. (Campbell Scientific, Inc. 2018)

Rozsah získané objemové půdní vlhkosti je 0 - 100 %. Přesnost měření objemové půdní vlhkosti udávaná výrobcem je ± 1 % při kalibraci (specifické pro půdu) na místě měření a ± 3 % při továrním nastavení. (Campbell Scientific, Inc. 2018)

3.7 Výpočet SWE

Jak již bylo uvedeno výše, čidlo CS725 měří vodní hodnotu sněhu. Detekuje gama záření, které potom pomocí rovnice přepočítá na vodní hodnotu sněhu. Počet těchto elektromagnetických záření se zaznamená za určitý čas a hodnota SWE se vypočte pomocí rovnice (Choquette et al. 2010):

$$SWE = \left(\frac{-1}{\beta}\right) * \ln \left[(N) * \left(\frac{(1+1,11*SSM)}{N_0}\right) \right] - (0,001165 * H) \quad , \quad (4)$$

kde:

SWE ... vodní hodnota sněhu (cm)

β ... útlumový koeficient (cm^{-1})

N ...počet detekovaných elektromagnetických záření za určitý čas (6h^{-1})

N_0 ...počet detekovaných elektromagnetických záření vyzařovaný zcela suchou půdou a bez sněhové pokrývky za určitý čas (6h^{-1})

SSM ... nasycená půdní vlhkost (-)

H ...výška sensoru nad půdním povrchem (cm)

Takto lze tedy získat hodnotu SWE_K pro β_K , N_K , N_{0K} a SWE_{TL} pro β_{TL} , N_{TL} , N_{0TL} .

Porovnáním hodnot SWE_K a SWE_{TL} je získána rovnice pro SWE_{ratio} :

$$SWE_{ratio} = \left(\frac{1}{\beta_K - \beta_{TL}}\right) * \ln \left(\frac{N_{TL} * N_K}{N_{0TL} * N_{0K}}\right) \quad , \quad (5)$$

kde:

SWE_{ratio} ... vodní hodnota sněhu (cm)

β_K ... lineární útlumový koeficient pro izotop ^{40}K (cm^{-1})

β_{TL} ... lineární útlumový koeficient pro izotop ^{208}Tl (cm^{-1})

N_K ...počet detekovaných elektromagnetických záření izotopu ^{40}K za určitý čas (6h^{-1})

N_{0K} ...počet detekovaných elektromagnetických záření izotopu ^{40}K vyzařovaných zcela suchou půdou a bez sněhové pokrývky za určitý čas (6h^{-1})

N_{TL} ...počet detekovaných elektromagnetických záření izotopu ^{208}Tl za určitý čas (6h^{-1})

N_{0TL} ...počet detekovaných elektromagnetických záření izotopu ^{208}Tl vyzařovaný zcela suchou půdou a bez sněhové pokrývky za určitý čas (6h^{-1})

Takto získaná hodnota není závislá na vlhkosti půdy. Není ale tak přesná, jako hodnoty vypočtené pomocí rovnice (4). Využívá se hlavně jako prahová hodnota, po jejímž překročení je proveden běžný výpočet vodní hodnoty sněhu. Výchozí hodnota je stanovena na 5 mm (Campbell Scientific, Inc. 2012). To znamená, že při vypočtení hodnoty $SWE_{ratio} > 5$ mm by čidlo předpokládalo výskyt sněhové pokrývky a hodnoty SWE_K a SWE_{TI} by se spočítaly běžným způsobem. Pokud by ale vyšla hodnota $SWE_{ratio} < 5$ mm, vodní hodnota by se stanovila jako $SWE = 0$ mm a čidlo by vypočítalo pouze vlhkost půdy. Tato hodnota je nicméně, stejně jako SSM a N_0 , specifická pro každou lokalitu a musí být proto správně stanovena kalibrací na místě měření (Choquette et al. 2013; Campbell Scientific, Inc. 2012). Znalost a nastavení správné prahové hodnoty pomáhá zamezit záměně sněhové pokrývky s kaluží vody (Choquette et al. 2013).

3.8 Výpočet SM

Vztah pro výpočet půdní vlhkosti vychází z rovnice pro výpočet vodní hodnoty sněhu. V létě nebo v období bez sněhu je hodnota SWE rovna 0 mm, útlumový koeficient β lze tedy nastavit jako konstantní hodnotu a půdní vlhkost lze spočítat na základě relativně jednoduché rovnice (Choquette et al. 2013):

$$SM = \left(\frac{N_0}{1,11 * N} \right) - \left(\frac{1}{1,11} \right) \quad , \quad (6)$$

kde:

SM ... půdní vlhkost (-)

N ...počet detekovaných elektromagnetických záření za určitý čas ($6h^{-1}$)

N_0 ...počet detekovaných elektromagnetických záření vyzařovaný zcela suchou půdou a bez sněhové pokrývky za určitý čas ($6h^{-1}$)

Hodnotu SM vypočítá čidlo dle tohoto vzorce v případě, že SWE vyhodnotí jako 0 mm. Při výskytu sněhové pokrývky se hodnota SM rovná SSM (Choquette et al. 2013).

4. Výsledky

4.1 Dostupná data

Analýza čidla CS725 byla provedena porovnáním čidla s měřeními pomocí jiných senzorů a metod. V následující tabulce jsou uvedeny přístroje, které byly využity s uvedením dostupnosti dat a jejich umístění. Hlavními sledovanými lokalitami jsou Nová Louka a lokalita Tomšovka. Pro porovnání hodnot *SWE* a *SCE* byla také využita data ČHMÚ z lokalit Hřebínek, Kristiánov a Bedřichov, které se nachází v blízkém okolí lokality Nová Louka.

Tabulka 4 Dostupnost dat jednotlivých měření

Měřená veličina	Čidlo	Dostupnost dat		Lokalita
Srážky	ultrazvukový hladinoměr sněhoměrná lať	06.12.2018	27.03.2020	Nová Louka
		20.03.2019	06.05.2019	Nová Louka
		21.10.2019	23.04.2020	
	manuální měření	01.11.2018	12.04.2020	Tomšovka
		01.11.2018	18.03.2020	Nová Louka
		01.11.2018	06.04.2020	Hřebínek, les
		01.11.2018	06.04.2020	Hřebínek, mýtina
		01.11.2018	06.04.2020	Kristiánov, les
		01.11.2018	06.04.2020	Kristiánov, mýtina
		01.11.2018	06.04.2020	Bedřichov
váhový srážkoměr	01.11.2018	26.04.2020	Nová Louka	
Vodní hodnota sněhu	váhový sněhoměr	04.12.2018	19.09.2019	Tomšovka
	manuální měření	01.11.2018	12.04.2020	Tomšovka
		01.11.2018	18.03.2020	Nová Louka
		01.11.2018	06.04.2020	Hřebínek, les
		01.11.2018	06.04.2020	Hřebínek, mýtina
		01.11.2018	06.04.2020	Kristiánov, les
		01.11.2018	06.04.2020	Kristiánov, mýtina
		01.11.2018	06.04.2020	Bedřichov
CS725	22.10.2018	23.04.2020	Nová Louka	
Teplota vzduchu	ultrazvukový hladinoměr	06.12.2018	27.03.2020	Nová Louka
	teplotní snímač	01.12.2018	27.03.2020	Nová Louka
Půdní vlhkost	CS725	22.10.2018	23.04.2020	Nová Louka
	Čidla CS650	01.10.2019	27.03.2020	Nová Louka

4.2 Provedené analýzy

4.2.1 Vztah mezi vyzařovaným signálem a vodní hodnotou sněhu

Měření vodní hodnoty sněhu pomocí čidla CS725 vychází z předpokladu, že existuje vztah mezi velikostí signálu N vyzařovaného prvky ^{40}K a ^{208}Tl a hodnotou SWE (resp. hmotností vody mezi zdrojem elektromagnetického záření a detektorem). Vztah mezi N a SWE je exponenciální a byl potvrzen experimentem, kdy čidlo bylo instalováno na dobu 24 h (a více) nad nádobou s vodou o přesně známé hmotnosti vody (Choquette et al. 2010). Tento vztah potvrdili také Ducharme et al. (2015), kteří provedli simulace a vztah pomocí metody nejmenších čtverců znázornili na poměru N/N_0 a SWE . Nejdříve uvažovali koeficient útlumu konstantní a platil tedy vztah (Ducharme et al. 2015):

$$N \sim e^{(-\alpha * SWE)} \quad , \quad (7)$$

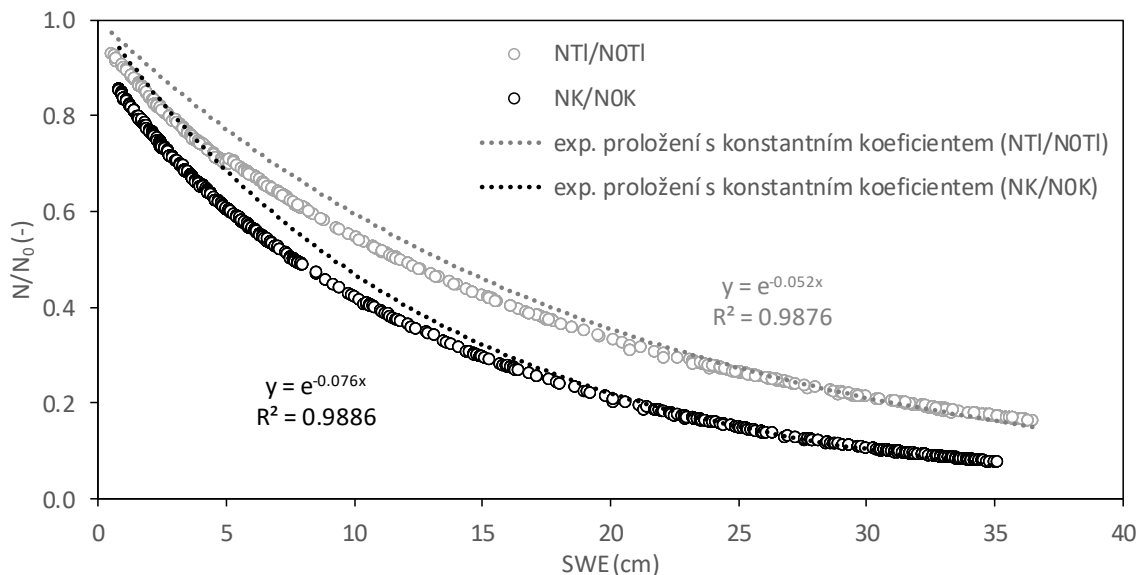
kde:

N ... počet detekovaných elektromagnetických záření za určitý čas (6h^{-1})

α ... konstantní útlumový koeficient (cm^{-1})

SWE ... vodní hodnota sněhu (cm)

Na obrázku 3 je zobrazen vztah s konstantním koeficientem mezi poměrem N/N_0 a SWE získaný čidlem na lokalitě Nová Louka.



Obrázek 3 Vztah N/N_0 a SWE na lokalitě Nová Louka s proložením exponenciální funkcí s konstantním útlumovým koeficientem

Takto získané proložení potvrzuje stejný exponenciální vztah mezi N/N_0 a SWE jako získali Durchame et al. 2015. Útlumový koeficient vychází ve stejném řádu (10^{-2}) jako konstantní koeficient získaný Durchame et al. (2015).

Tento vztah s konstantním útlumovým koeficientem se nejdříve zdál být správný, po dalších simulacích Durchame et al. (2015) ale došli k závěru, že koeficient útlumu by měl být variabilní. Navrhli proto rovnici:

$$N/N_0 = e^{(-\beta*SWE)} \quad , \quad (8)$$

kde:

N ... počet detekovaných elektromagnetických záření za určitý čas ($6h^{-1}$)

N_0 ...počet detekovaných elektromagnetických záření vyzařovaný zcela suchou půdou a bez sněhové pokrývky za určitý čas ($6h^{-1}$)

β ... variabilní útlumový koeficient - aproximovaný polynomem 6. stupně (cm^{-1})

SWE ... vodní hodnota sněhu (cm)

Z exponenciálního vztahu mezi elektromagnetickým zářením a vodní hodnotou sněhu vychází i rovnice (4), dle které čidlo hodnotu SWE počítá. Čidlo pro výpočet SWE využívá variabilního útlumového koeficientu (β), který je v dalších kapitolách popsán blíže.

Durchame et al. ve své práci tedy využívají pro aproximaci variabilního útlumového koeficientu polynom 6. stupně. Dle komunikace s Francescem Casulem z firmy Campbell Scientific, Ltd., která tato čidla prodává a který je v kontaktu s výrobcem, je v čidle pro variabilní útlumový koeficient využívána aproximace polynomem 5. stupně (Casule 2020 - e-mailová komunikace). Obě tyto aproximace jsou v následující kapitole ukázány (viz obrázky 5 a 6) a porovnány.

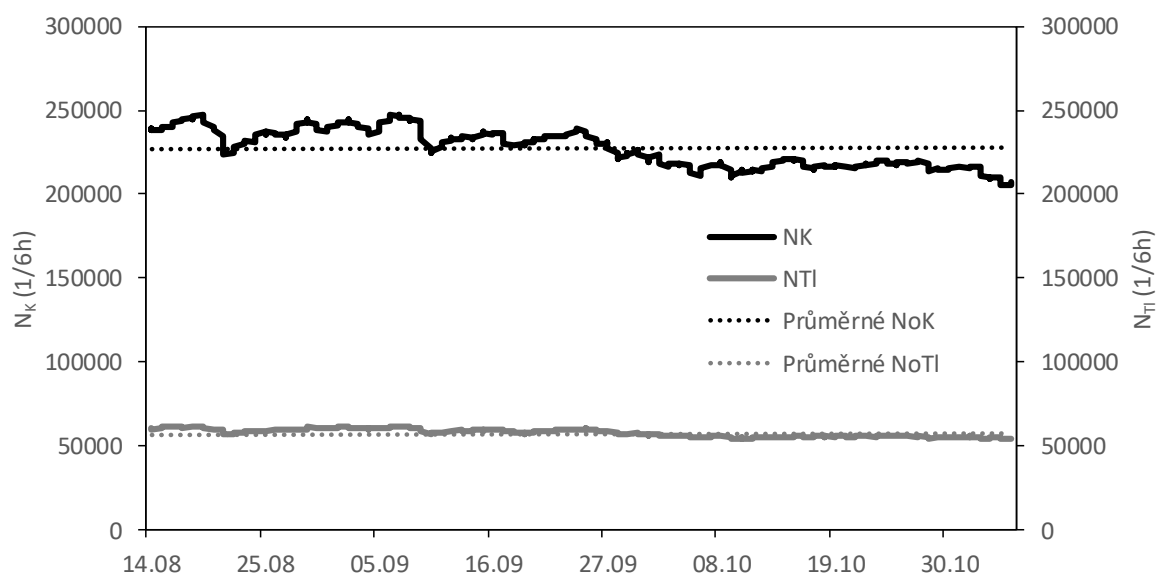
4.2.2 Analýza doporučeného postupu určení SWE

Sensor CS725 přepočítává vodní hodnotu sněhu z detekovaných elektromagnetických záření nakumulovaných za určitý čas. Pro zjištění, jak čidlo vlastně pracuje, byl proveden kontrolní přepočet rovnice (4). Následující text se zabývá stanovením jednotlivých členů rovnice.

Výška čidla byla zadána pro výpočet dle skutečného stavu 353 cm.

N_0 je signál vyzařovaný půdou definované vlhkosti v období bez sněhové pokrývky za určitý čas, v tomto případě za 6 hodin. Ten je na začátku instalace čidla zjištěn a nastaven

na konstantní hodnotu. Hodnota N_0 by měla být stanovena nejlépe v letním období, kdy je hodnota SWE rovna 0 mm. V takovém případě lze vypočítat hodnotu z rovnice (4). Protože stanovení této hodnoty závisí na hodnotě β , která dosud nebyla známa, nebyl tento postup proveden. V této práci byla uvažována průměrná hodnota N v období bez sněhové pokrývky. Tato hodnota byla stanovena jako $N_{OK} = 225\,000\,6\text{h}^{-1}$ a $N_{OTI} = 55\,000\,6\text{h}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou znázorněné na obrázku 4.



Obrázek 4 Hodnoty N_{OK} a N_{OTI} měřené čidlem CS725 v období bez sněhové pokrývky v roce 2019 na lokalitě Nová Louka

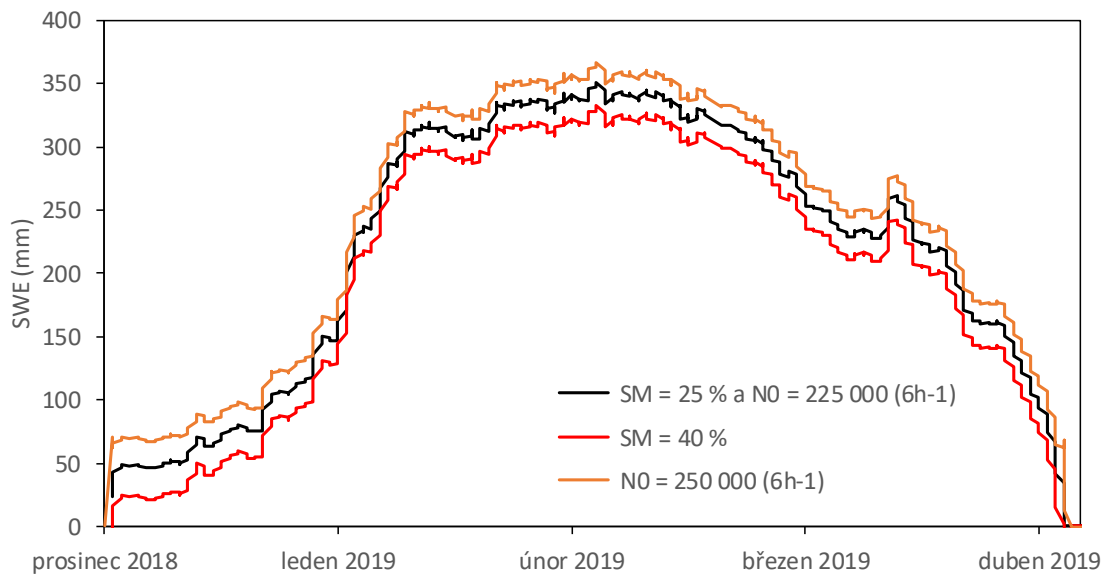
Dalším potřebným parametrem v rovnici je SSM . Hodnota nasycené půdní vlhkosti byla po instalaci čidla stanovena jako 25 %. V našem případě byla hodnota zadána jako poměr hmotnosti vody obsažené ve vzorku a hmotnosti suchého vzorku.

Tabulka 5 Hodnoty hmotnostního útlumového koeficientu pro energetická okna 1,46 MeV a 2,61 MeV u vybraných materiálů (převzato z Ducharme et al. 2015)

Materiál	1.46 MeV (cm^2/g)	2.61 MeV (cm^2/g)
hliník	5.07×10^{-2}	3.38×10^{-2}
voda	5.85×10^{-2}	4.34×10^{-2}
půda	5.27×10^{-2}	3.94×10^{-2}
vzduch	5.27×10^{-2}	3.94×10^{-2}

Správné stanovení hodnot SSM a N_0 je důležité pro zjištění odpovídajících hodnot SWE . Pokud jsou tyto členy špatně nastaveny, mohou hodnoty SWE vycházet až o desítky milimetrů špatně. Pro znázornění důležitosti určení správných hodnot SSM a N_0 jsou zobrazeny na obrázku 5 hodnoty SWE_K za zimní období 2018/2019 pro různé hodnoty SSM

a N_0 . Je zvolena předem odhadnutá (tedy čidlem uvažovaná) hodnota $SSM = 25 \%$ a $N_0 = 225\,000\,6h^{-1}$. Pro porovnání je pak zvolena hodnota $SSM = 40 \%$ a $N_0 = 250\,000\,6h^{-1}$.



Obrázek 5 Vliv hodnoty SM a N_0 na výslednou hodnotu SWE_K zobrazený na průběhu SWE v zimě 2018/2019 na lokalitě Nová Louka

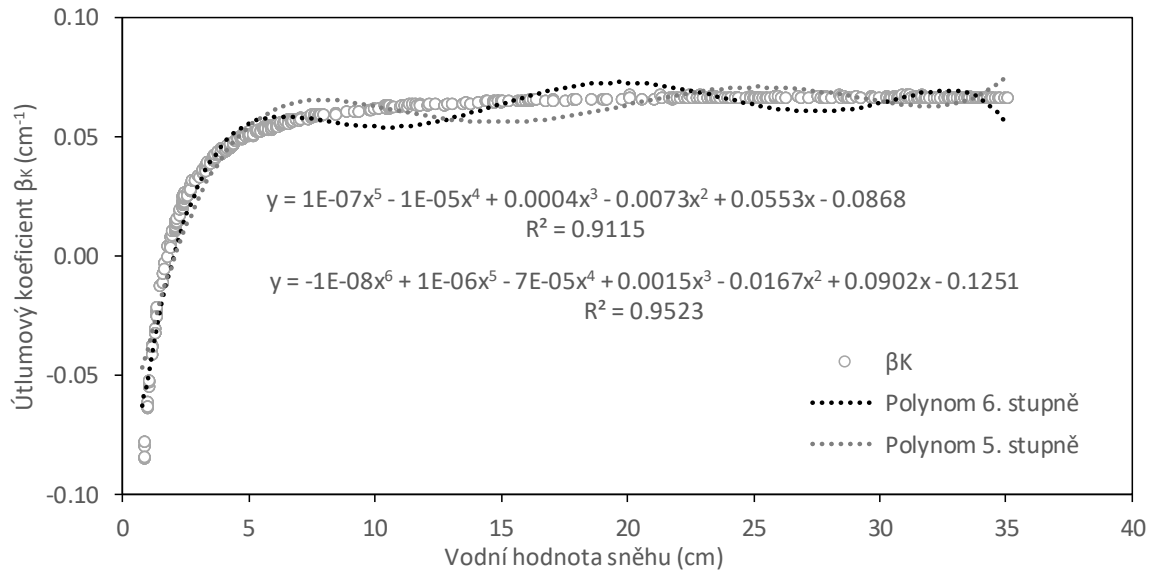
Vodní hodnoty sněhu v případě nadhodnocení SSM vycházejí nižší, v případě špatně zvolené hodnoty SM o 15 % je rozdíl hodnot SWE kolem 20 mm SWE_K . V případě nadhodnocení N_0 naopak dochází i k nadhodnocování SWE_K . Při rozdílu hodnot N_0 o 25 000 registrovaných záblesků za 6h to pak činí přibližně také 20 mm SWE_K .

Dále je pro výpočet SWE , dle rovnice (4), nutné znát hodnotu variabilního útlumového koeficientu β . Koeficient β je lineární útlumový koeficient vody, který je počítán na základě SWE . Koeficient β se stanovuje experimentálně a pro účel analýzy rovnice pomocí numerického modelování. Při znalosti všech ostatních členů rovnice (4), je možné inverzí rovnice vypočítat hodnotu koeficientu β , kterou pak při porovnání s SWE lze proložit polynomickou křivkou (viz obrázky 6 a 7).

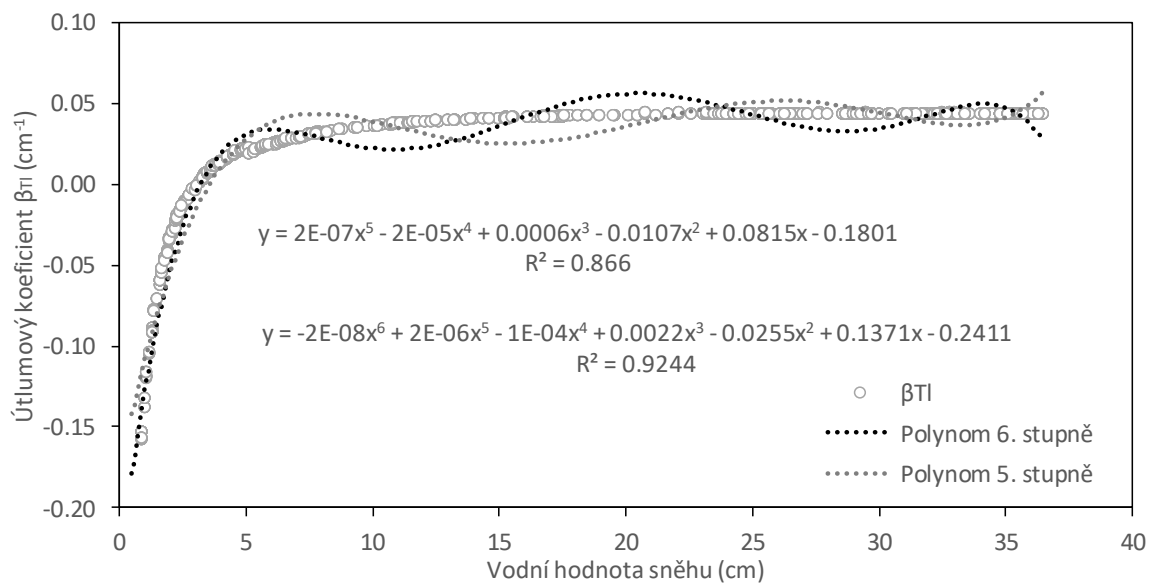
Hodnota β je tedy číslo vypočítané z vodní hodnoty sněhu pomocí polynomické rovnice. Hodnota vypočtená z polynomické rovnice a hodnota vypočtená z rovnice (4) by se měly rovnat. Poté je pomocí minimalizace odchylky obou β možné vypočíst hodnotu SWE .

Pro zajištění správné vodní hodnoty sněhu (jednoznačnosti výše uvedené inverzní úlohy) je nutné pro tento výpočet zadat správnou počáteční hodnotu SWE . Počáteční hodnota SWE by měla být blízká vypočtené hodnotě SWE (Casule 2020 - e-mailová komunikace).

Ducharme et al. (2015) proto využívají k výpočtu SWE hodnotu SWE z předchozího časového kroku. Pokud je počáteční hodnota příliš vzdálená od optimální hodnoty, koeficient konverguje mimo oblast skutečné hodnoty SWE (Casule 2020 - e-mailová komunikace).



Obrázek 6 Porovnání vyjádření lineárního útlumového koeficientu β_K polynomicou rovnicí 5. a 6. stupně, ukázka provedena na datech v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020



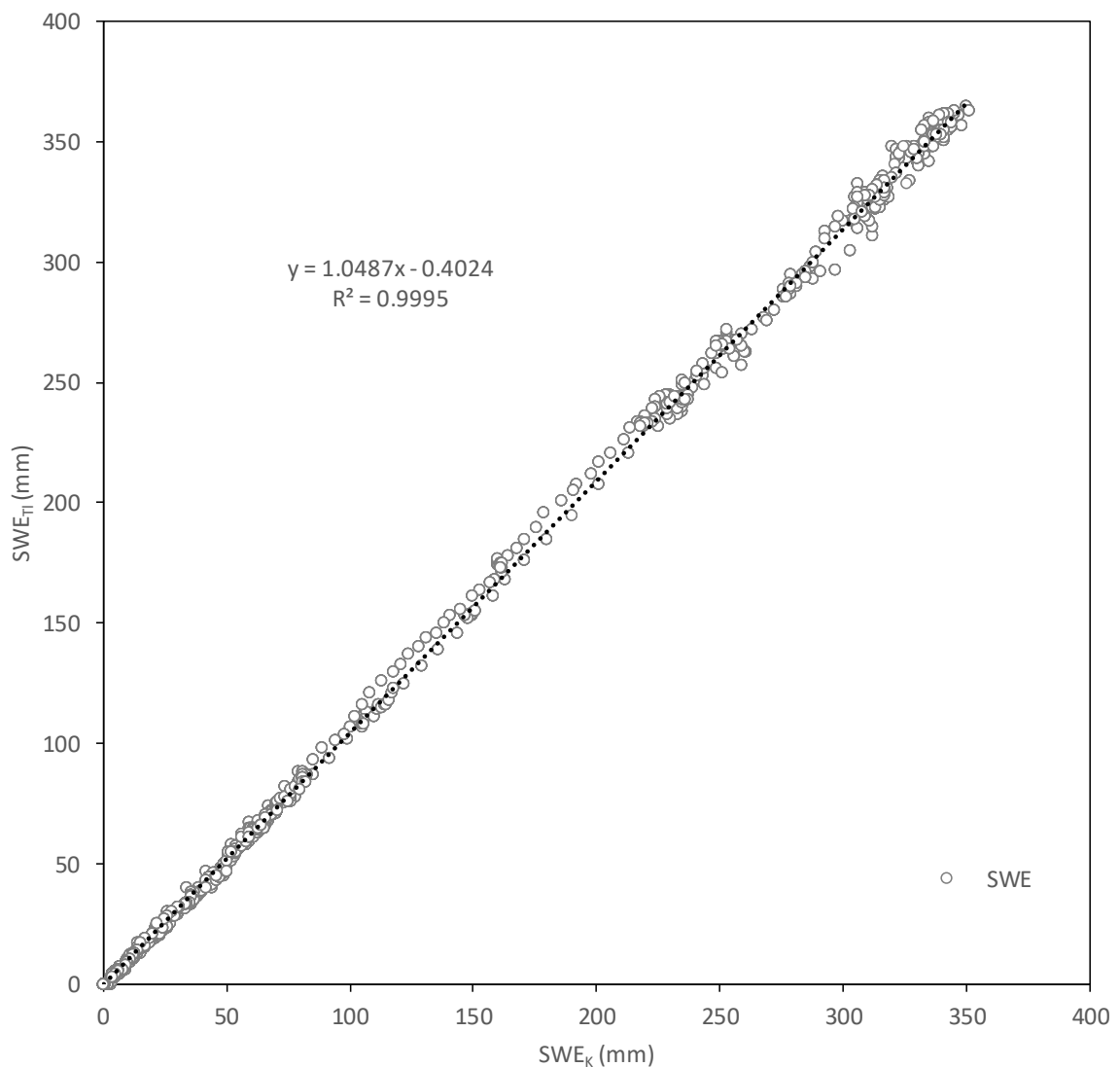
Obrázek 7 Porovnání vyjádření lineárního útlumového koeficientu β_{TI} polynomicou rovnicí 5. a 6. stupně, ukázka provedena na datech v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020

Na obrázcích 6 a 7 je vidět, že proložení polynomicou rovnicí 6. stupně odpovídá vyšší koeficient determinace a mohlo by se tedy zdát, že je pro proložení dat výhodnější. Polynom 6. stupně je ovšem citlivější na počáteční hodnotu a tedy při špatně zvolené (vzdálené) počáteční hodnotě může vést k dosažení horších výsledků, než při proložení

polynomem 5. stupně. To může být důvod, proč je polynom 5. stupně použit výrobcem ve firmwaru přístroje.

4.2.3 Draslík vs. thalium

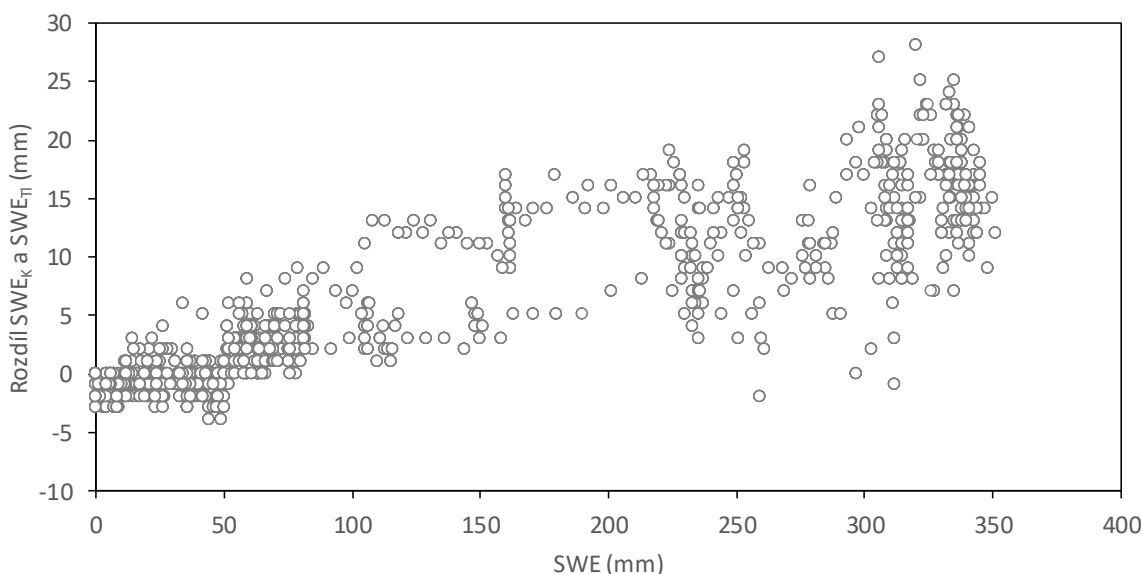
Protože sensor CS725 využívá jako zdroj detekovaného záření dva prvky, a to draslík-40 a thalium-208, jsou jeho výstupem také dvě vodní hodnoty sněhu. V ideálním případě by se měly tyto dvě hodnoty rovnat.



Obrázek 8 Regresní vztah vypočtených hodnot SWE_{Tl} a SWE_K na lokalitě Nová Louka v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020.

Na obrázku 8 jsou hodnoty SWE_K a SWE_{Tl} porovnány. Je vidět silná lineární závislost, koeficient determinace je $R^2 = 0,99$.

Nicméně je zřejmé, že hodnoty SWE_K a SWE_{TI} se od sebe liší. Odchylky se pohybují do 30 mm v závislosti na aktuální hodnotě SWE . Rozdíly hodnot jsou velmi variabilní, ale na obrázku 9 je vidět, že při vyšších hodnotách dochází také k vyšším rozdílům mezi SWE_K a SWE_{TI} . Převážně je dosaženo vyšších hodnot SWE při hodnocení detekovaného záření z thalia-208 (viz sklon regresní přímky na obrázku 8). V některých případech, a to hlavně při nízkých hodnotách SWE , převažují SWE_{TI} nižší než SWE_K - na obrázku 9 lze také vidět záporné hodnoty rozdílu SWE_K a SWE_{TI} .



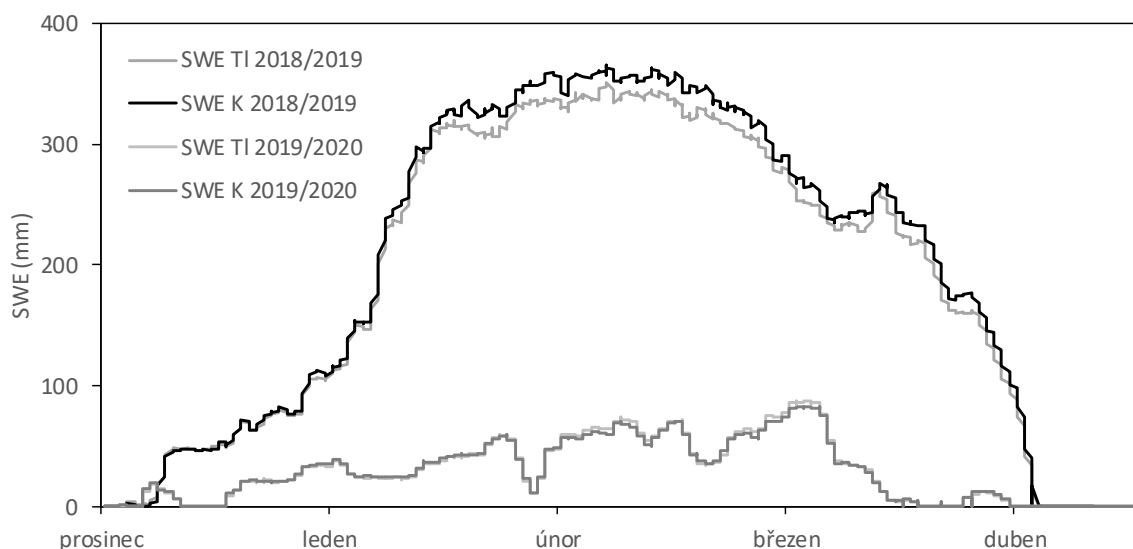
Obrázek 9 Vztah mezi hodnotou SWE a rozdílu mezi SWE_K a SWE_{TI} na lokalitě Nová Louka v zimních obdobích 2018-2019 a 2019/2020

Rozdílný charakter průběhu SWE_K a SWE_{TI} , tj. proměnlivější reakce SWE_{TI} , je způsoben tím, že množství registrovaných elektromagnetických záblesků je přibližně 4 krát nižší než hodnoty N_K .

4.2.4 Porovnání zimních období 2018/2019 a 2019/2020

Zimní období 2018/2019 a 2019/2020 jsou velmi rozdílná. Zatímco zima 2018/2019 měla jeden hlavní vrchol SWE , zima 2019/2020 měla vrcholů SWE hned několik, které nabývaly ale mnohem nižších maximálních hodnot. V zimě 2018/2019 byla maximální vodní hodnota sněhu (průměr maximálních hodnot SWE_K a SWE_{TI}) 358 mm, v zimě 2019/2020 to bylo pouze 85,5 mm.

Průběh vodní hodnoty sněhu za sledovaná období je znázorněn na obrázku 10. Sněhová pokrývka v obou obdobích ležela na území přibližně stejnou dobu, a to od začátku prosince do začátku dubna (obrázek 10 a 11).



Obrázek 10 Průběh vodní hodnoty sněhu v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020 měřené čidlem CS725 na lokalitě Nová Louka

Zimní období 2018/2019 bylo bohaté na srážky a časté byly teploty pod bodem mrazu. V zimním období 2018/2019 napadlo v období se sněhovou pokrývkou, tedy přibližně od začátku prosince do konce března, celkem 623,4 mm srážek, kdežto za stejné období v zimě 2019/2020 napadlo pouze 378,2 mm srážek. Průměrné měsíční teploty v měsících prosinec až březen jsou zobrazeny v tabulce 6. Zimní období 2019/2020 má průměrné teploty vyšší, než zimní období 2018/2019. Tomu odpovídá nižší vodní hodnota sněhu a výška sněhové pokrývky.

Tabulka 6 Průměrné měsíční teploty na lokalitě Nová Louka od prosince do března v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020

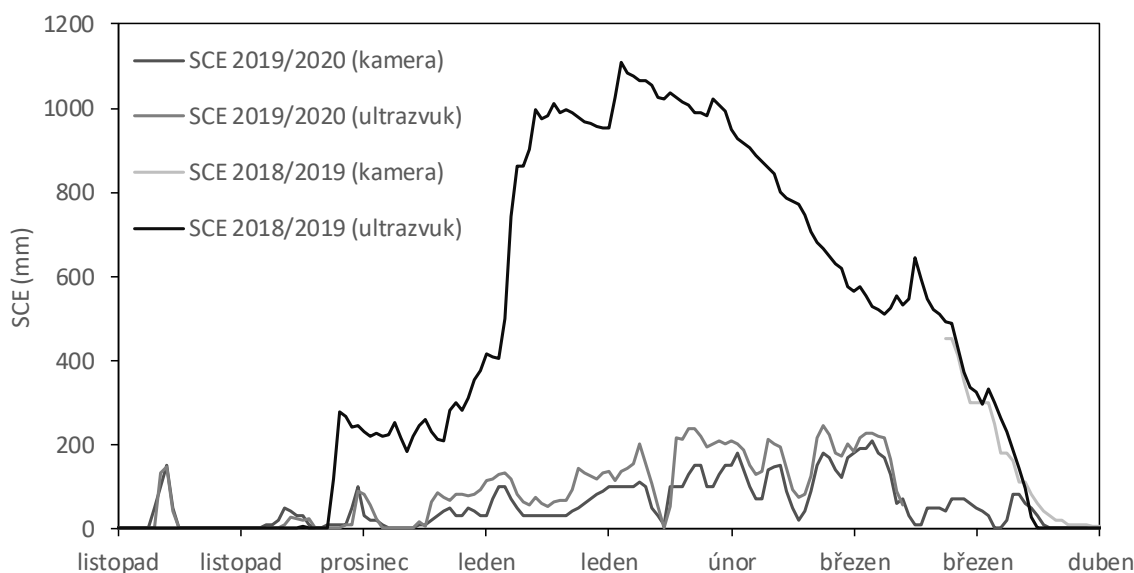
měsíc	zima 2018/2019	zima 2019/2020
prosinec	-2.24 °C	-0.54 °C
leden	-5.79 °C	-2.00 °C
únor	-1.58 °C	0.37 °C
březen	0.88 °C	0.41 °C

4.2.5 Výška sněhové pokrývky a její hustota

Díky instalované kameře bylo možné odečíst výšku sněhové pokrývky na sněhoměrné lati instalované na Nové Louce. Ta byla porovnána s výškou sněhové pokrývky zaznamenanou ultrazvukovým čidlem. Také byla spočtena hustota sněhu získaná z těchto dvou výšek sněhové pokrývky a z vodní hustoty sněhu SWE_K .

Obě měření se nachází v rámci plochy měřené čidlem a mohou tedy být relevantní pro porovnání s vodní hodnotou sněhu změřenou čidlem a pro výpočet hustoty sněhu. Zároveň jsou svým způsobem náhledem skutečné prostorové variability výšky sněhové pokrývky.

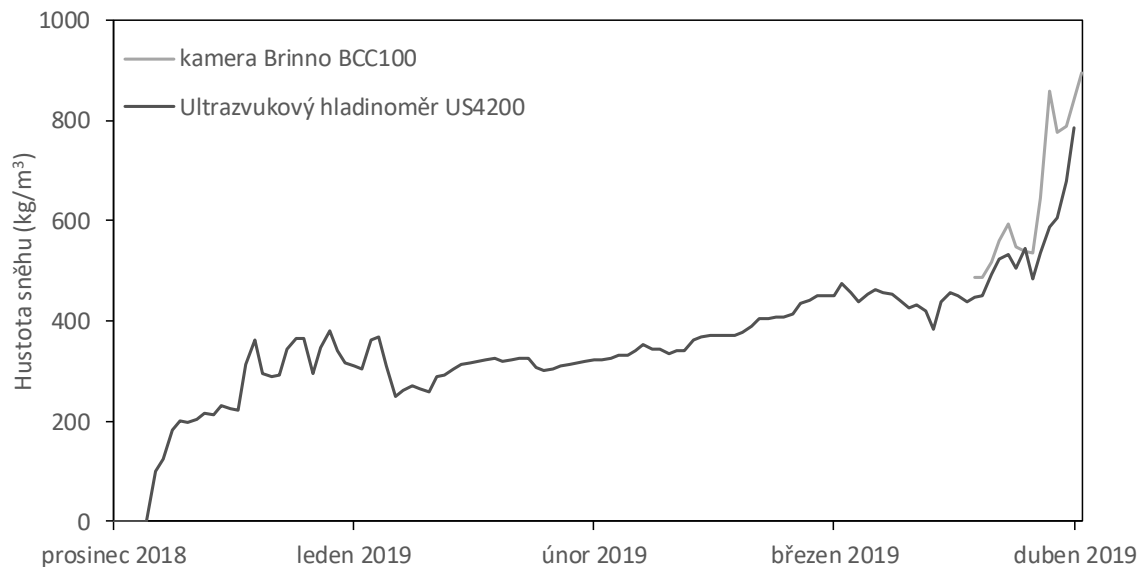
Na obrázku 11 jsou zobrazeny výšky sněhové pokrývky získané pomocí odečtu latě z videa a z ultrazvukového hladinoměru měřené na Nové Louce v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020. Kamerový záznam je dostupný až od března 2019. Průběh výšky sněhové pokrývky je podobný průběhu vodní hodnoty sněhu v obou obdobích (viz obrázek 10). Rozdíly ve výškách sněhové pokrývky jsou způsobeny velkou prostorovou variabilitou sněhu, která je díky otevřenému stanovišti na Nové Louce výrazná. Dalším důvodem rozdílů výšek sněhové pokrývky může být také nepřesné odečtení latě z důvodu čtení z kamerového záznamu.



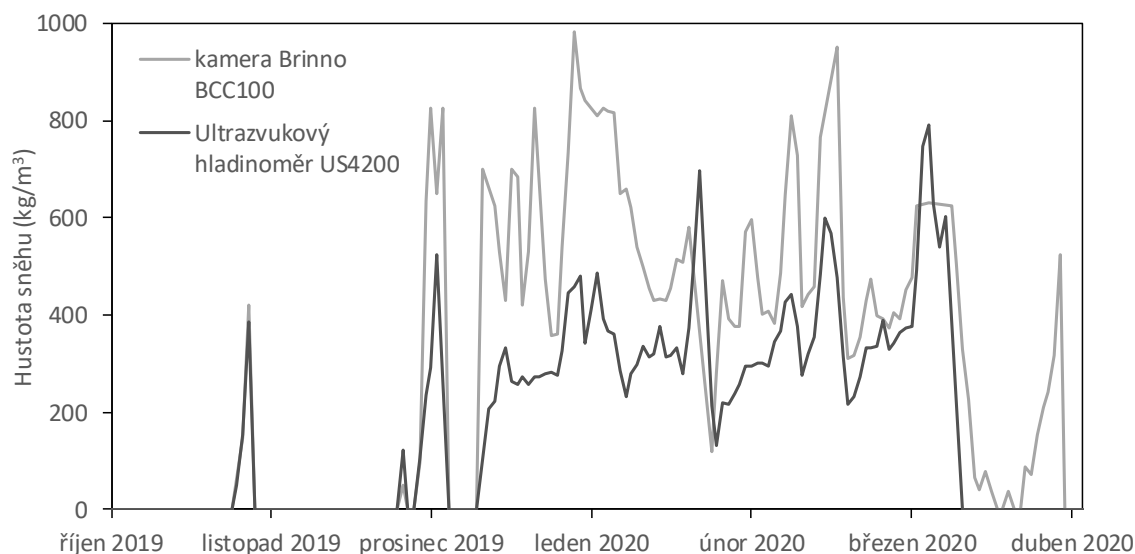
Obrázek 11 Výšky sněhové pokrývky na lokalitě Nová Louka v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020 získané odečtením z latě z kamerového záznamu a ultrazvukovým hladinoměrem

Hustota sněhové pokrývky se ve zkoumaných zimních obdobích i během samotných sezon výrazně liší a odvíjí se od charakteristiky jednotlivých období. V zimě 2018/2019, kdy měla zima jeden hlavní vrchol vodní hodnoty sněhu, se hustota sněhu zvyšovala postupně, a to až do období tání, kdy dochází k také k největšímu ulehání sněhu (viz obrázek 12) a hustota sněhu nabývala maximální hodnoty $790 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Oproti tomu v zimě 2019/2020, kdy se během zimy vystřídalo více období nárůstu sněhové pokrývky a tání, docházelo k výkyvům v hustotě po celou zimní sezonu nerovnoměrně (viz obrázek 13). Nicméně i zde je patrná maximální hustota sněhu před jeho roztátím. Nadhodnocené hustoty sněhu vypočtené z výšky sněhové pokrývky odečtené z kamerového záznamu na lati jsou způsobeny nižší

výškou sněhové pokrývky u sněhoměrné tyče. Tato výška pravděpodobně není reprezentativní pro vodní hodnotu sněhu získanou čidlem.



Obrázek 12 Hustota sněhu v zimním období 2019/2020 na lokalitě Nová Louka



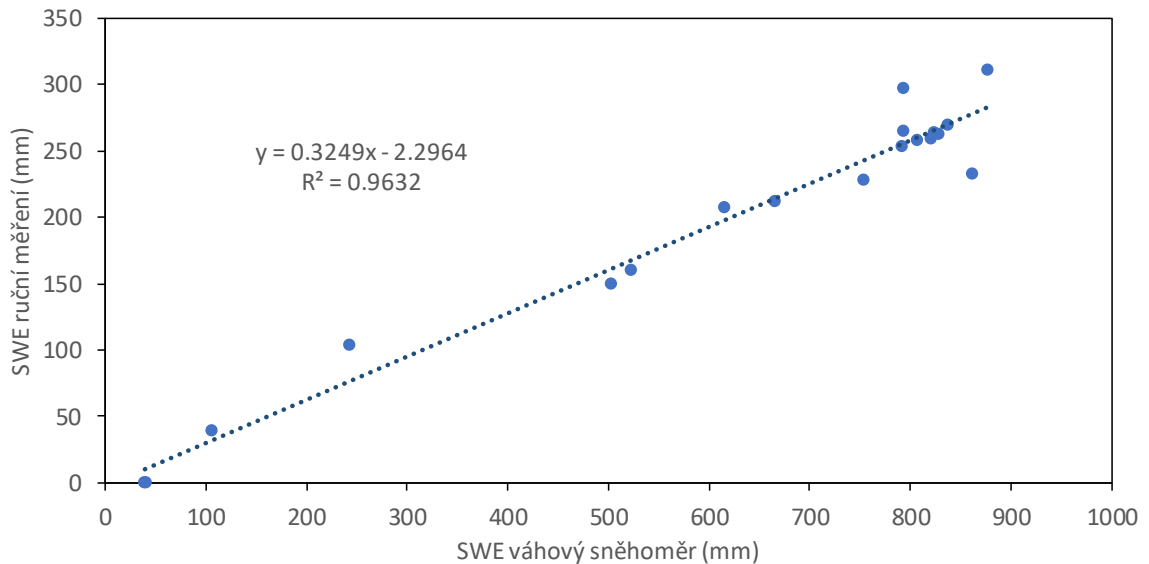
Obrázek 13 Hustota sněhu v zimním období 2019/2020 na lokalitě Nová Louka

4.2.6 Porovnání dat z CS725 na Nové Louce a dat z ostatních lokalit

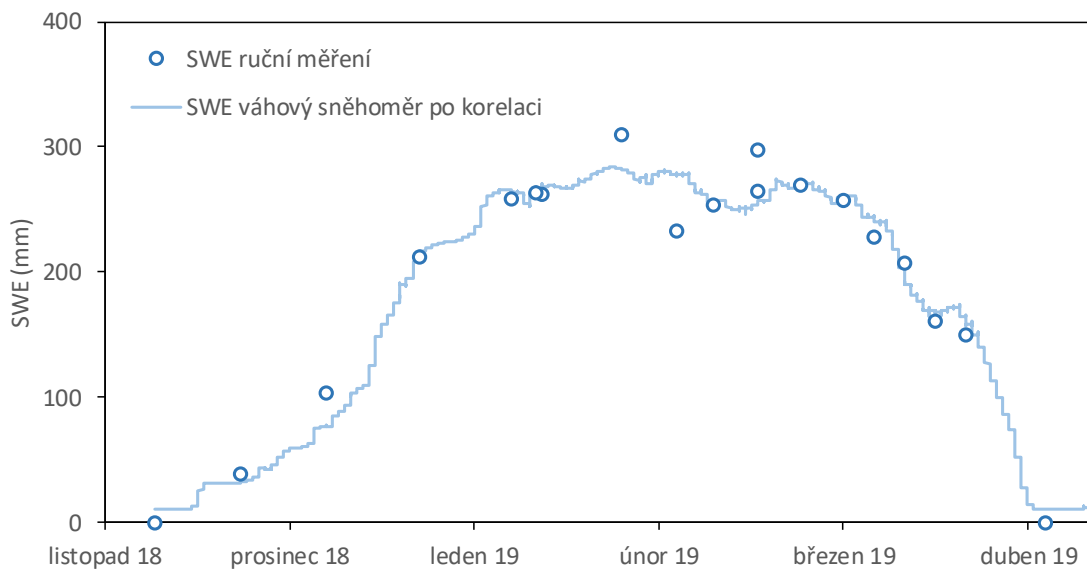
4.2.6.1 Oprava dat měření váhového sněhoměru Tomšovka

Pro možnost porovnání stanice Nová Louka a Tomšovka bylo nutné rekonstruovat data z váhového sněhoměru na lokalitě Tomšovka. U váhového sněhoměru došlo k výpadku měření v zimním období 2018/2019. Po celou zimu bylo funkční pouze jedno váhové čidlo (číslo 3), ostatní dvě nefungovala v době největších výšek sněhové pokrývky v období od 13.1. 2019 do 9.4. 2019. Tato data byla rekonstruována na základě dat ze zimních období

2016/2017 a 2014/2015. V těchto letech byl patrný silný korelační vztah mezi čidly 2 a 3 a 1 a 3. Proto bylo předpokládáno, že podobný vztah platí i v případě zimy 2018/2019. Čidla 1 a 3 bylo tedy možné doplnit pomocí korelace z dnů, kdy byla čidla všechna funkční.



Obrázek 14 Vztah mezi ručním měřením SWE a měřením SWE váhovým sněhoměrem v zimním období 2018/2019



Obrázek 15 Proložení dat z váhového sněhoměru pomocí lineární regrese do ručního měření v zimním období 2018/2019

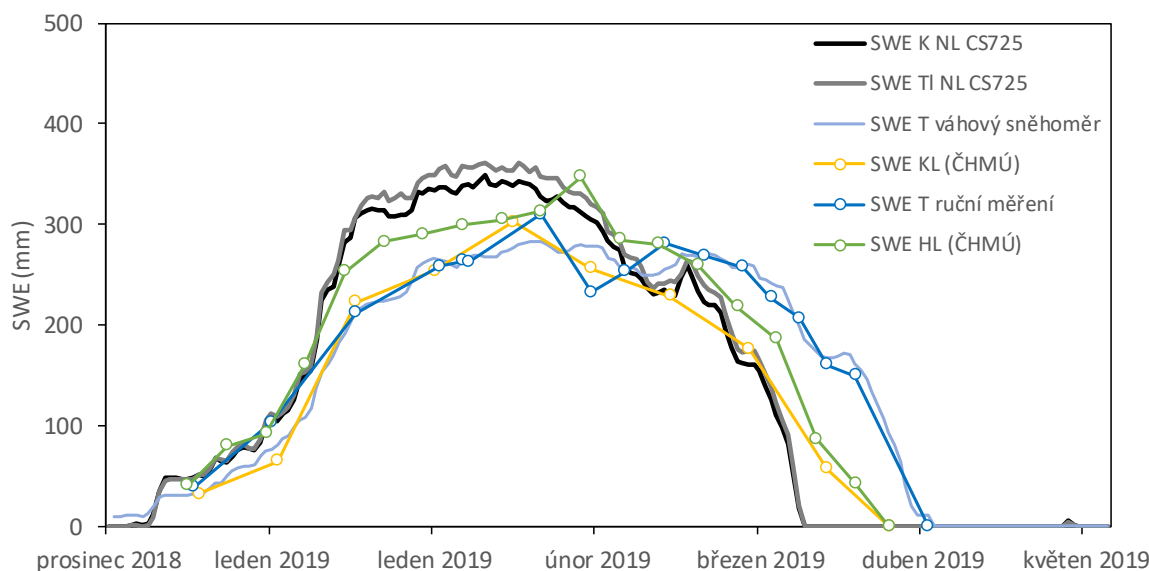
Následně byla data z váhového sněhoměru lineární regrese (viz obrázek 14) proložena do ručního měření. Měření váhového sněhoměru je po této úpravě vynucené výpadky čidel nutno chápat pouze jako interpolaci sporadicky měřených ručních měření (viz obrázek 15).

4.2.6.2 Porovnání dat

Na následujících obrázcích 16 a 17 jsou *SWE* změřené čidlem CS725 porovnány s daty na lokalitě Tomšovka (ruční měření *SWE* i váhový sněhoměr) a s daty ČHMÚ, které měří *SWE* na lesních stanovištích Kristiánov - les, Hřebínek - les. Na obrázcích 18 a 19 jsou pak *SWE* změřené čidlem CS725 porovnány s daty ČHMÚ měřenými na otevřenějších (mýtiných) stanovištích jako jsou Kristiánov - mýtina, Hřebínek - mýtina a Bedřichov - přehrada.

Na lesních stanovištích se část tuhých srážek zachytí na stromech (intercepce sněhových srážek) (DeWalle a Rango 2008), nedopadnou tak tedy na zemský povrch a hodnota *SCE* i *SWE* bývá menší, než u otevřených stanovišť. Naopak, ke konci zimy jsou tyto lokality více stíněné a proto dochází k pomalejšímu tání sněhu.

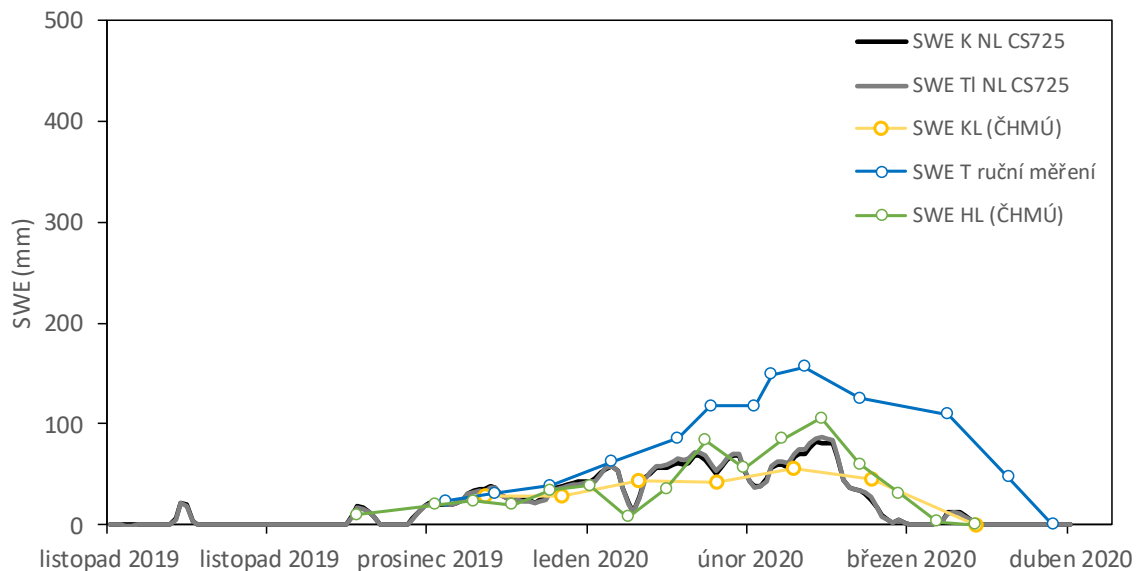
V zimním období 2018/2019 je na obrázku 16 zřejmé dosažení nižších vodních hodnot sněhu a pozdější pokles vodní hodnoty sněhu ke konci zim právě na lesních lokalitách. I když je ruční měření *SWE* na lokalitě Tomšovka prováděno na malé mýtině v mladém lese, v zimě 2018/2019 se více podobá měřením, která jsou prováděna na zalesněném stanovišti (viz obrázek 16). Dle této zimy by tedy bylo možné uvažovat o lokalitě Tomšovka jako o lesním stanovišti.



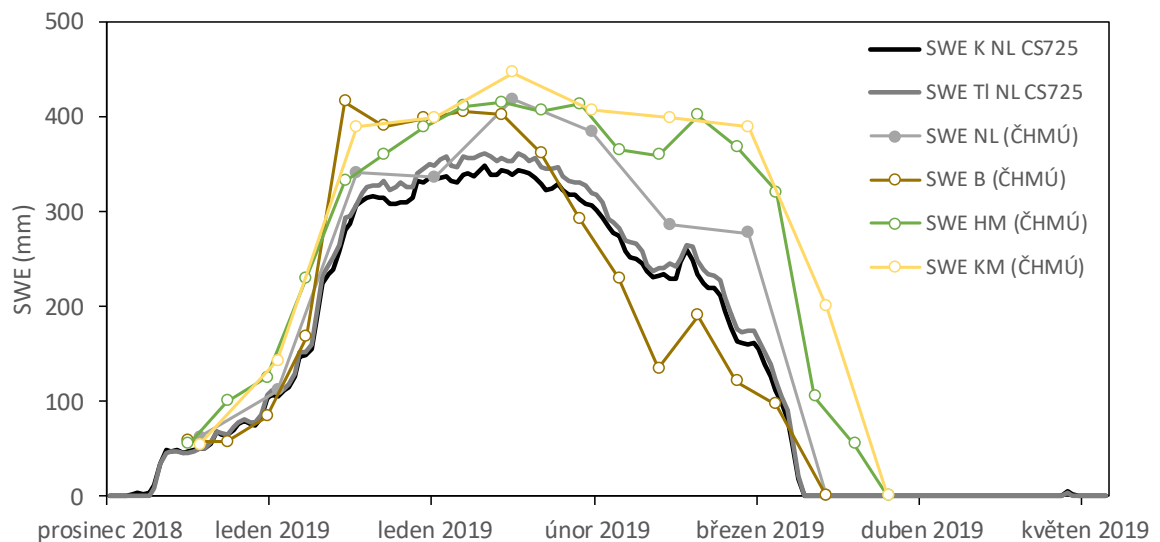
Obrázek 16 Hodnoty *SWE* na lokalitách Tomšovka, Hřebínek - les, Kristiánov - les a Nová Louka v zimním období 2018/2019

V zimě 2019/2020 se lokalita Tomšovka ale typicky jako lesní stanoviště nechovala. Na obrázku 17 je vidět velký rozdíl *SWE* mezi lokalitou Tomšovka a ostatními lokalitami. Hodnoty *SWE* na lokalitě Tomšovka jsou v této zimě mnohem vyšší než na lokalitách ostatních. Je možné, že je lokalita dobře chráněna stromy a nedocházelo tam k tak rychlému

odtávání sněhu, sněhová pokrývka se tam tedy kumulovala celé zimní období, zatímco jinde došlo k roztátí sněhu. Tento charakter není možné pozorovat u ostatních lesních lokalit, které se svým chováním podobají zimě 2018/2019. Vodní hodnota sněhu musí být tedy závislá ještě na dalších faktorech, jako je expozice a sklon lokality a její nadmořská výška.



Obrázek 17 Hodnoty SWE na lokalitách Tomšovka, Hřebínek - les, Kristiánov - les a Nová Louka v zimním období 2019/2020



Obrázek 18 Hodnoty SWE na lokalitách Bedřichov - přehrada, Hřebínek - mýtina, Kristiánov - mýtina a Nová Louka v zimním období 2018/2019

Na lokalitě Nová Louka, kde jsou vodní hodnoty sněhu získané nezávisle a navíc na jiném místě (viz obrázek 18), jsou vidět vyšší hodnoty SWE získané ručním měřením ČHMÚ, než je tomu u hodnot získaných čidlem. To je pravděpodobně způsobeno variabilitou výšky

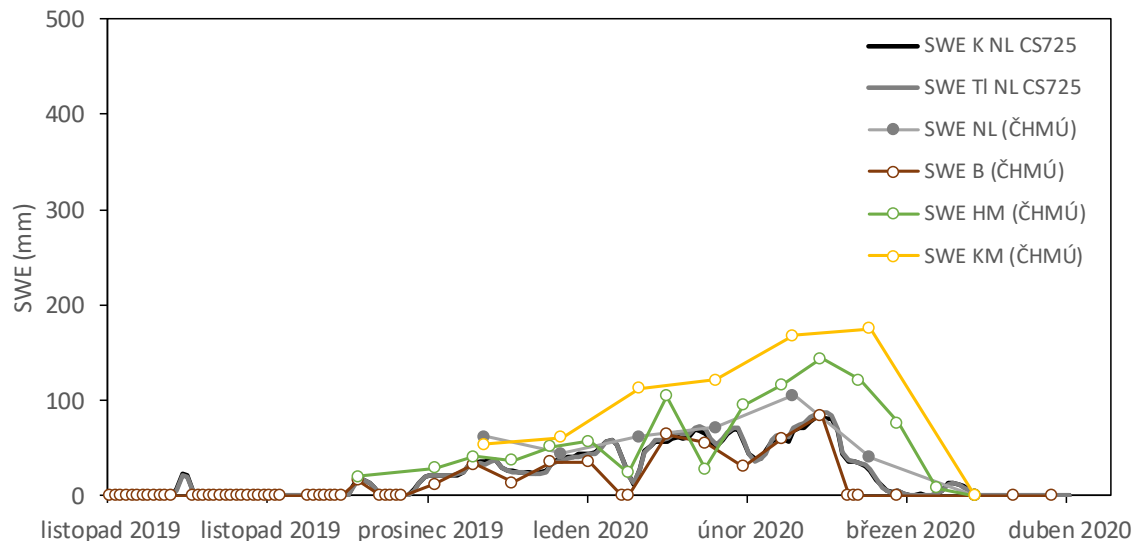
sněhové pokrývky - vzorek mohl být odebrán na místě, které mělo mnohem vyšší sněhovou pokrývku než ostatní plocha. Variabilita sněhové pokrývky především v zimních obdobích s mnoha fázemi akumulace a tání sněhové pokrývky je výrazně ovlivněna expozicí daného místa. Ruční měření ČHMÚ a měření čidlem CS725 jsou sice na stejné lokalitě, nicméně zatímco čidlo je více chráněno před účinky větru z jihozápadní a severní strany, místo pro odebrání vzorků zaměstnanci ČHMÚ je více chráněno z východní strany (viz obrázek 19). To může způsobovat pozorované rozdíly ve výšce sněhové pokrývky a ve vodní hodnotě sněhu.



Obrázek 19 Lokalita Nová Louka s vyznačeným míst měření SWE (upraveno z: mapy.cz)

Průběh vodní hodnoty sněhu na Nové Louce získaný čidlem se v porovnání s jinými otevřenými lokalitami v obou zimních obdobích nejvíce podobá průběhům získaným ručním měřením ČHMÚ na lokalitě Bedřichov - přehrada (viz obrázek 18 a 20). Dobrou shodu dat potvrzuje i koeficient determinace, který pro zimu 2018/2019 dosahuje hodnoty 0,85, pro zimu 2019/2020 pak 0,76. Jeden z důvodů, proč jsou tato měření podobná může být fakt, že se lokalita Bedřichov - přehrada nachází v podobné nadmořské výšce jako lokalita Nová Louka.

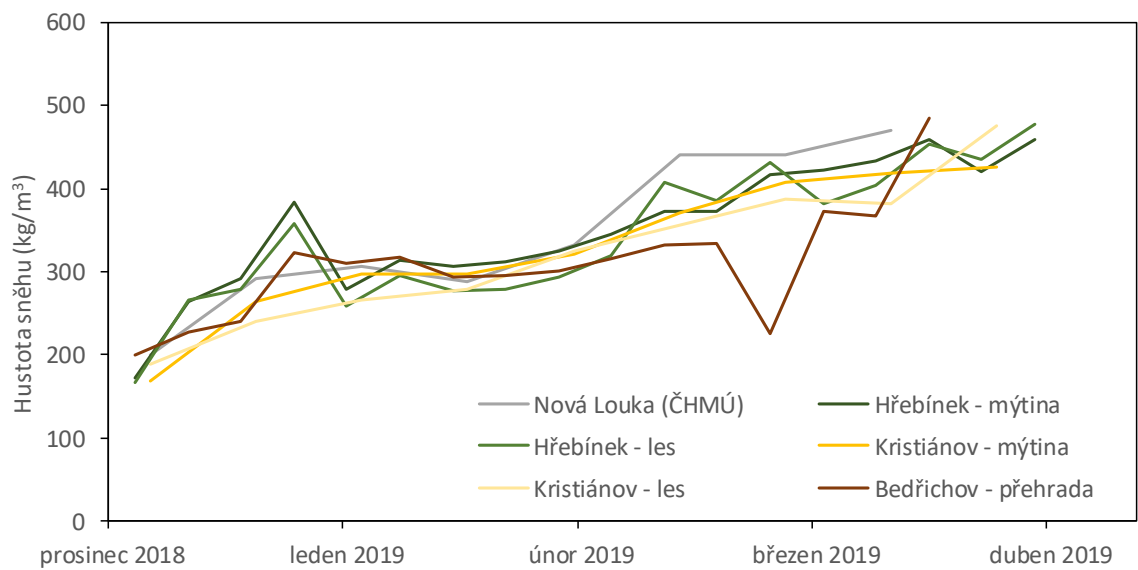
V obou zimních obdobích jsou vidět vyšší hodnoty *SWE* na lokalitách Hřebínek - mýtina a Kristiánov - mýtina než na lokalitě Nová Louka (viz obrázek 18 a 20). Rozdíl *SWE* je pravděpodobně způsoben výrazným rozdílem nadmořských výšek. Obě stanoviště se nacházejí ve vyšší nadmořské výšce (lokalita Kristiánov - mýtina je výše o 26 m a lokalita Hřebínek - mýtina je výše dokonce o přibližně 46 m) oproti lokalitě Nová Louka.



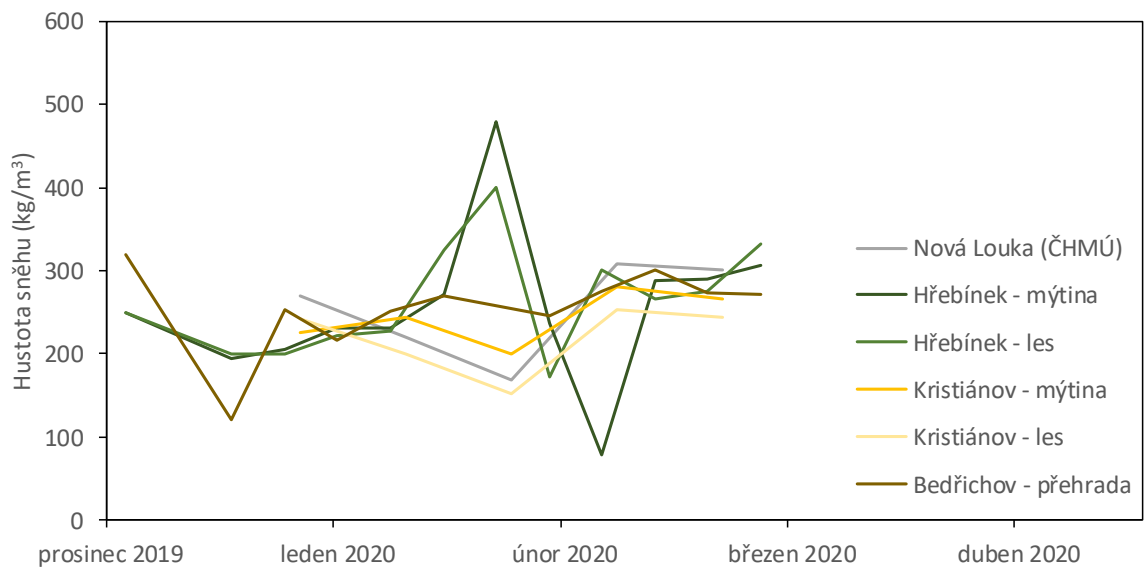
Obrázek 20 Hodnoty *SWE* na lokalitách Bedřichov - přehrada, Hřebínek - mýtina, Kristiánov - mýtina a Nová Louka v zimním období 2019/2020

Pro tato měření od ČHMÚ byly také vypočítané hustoty sněhu během obou zim. Obrázek 21 potvrzuje tendenci hustoty sněhu zvyšovat se s časem, jako to bylo v případě hustot vypočítaných z hodnot *SWE* změřených čidlem a z hodnot *SCE* měřených odečtem z latě a ultrazvukovým hladinoměrem v zimě 2018/2019. Výrazně odlehlá hodnota pozorovaná dne 11.3.2019 je nejspíše způsobena chybou měření vodní hodnoty sněhu.

Obrázek 22 naopak ukazuje různé hodnoty hustoty sněhu v průběhu zimy, opět stejně jako tomu bylo u hustoty vypočítané z hodnot *SWE* měřených čidlem a z hodnot *SCE* měřených odečtem z latě a ultrazvukovým hladinoměrem v zimě 2019/2020.



Obrázek 21 Hustota sněhu získaná ručním měřením ČHMÚ v zimním období 2018/2019 na lokalitách Nová Louka, Hřebínek - mýtina, Hřebínek- les, Kristiánov - mýtina, Kristiánov - les a Bedřichov - přehrada

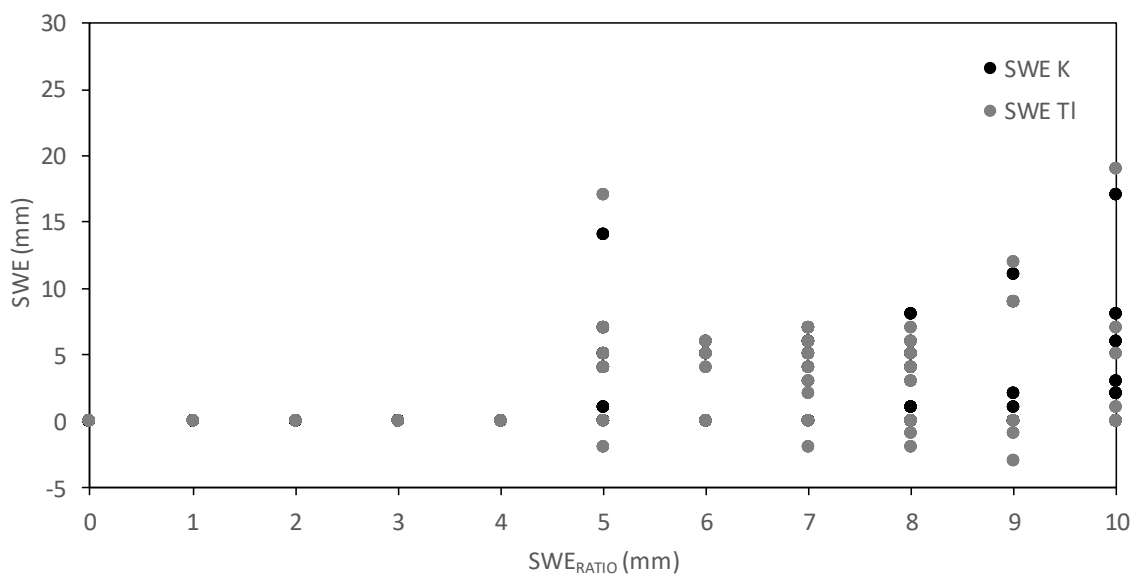


Obrázek 22 Hustota sněhu získaná ručním měřením ČHMÚ v zimním období 2019/2020 na lokalitách Nová Louka, Hřebínek - mýtina, Hřebínek- les, Kristiánov - mýtina, Kristiánov - les a Bedřichov - přehrada

4.2.7 Analýza přechodových období

Čidlo na Nové Louce detekuje gama záření na ploše cca 117 m². Sněhová pokrývka je prostorově variabilní, to může způsobovat rozdíly mezi měřeními pomocí ručních odběrů, která jsou prováděna v jednom konkrétním bodě a měřeními, která poskytují prostorově průměrovanou informaci, jako je čidlo CS725. Vzhledem k prostorové variabilitě je možné, že i když místy sněhová pokrývka ještě leží, čidlo vyhodnotí integrální vodní hodnotu jako 0 mm nebo naopak. Na obrázku 24 jsou vyobrazeny fotografie terénu pod čidlem z několika dnů dubna 2019, kdy sněhová pokrývka začala odtávat. Naopak obrázek 25 zachycuje povrch půdy pod čidlem první dny po výskytu sněhové pokrývky na začátku zimního období 2019/2020. U každé fotografie je zapsána i výška sněhu, vodní hodnota sněhu (SWE_K i SWE_{TI}). Hodnoty SWE , SWE_{ratio} , SCE a denní minimální a maximální teploty (T_{min} a T_{max}) jsou také zobrazeny v tabulce 7 pro jarní období tání v dubnu 2019 a v tabulce 8 pro nárůst sněhové pokrývky v prosinci roku 2019. V tabulkách jsou vyznačeny červeně hodnoty SWE_{ratio} , které jsou menší než 5 mm. Při nízkých hodnotách SWE_{ratio} je možné, že se SWE vypočítá jako 0 mm. To se děje v případech, kdy se poměr N/N_0 pohybuje kolem 1. Tyto případy jsou v tabulce 8 vyznačeny modře.

Hodnota SWE_{ratio} je prahovou hodnotou, dle které čidlo hodnotí přítomnost sněhové pokrývky. Je zřejmé, že pokud je hodnota menší než 5 mm, čidlo automaticky považuje hodnotu SWE jako 0 mm (obrázek 23). Hodnota SWE_{ratio} 5 mm je přednastavena systémově, je ale možné ji v případě potřeby v nastavení změnit, dle charakteristiky lokality.



Obrázek 23 Vztah mezi SWE_K , SWE_{TI} a SWE_{ratio} v přechodových obdobích pro hodnoty SWE_{ratio} do 10 mm

Tabulka 7 Přehled naměřených hodnot vodní hodnoty sněhu (SWE_K a SWE_{TI}), výšky sněhové pokrývky (SCE), denní min. teploty (T_{min}) a denní max. teploty (T_{max}) v období 4. dubna - 11. dubna 2019 - konce tání sněhové pokrývky v zimní sezóně 2018/2019

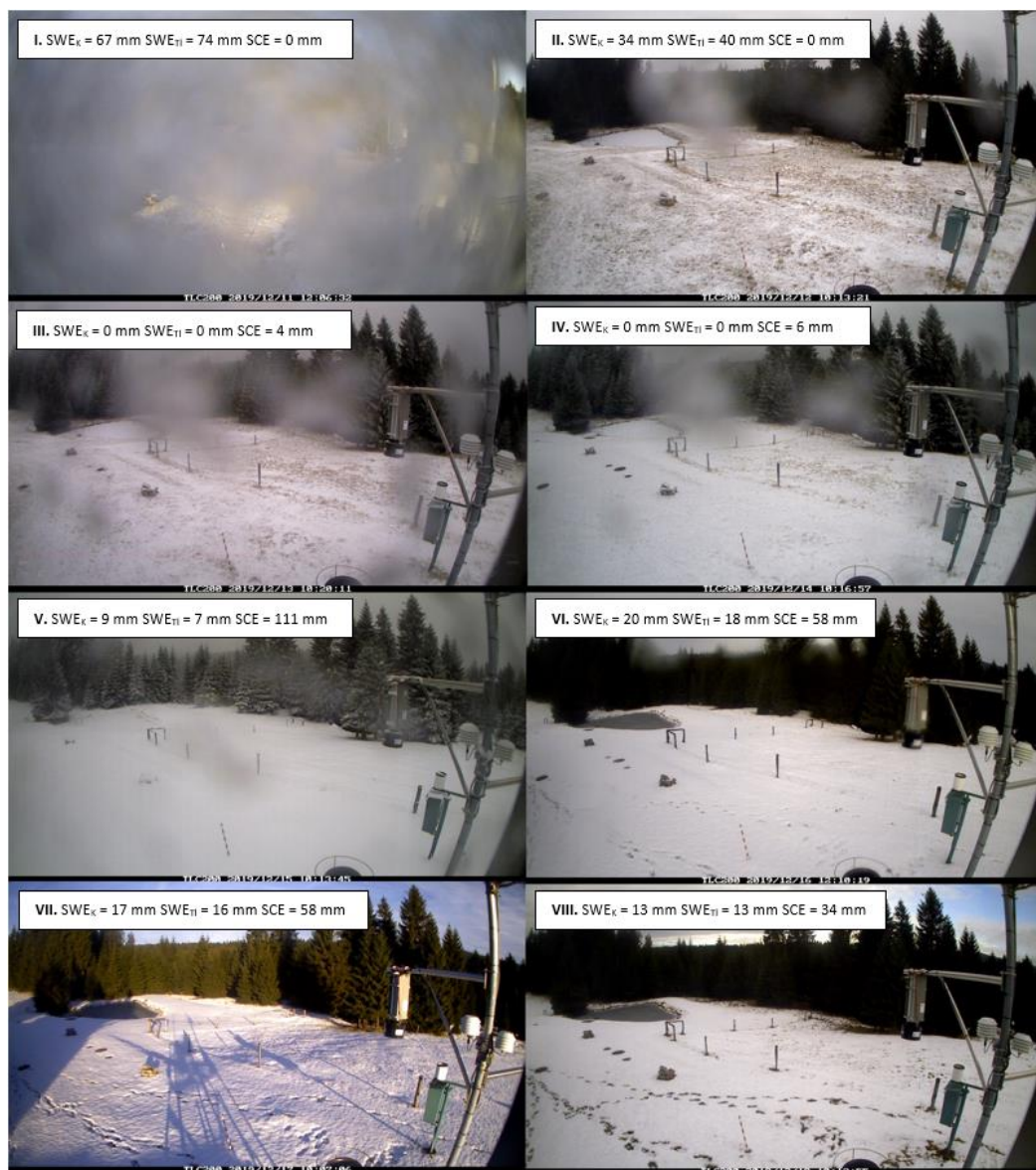
duben 2019	číslo obr.	SWE_K (mm)	SWE_{TI} (mm)	SWE_{RATIO} (mm)	SCE (mm)	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)
04.04.	I.	67	74	43	0	5.1	13.8
05.04.	II.	34	40	15	0	0.1	15.4
06.04.	III.	0	0	0	0	-1.6	16.8
07.04.	IV.	0	0	1	0	-2.7	15.3
08.04.	V.	0	0	-5	0	-2.0	15.1
09.04.	VI.	0	0	-5	0	-2.5	13.4
10.04.	VII.	0	0	-11	0	-4.3	8.4
11.04.	VIII.	0	0	-12	0	-2.2	3.4



Obrázek 24 Fotografie pořízené kamerou Brinno BCC100 v období 4.dubna - 11.dubna 2019 na lokalitě Nová Louka

Tabulka 8 Přehled naměřených hodnot vodní hodnoty sněhu (SWE_K a SWE_{T1}), výšky sněhové pokrývky (SCE), denní min. teploty (T_{min}) a denní max. teploty (T_{max}) v období 11. prosince - 18. prosince 2019 - začátku akumulací fáze sněhu v zimním období 2019/2020

prosinec 2019	číslo obr.	SWE_K (mm)	SWE_{T1} (mm)	SWE_{RATIO} (mm)	SCE (mm)	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)
11.12.	I.	0	0	5	0	-4.2	-1.2
12.12.	II.	0	0	10	0	-5.3	-2.6
13.12.	III.	0	0	-4	4	-3.3	-1.0
14.12.	IV.	0	0	9	6	-0.9	-0.2
15.12.	V.	9	7	25	111	-2.1	2.9
16.12.	VI.	20	18	27	58	1.1	4.7
17.12.	VII.	17	16	20	58	1.5	6.8
18.12.	VIII.	13	13	14	34	-1.7	7.6

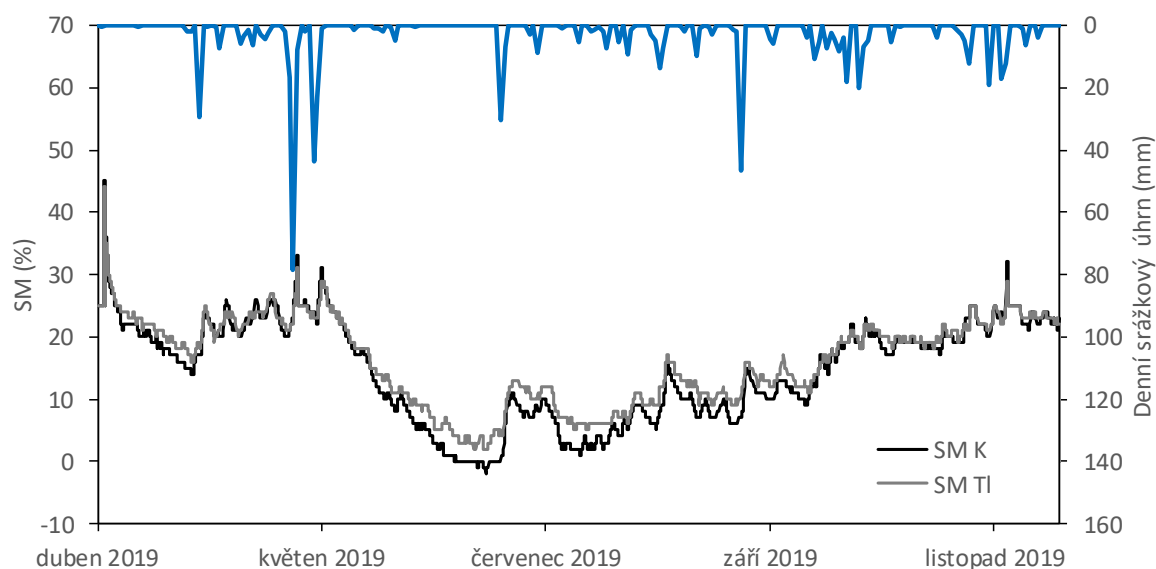


Obrázek 25 Fotografie pořízené kamerou Brinno BCC100 v období 11. prosince - 18. prosince 2019 na lokalitě Nová Louka

Vzhledem k tomu, že sněhová pokrývka nemusí ležet již na celém území měřeném čidlem, je možné, že dojde k vypočtení *SWE* i v případě, kdy ultrazvukové čidlo vyhodnotí *SCE* jako 0 mm. Taková situace mohla nastat například ve dnech 4.4. a 5.4. 2019 viz tabulka 7.

4.2.8 Výpočet půdní vlhkosti čidlem CS725

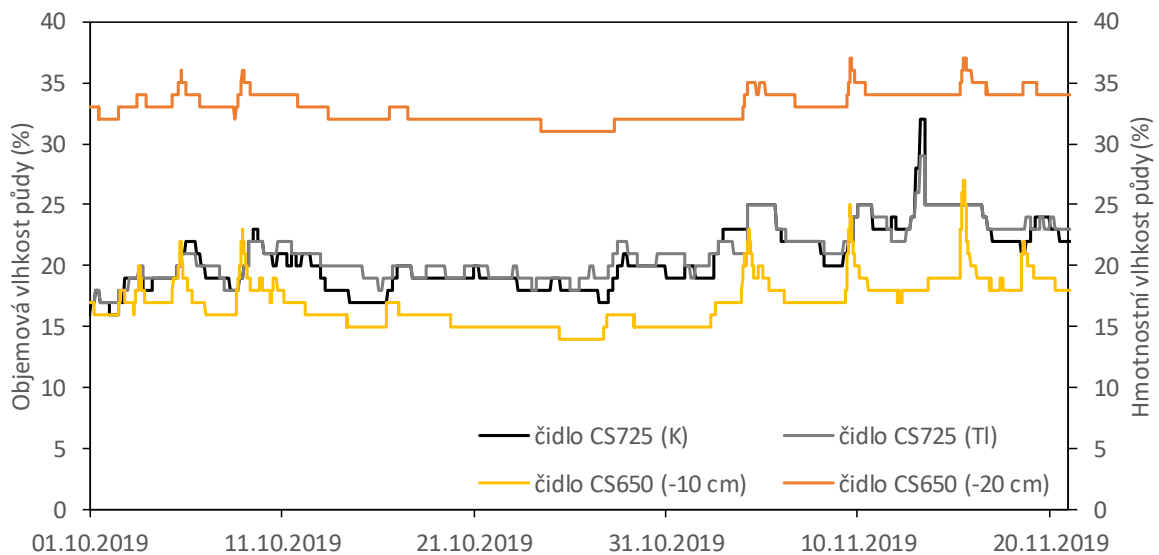
Hodnota hmotnostní půdní vlhkosti je čidlem počítána pouze v případě, že čidlo vyhodnotí plochu jako plochu bez sněhové pokrývky. Od konce března do začátku prosince se hodnota *SM* pohybuje od 0 % do 25 %, výjimečně až do 35 %. Nejvíce nasycený profil je ve vegetačním období roku 2019 na začátku jara, nebo na konci podzimu. Na obrázku 26 jsou zobrazené hodnoty *SM* v období bez sněhové pokrývky a srážky změřené váhovým srážkoměrem na lokalitě Nová Louka. Lze vidět časovou souslednost mezi srážkami a jimi způsobeným nárůstem hodnoty *SM*.



Obrázek 26 Hodnoty *SM* a denní srážkový úhrn na lokalitě Nová Louka v období bez sněhové pokrývky v roce 2019

Čidlo v podstatě měří půdní vlhkost pouze z vrchní části půdy a s minimálním vlivem hlubších vrstev (Ducharme et al. 2015). Vlhkost půdy, získaná pomocí čidla CS725, je tedy reprezentativní pouze pro povrchovou vrstvu půdy. Při objemové hmotnosti zcela suché půdy $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$ je tato hloubka podle Ducharme et al. (2015) 15 cm. Objemová hmotnost půdy na stanovišti Nová Louka nebyla dosud určena. Protože čidlo CS725 získává hmotnostní vlhkost půdy a čidlo CS650 získává objemovou vlhkost půdy, nebylo možné tyto hodnoty bez znalosti objemové hmotnosti svrchních vrstev půdy přímo porovnat.

Měření objemové půdní vlhkosti čidly CS650 jsou dostupná pro období bez sněhové pokrývky pouze od začátku října 2019 do konce listopadu 2019. Porovnání dat půdní vlhkosti bylo tedy omezené pouze na tyto dva měsíce. Na obrázku 27 jsou zobrazeny hmotnostní vlhkosti půdy (SM_K a SM_{TI}) získané čidlem CS725 a vlhkosti objemové získané měřeními čidly CS650. Z průběhu vlhkostí je patrná podobná proměnlivost hodnot objemových vlhkostí půdy v hloubce 10 cm pod povrchem a hmotnostních vlhkostí půdy (SM_K a SM_{TI}). Hodnoty získané čidlem CS725 jsou však oproti hodnotám v hloubce 10 cm pod povrchem trochu opožděné. Pomalejší reakce je způsobena převážně tím, že zatímco čidlo CS650 měří vlhkost objemu půdy přibližně 7800 cm^3 v okolí čidla, čidlo CS725 integruje odezvy elektromagnetických záblesků ze svrchní vrstvy o mocnosti cca 10 - 15 cm a plochy o cca 117 m^2 , tedy několikanásobně většího objemu půdy než čidlo CS650.



Obrázek 27 Průběhy SM objemových změřených v hloubkách 10 a 20 cm pod povrchem čidly CS650 a SM hmotnostních změřených čidlem CS725 na lokalitě Nová Louka od října do prosince roku 2019

Dne 13.11. 2019 je vidět u hodnot získaných čidlem CS725 vrchol, který se u hodnot získaných čidlem CS650 nevyskytuje. Čidlo tento den vyhodnotilo situaci ještě jako situaci bez sněhové pokrývky a vypočítalo tedy půdní vlhkost. V dalších dnech již ale čidlo vyhodnotilo situaci jako situaci se sněhovou pokrývkou a do data 16.11. 2019 je tedy patrná ustálená hodnota půdní vlhkosti 25 %, tedy SSM. Na vlhkostech půdy měřených CS650 je však patrné, že tato sněhová pokrývka roztála již dne 15.11. Nepřesnost určení půdní vlhkosti z CS725 tak jde na vrub přechodovým stavům s počáteční akumulací sněhové pokrývky a měření je nutné v tomto období pečlivě analyzovat a ověřovat.

Stejně jako u hodnot SWE_K a SWE_{Tl} , čidlo u hodnot půdní vlhkosti udává vyšší hodnoty z útlumu thalia. To může být, opět jako u SWE , způsobeno větší citlivostí v případě SM_{Tl} , kdy N_{Tl} dosahují mnohem nižších hodnot ($N_{Tl} \approx 9\,000\text{ h}^{-1}$), než hodnoty N_K ($N_K \approx 40\,000\text{ h}^{-1}$). Maximální rozdíl mezi hodnotami SM_{Tl} než SM_K je 6 %.

5. Závěr

Gamaspektroskopie využívá útlumu signálu vyzařovaného izotopy ^{40}K a ^{208}Tl prostředím (v tomto případě převážně sněhovou pokrývkou, resp. množstvím vody mezi zdrojem elektromagnetického záření a detektorem) k detekci vodní hodnoty sněhu. Vztah mezi hodnotou vyzařovaného signálu a vodní hodnotou sněhu byl znázorněn poměrem signálu vyzařovaného v daný čas ku signálu vyzařovanému zcela suchou půdou v období bez sněhové pokrývky a vodní hodnotou sněhu. Tento vztah byl potvrzen jako exponenciální (při uvažování konstantního útlumového koeficientu).

Čidlo CS725 využívá variabilního útlumového koeficientu (ten byl již dříve v odborné literatuře potvrzen jako vhodnější než koeficient konstantní). Jako variabilní koeficient útlumu čidlo využívá polynom 5. stupně. Je možné využití polynomu 6. stupně, který lépe aproximuje data, zato je ale náchylnější na volbu správné počáteční hodnoty. Pro výpočet vodní hodnoty sněhu je dále nezbytné zvolit správnou hodnotu nasycené půdní vlhkosti a signálu vyzařovaného zcela suchou půdou a bez sněhové pokrývky. Hodnota nasycené půdní vlhkosti je v této práci odhadnuta a dosud ji nebylo možné hodnotu experimentálně ověřit.

Čidlo CS725 detekuje elektromagnetické záření z izotopů draslíku-40 (^{40}K) a thalia-208 (^{208}Tl). Hodnoty vodní hodnoty sněhu vypočtené z elektromagnetického záření izotopu draslíku jsou pravděpodobně přesnější díky vyššímu počtu zaznamenaných elektromagnetických záření. Vodní hodnoty sněhu získané z elektromagnetického záření izotopu draslíku a izotopu thalia mají silný korelační vztah.

Z dlouhodobého měření čidlem CS725 vyplývá, že se vodní hodnoty sněhu ve sledovaných obdobích velmi lišily. V zimě 2018/2019 je změřen jeden hlavní vrchol vodní hodnoty sněhu, v zimě 2019/2020 je jich hned několik. Rozdílnost zimních období je dále patrná z průběhu výšky sněhové pokrývky, celkového množství srážek spadeneho za zimní období a teplot vzduchu. Jiný charakter zimních období je zřejmý také z vypočítaných hustot sněhu, kdy se v zimním období 2018/2019 hustota sněhu kontinuálně zvyšovala směrem k období tání, které bylo v tomto období prakticky pouze jedno, zatímco v zimním období 2019/2020 docházelo k častějšímu tání, tedy i k častějším a nepravidelným změnám hustoty sněhu.

Pro porovnání vodních hodnot sněhu s jinými lokalitami byla primárně vybraná lokalita Tomšovka, kde se provádí měření vodní hodnoty sněhu váhovým sněhoměrem a ručním měřením. Měření na lokalitě Tomšovka v zimní období 2018/2019 vykazovalo rysy měření z lesního stanoviště (nižší maximální vodní hodnota sněhu, pomalejší odtávání), to by naznačovalo, že má toto stanoviště spíše lesní než mýtinový charakter. Nicméně, v zimním období 2019/2020 měření na lokalitě Tomšovka vycházelo odlišně. Bylo sice také patrné pozdější odtávání, ale vodní hodnoty sněhu dosahovaly vyšších hodnot, než u ostatních měření. Je možné, že to bylo způsobeno zastíněním stanoviště a tedy pomalejší reakcí na změnu teploty - sníh nestačil roztát, proto se začal kumulovat více než na jiných lokalitách. V ostatních lesních stanovištích se tento efekt nicméně takto silně neprojevil, je tedy zřejmé, že na velikost vodní hodnoty sněhu (resp. výšky sněhové pokrývky) má vliv více faktorů, jako jsou expozice a sklon svahu nebo nadmořská výška stanoviště.

Po porovnání s ostatními lokalitami se nejvíce měřením vodních hodnot sněhu na Nové Louce (CS725) podobá měření na lokalitě Bedřichov - přehrada. V obou případech se jedná o měření na mýtině, ve stejných nadmořských výškách a s nízkým sklonem svahu.

Dále bylo potvrzeno, že čidlo vodní hodnotu sněhu počítá, pokud poměr vodních hodnot sněhu získaných z izotopu draslíku a vodních hodnot sněhu získaných z izotopu thalia dosahuje nejméně 5 mm. Pro menší hodnoty je zhodnocena vodní hodnota sněhu jako 0 mm a čidlo vypočítá hmotnostní půdní vlhkost. Půdní vlhkost vypočítaná čidlem je v práci zobrazena pro období bez sněhové pokrývky. Pro část období, kdy byla dostupná měření čidly půdní vlhkosti, byla porovnána. Vlhkost půdy měřená čidlem CS725 pochází nejspíše z vrchní části půdy (do 10 - 15 cm pod povrchem). Pro přesnější určení hloubky odpovídající SM_K a SM_{TI} by ale musela být doměřena objemová hmotnost půdy.

Využití gamaspektroskopie, v tomto případě využití čidla CS725, je dobrým nástrojem ke zjišťování vodní hodnoty sněhu a půdní vlhkosti. Čidlo CS725 poskytuje automatické měření, které nevyžaduje obsluhu a výrazně tedy usnadňuje práci, v porovnání například s ručním měřením. Oproti ručnímu měření poskytuje toto čidlo také kontinuální informaci o průměrné hodnotě vodní hodnoty sněhu reprezentující plochu v řádu 100 m² a předchází tak nepřesnostem způsobenými sporadicky prováděnými měřeními.

6. Seznam použitých zdrojů

AOPK ČR, nedatováno. Základní údaje o CHKO. *AOPK ČR* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://jizerskehory.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-o-chko/>

BALDONCINI, Marica, Matteo ALBÉRI, Carlo BOTTARDI, Enrico CHIARELLI, Kassandra RAPTIS, Andrea SERAFINI, Virginia STRATI a Fabio MANTOVANI, 2019. Filling the gap between punctual and satellite soil moisture measurements through proximal gamma-ray spectroscopy. *Geophysical Research Abstract*.

BEDNÁŘ, Jan, ed., 1993. *Meteorologický slovník výkladový terminologický, s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině*. Vyd. 1. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR. ISBN 978-80-85368-45-1.

BRINNO INC., nedatováno. Brinno | Time Lapse Construction Camera - BCC100. *Brinno brilliant innovation* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://www.brinno.com/construction-camera/BCC100>

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., 2012. *Guide of manufacturer CS725 Snow Water Equivalency Sensor*. Campbell Scientific Ltd.

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., 2018. *Guide of manufacturer CS650 and CS655 Water Content Reflectometers*. Campbell Scientific, Inc.

ČHMÚ, 2020. Meteorologické stanice ČHMÚ. *Meteorologické stanice ČHMÚ* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/stanice/ShowStations_CZ.html

ČÚZK, 2020. Analýzy výškopisu. *Aplikace Analýzy výškopisu* [online] [vid. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/dmr/>

DEWALLE, David R. a Albert RANGO, 2008. Principles of snow hydrology. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-82362-3

DUB, Oto a Jaromír NĚMEC, 1969. *Hydrologie : určeno [také] posl. vys. i odb. škol / Oto Dub, Jaromír Němec a kol.* 1. Praha: SNTL.

DUCHARME, P., A. HOUDAYER, Y. CHOQUETTE, B. KAPFER a J. P. MARTIN, 2015. Numerical Simulation of Terrestrial Radiation over a Snow Cover. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* [online]. ISSN 0739-0572, 1520-0426. Dostupné z: [doi:10.1175/JTECH-D-14-00100.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00100.1)

ESRI, nedatováno. ArcGIS - My Map. *ArcGIS online* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?useExisting=1>

FIEDLER AMS S.R.O., 2017a. PT100-XM snímač teploty. *FIEDLER Elektronika pro ekologii* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/node/450>

FIEDLER AMS S.R.O., 2017b. Ultrazvukové hladinoměry US1200, US3200 a US4200. *FIEDLER Elektronika pro ekologii* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/hladinomy/snimace-vysky-hladiny/us1200->

CHOQUETTE, Yves, Pierre DUCHARME a James ROGOZA, 2013. CS725, an accurate sensor for the snow water equivalent and soil moisture measurements. *International Snow Science Workshop Grenoble – Chamonix Mont-Blanc France*

CHOQUETTE, Yves, Pierre LAVIGNE, Pierre DUCHARME, Alain HOUDAYER, Jean-Pierre MARTIN, 2010. Apparatus and method for monitoring snow water equivalent and soil moisture content using natural gamma radiation. *US patent 7,800,051 B2*.

KUTÍLEK, Miroslav, 1978. *Vodohospodářská pedologie: vysokoškolská učebnice* [online]. 2., přepracované vydání. Praha: SNTL. Dostupné z: <https://kramerius-vs.mzk.cz>

MAHMOOD, Hafiz, Willem HOOGMOED, Eldert VAN HENTEN, 2013. Proximal Gamma-Ray Spectroscopy to Predict Soil Properties Using Windows and Full-Spectrum Analysis Methods. *Sensors* [online]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: [doi:10.3390/s131216263](https://doi.org/10.3390/s131216263)

Mapy.cz, 2020. *Mapy.cz* [online] [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://en.mapy.cz/zakladni?x=15.1585633&y=50.8148151&z=18>

MCMAHON, Mary, 2020. What Is Terrestrial Radiation? *Wisegeek* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.wisegeek.com/what-is-terrestrial-radiation.htm>

METEOSERVIS V.O.S., 2008. Srážkoměr MRW500. *Meteoservis výrobce automatických meteorologických systémů* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.meteoservis.cz/75-SRAZKOMERY-VAHOVE/75-Srazkomer-MRW500>

MUNZAR, Jan a Stanislav ONDRÁČEK, 2010. Historický srážkový rekord z Jizerských hor z roku 1897 dodnes nepřekonán. *Sborník Severočeského Muzea*. ISSN 0375–1686. Dostupné z: http://www.muzeumlb.cz/?page=sborniky_prirodoveda_28

PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE, 2019. *Isotopes of thallium* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Isotopes_of_thallium&oldid=926473761

PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE, 2020a. *Draslík-40* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Draslík-40&oldid=18186877>

PŘÍSPĚVATELÉ WIKIPEDIE, 2020b. *Jizerské hory* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Jizerské_hory&oldid=18460845

SMITH, Craig D., Anna KONTU, Richard LAFFIN, John W. POMEROY, 2017. An assessment of two automated snow water equivalent instruments during the WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment. *The Cryosphere* [online]. ISSN 1994-0424. Dostupné z: [doi:10.5194/tc-11-101-2017](https://doi.org/10.5194/tc-11-101-2017)

STRATI, Virginia, Matteo ALBÉRI, Stefano ANCONELLI, Marica BALDONCINI, Marco BITTELLI, Carlo BOTTARDI, Enrico CHIARELLI, Barbara FABBRI, Vincenzo GUIDI, Kassandra RAPTIS, Domenico SOLIMANDO, Fausto TOMEI, Giulia VILLANI,

Fabio MANTOVANI, 2018. Modelling Soil Water Content in a Tomato Field: Proximal Gamma Ray Spectroscopy and Soil–Crop System Models. *Agriculture* [online]. ISSN 2077-0472. Dostupné z: doi:10.3390/agriculture8040060

ŠMÍDL, Jan, 2010. *Vyhodnocení hydrologického vlivu sněhové pokrývky na odtok z povodí Uhlířská*. Praha. Bakalářská práce. České Vysoké Učení Technické v Praze.

VÝZKUM A VÝVOJ V ČESKÉ REPUBLICE, 2009. Snow scale. *Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací* [online] [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://www.rvvi.cz/riv?ss=detail&h=RIV%2F68407700%3A21110%2F09%3A00164002%21RIV10-MSM-21110__me

WRIGHT, Matt, Jeff KAVANAUGH, Claude LABINE, 2011. Performance analysis of GMON3 snow water equivalency sensor.

7. Seznam obrázků

Obrázek 1 Meteorologická stanice Ústavu pro hydrodynamiku AV ČR na lokalitě Nová Louka (fotografie pořízena Dr. Miroslavem Tesařem, ÚH Akademie věd ČR)	22
Obrázek 2 Lokality měření sněhových charakteristik využité v bakalářské práci (upraveno z: mapy.cz).....	23
Obrázek 3 Vztah N/N_0 a SWE na lokalitě Nová Louka s proložením exponenciální funkcí s konstantním útlumovým koeficientem.....	33
Obrázek 4 Hodnoty N_{0K} a N_{0TI} měřené čidlem CS725 v období bez sněhové pokrývky v roce 2019 na lokalitě Nová Louka	35
Obrázek 5 Vliv hodnoty SM a N_0 na výslednou hodnotu SWE_K zobrazený na průběhu SWE v zimě 2018/2019 na lokalitě Nová Louka	36
Obrázek 6 Porovnání vyjádření lineárního útlumového koeficientu β_K polynomickou rovnicí 5. a 6. stupně, ukázka provedena na datech v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020	37
Obrázek 7 Porovnání vyjádření lineárního útlumového koeficientu β_{TI} polynomickou rovnicí 5. a 6. stupně, ukázka provedena na datech v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020	37
Obrázek 8 Regresní vztah vypočtených hodnot SWE_{TI} a SWE_K na lokalitě Nová Louka v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020.....	38
Obrázek 9 Vztah mezi hodnotou SWE a rozdílu mezi SWE_K a SWE_{TI} na lokalitě Nová Louka v zimních obdobích 2018-2019 a 2019/2020	39
Obrázek 10 Průběh vodní hodnoty sněhu v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020 měřené čidlem CS725 na lokalitě Nová Louka	40

Obrázek 11 Výšky sněhové pokrývky na lokalitě Nová Louka v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020 získané odečtením z latě z kamerového záznamu a ultrazvukovým hladinoměrem	41
Obrázek 12 Hustota sněhu v zimním období 2019/2020 na lokalitě Nová Louka	42
Obrázek 13 Hustota sněhu v zimním období 2019/2020 na lokalitě Nová Louka	42
Obrázek 14 Vztah mezi ručním měřením SWE a měřením SWE váhovým sněhoměrem v zimním období 2018/2019	43
Obrázek 15 Proložení dat z váhového sněhoměru pomocí lineární regrese do ručního měření v zimním období 2018/2019	43
Obrázek 16 Hodnoty SWE na lokalitách Tomšovka, Hřebínek - les, Kristiánov - les a Nová Louka v zimním období 2018/2019	44
Obrázek 17 Hodnoty SWE na lokalitách Tomšovka, Hřebínek - les, Kristiánov - les a Nová Louka v zimním období 2019/2020	45
Obrázek 18 Hodnoty SWE na lokalitách Bedřichov - přehrada, Hřebínek - mýtina, Kristiánov - mýtina a Nová Louka v zimním období 2018/2019	45
Obrázek 19 Lokalita Nová Louka s vyznačeným míst měření SWE (upraveno z: mapy.cz)	46
Obrázek 20 Hodnoty SWE na lokalitách Bedřichov - přehrada, Hřebínek - mýtina, Kristiánov - mýtina a Nová Louka v zimním období 2019/2020	47
Obrázek 21 Hustota sněhu získaná ručním měřením ČHMÚ v zimním období 2018/2019 na lokalitách Nová Louka, Hřebínek - mýtina, Hřebínek- les, Kristiánov - mýtina, Kristiánov - les a Bedřichov - přehrada	48
Obrázek 22 Hustota sněhu získaná ručním měřením ČHMÚ v zimním období 2019/2020 na lokalitách Nová Louka, Hřebínek - mýtina, Hřebínek- les, Kristiánov - mýtina, Kristiánov - les a Bedřichov - přehrada	48
Obrázek 23 Vztah mezi SWE_K , SWE_{TI} a SWE_{ratio} v přechodových obdobích pro hodnoty SWE_{ratio} do 10 mm	49
Obrázek 24 Fotografie pořízené kamerou Brinno BCC100 v období 4.dubna - 11.dubna 2019 na lokalitě Nová Louka	50
Obrázek 25 Fotografie pořízené kamerou Brinno BCC100 v období 11. prosince - 18. prosince 2019 na lokalitě Nová Louka	51
Obrázek 26 Hodnoty SM a denní srážkový úhrn na lokalitě Nová Louka v období bez sněhové pokrývky v roce 2019	52

Obrázek 27 Průběhy SM objemových změřených v hloubkách 10 a 20 cm pod povrchem čidly CS650 a SM hmotnostních změřených čidlem CS725 na lokalitě Nová Louka od října do prosince roku 2019.....	53
--	----

8. Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozsah N_K za 1 hodinu s doporučením, zda je lokalita vhodná pro umístění čidla (převzato z Campbell Scientific, Inc. 2012)	20
Tabulka 2 Rozsah N_{TI} za 1 hodinu s doporučením, zda je lokalita vhodná pro umístění čidla (převzato z Campbell Scientific, Inc. 2012)	20
Tabulka 3 Přehled měřících přístrojů využitých v bakalářské práci s jejich výškou umístění	25
Tabulka 4 Dostupnost dat jednotlivých měření	32
Tabulka 5 Hodnoty hmotnostního útlumového koeficientu pro energetická okna 1,46 MeV a 2,61 MeV u vybraných materiálů (převzato z Ducharme et al. 2015).....	35
Tabulka 6 Průměrné měsíční teploty na lokalitě Nová Louka od prosince do března v zimních obdobích 2018/2019 a 2019/2020.....	40
Tabulka 7 Přehled naměřených hodnot vodní hodnoty sněhu (SWE_K a SWE_{TI}), výšky sněhové pokrývky (SCE), denní min. teploty (T_{min}) a denní max. teploty (T_{max}) v období 4. dubna - 11. dubna 2019 - konce tání sněhové pokrývky v zimní sezóně 2018/2019	50
Tabulka 8 Přehled naměřených hodnot vodní hodnoty sněhu (SWE_K a SWE_{TI}), výšky sněhové pokrývky (SCE), denní min. teploty (T_{min}) a denní max. teploty (T_{max}) v období 11. prosince - 18. prosince 2019 - začátku akumulací fáze sněhu v zimním období 2019/2020	51

9. Seznam rovnic

Rovnice (1) Hustota sněhu.....	12
Rovnice (2) Hmotnostní vlhkost půdy.....	14
Rovnice (3) Objemová vlhkost půdy.....	14
Rovnice (4) Výpočet SWE	29
Rovnice (5) Výpočet SWE_{RATIO}	29
Rovnice (6) Výpočet SM	31
Rovnice (7) Vztah mezi vyzařovaným signálem a SWE s konstantním koeficientem	33
Rovnice (8) Vztah mezi vyzařovaným signálem a SWE s variabilním koeficientem.....	34