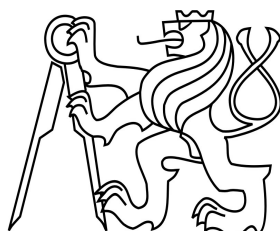


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



**Diplomová práce**

**ČASOVÝ A PROSTOROVÝ VÝVOJ SNĚHOVÉ  
POKRÝVKY V OBLASTI VYSOKÝCH TATER**

SPATIO-TEMPORAL TRENDS OF SNOW COVER IN THE HIGH TATRAS REGION

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Bc. Kateřina Dušková

Doc. Ing. Josef Křeček, CSc.

2023



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dušková Jméno: Kateřina Osobní číslo: 477233  
Zadávající katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie  
Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství  
Studijní obor: (3607T027) Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Časový a prostorový vývoj sněhové pokrývky v oblasti Vysokých Tater  
Název diplomové práce anglicky: Spatio-temporal trends of snow cover in the High Tatras region.  
Pokyny pro vypracování:  
Tato studie by měla zahrnovat:  
- Rozbor procesu tvorby sněhové pokrývky v horském prostředí Vysokých Tater.  
- Diskuzi možnosti detekce vegetace a sněhové pokrývky pomocí metod dálkového průzkumu Země.  
- Analýzu dostupných snímků MODIS (MOD10A2) oblasti Vysokých Tater se zaměřením na alpské povodí Velké Studené doliny ve spolupráci s Ústavem pro hydrologii a vodní hospodářství BOKU ve Vídni (Dr. Mathew Herrnegger a Dr. Franziska Koch).  
- Porovnání dat dálkového průzkumu s výsledky pozemního šetření.  
- Diskuzi získaných výsledků v kontextu se změnou globálního klimatu.  
- Závěr a doporučení.  
Seznam doporučené literatury:  
Messerli, B., Viviroli, D., and R. Weingartner. 2004. Mountains of the world: Vulnerable water towers for the 21st century. AMBIO Special Report 13, 29-34.  
Seidl, K. and J. Martinec. 2004. Remote sensing in snow hydrology: runoff modelling, effect of climate change. Springer, 171 pp.  
WMO. 1994. Guide to hydrological practices. Data acquisition and processing analysis and other application. WMO-No. 168, World Meteorological Organization, Genève, 735 pp.  
Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Josef Křeček, CSc.  
Datum zadání diplomové práce: 14.9.2022 Termín odevzdání diplomové práce: 9.1.2023  
*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 diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové 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“.*  
\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala Doc. Ing. Josefu Křečkovi, CSc za vedení a pomoc při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat Dipl. Ing. Mathew Herrneggerovi a Dipl. Dr. Franziske Koch za pomoc s programem MODIS a poskytnuté rady. Tato práce vznikla za podpory programu AKTION a agentury OeAD, která mi umožnila absolvování studijní stáže na univerzitě BOKU ve Vídni, kde jsem tuto studii zpracovala.

---

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Časový a prostorový vývoj sněhové pokrývky v oblasti Vysokých Tater“ vypracovala samostatně a veškeré použité informační zdroje jsem uvedla v seznamu použité literatury podle zásad metodického pokynu č. 1/2009 ČVUT, O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze 27.12.2022

Kateřina Dušková

---

## **Anotace**

Sněhová pokrývka je významný prvek hydrologického režimu vysokohorských povodí, kde odtok z tání sněhu představuje významnou složku celkového odtoku. Cílem této práce je analýza časoprostorového vývoje sněhové pokrývky v oblasti Vysokých Tater pomocí metod dálkového průzkumu země. Informace o sněhové pokrývce jsou převzaty z programu MODIS, za období červenec 2000–září 2022. Zájmová oblast byla rozdělena do čtyř výškových pásem a jednoho alpínské povodí. Pro lepší porozumění vývoje sněhové pokrývky jsou stanoveny parametry např. první a poslední den se sněhovou pokrývkou, doba pokrytí na polovině plochy, délka akumulace a ablace, u kterých je pozorován trend vývoje pro každou sledovanou doménu. Výsledky nevykazují žádný dlouhodobý statisticky významný trend, ale je možné pozorovat střídání sněhově bohatých a chudých období a závislost vývoje sněhové pokrývky na nadmořské výšce. Alpínské povodí vykazuje stejný vývoj sněhové pokrývky jako pásmo s nejvyšší nadmořskou výškou. Délka fáze vývoje (akumulace a ablace) ve většině případů není závislá na průměrné teplotě fáze. Z porovnání měřených hodnot sněhové pokrývky v terénu s hodnotami dálkového průzkumu země lze potvrdit časovou přesnost této informace.

## **Klíčová slova:**

Vysoké Tatry; dynamika sněhové pokrývky; akumulace a ablace; MODIS; NDSI.

## **Annotation**

Snowpack is an important element of the hydrologic regime in high elevation watershed, where snowmelt represents a significant portion of runoff. The aim of this paper is to analyze the spatiotemporal evolution of snow cover in the High Tatras by using remote sensing. The snow cover data were detected from the MODIS imagery provided in the period of July 2000 – September 2022. From the comparison of measured snow cover and the remote sensing data, it can be concluded that the data are temporally accurate. The observed area was divided into four altitude zones and one small alpine catchment. For better understanding of the snow cover evolution, parameters such as first and last snow cover day, coverage time on half of area, length of accumulation and ablation phase are determined, and the trend is observed for each observed domain. The results do not show any long-term statistically significant trend, but it is possible to observe the alternation between snow-rich and snow-poor periods and the dependence of the snow cover evolution on the altitude. The alpine catchment shows the same snow cover evolution as the highest altitude zone. The

---

length of the development phase (accumulation and ablation) does not depend in most cases on the average temperature of the phase. Changes in snow cover in high mountain environments are not confirmed as a function of climate change, the research is carried out for too short time period and longer observations would be needed to confirm the hypothesis.

**Key words:**

High Tatra Mountains; snow cover dynamics; accumulation and ablation; MODIS; NDSI.

---

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod a cíle</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Tvorba a vývoj sněhové pokrývky v horském prostředí</b> .....	<b>8</b>
2.1	Akumulace sněhové pokrývky .....	9
2.2	Ablace sněhové pokrývky .....	10
2.3	Sublimace sněhové pokrývky .....	11
<b>3</b>	<b>Dálkový průzkum zemského povrchu, MODIS</b> .....	<b>12</b>
3.1	Vývoj dálkového průzkumu země .....	12
3.2	Možnosti detekce vegetace a sněhové pokrývky .....	13
3.3	MODIS, NDSI .....	13
3.4	Chyby v důsledku zastínění lesním porostem .....	15
3.5	Chyby v důsledku zastínění mraky, jejich eliminace.....	16
3.6	Porovnání dat dálkového průzkumu s pozemním měřením sněhové pokrývky .....	21
<b>4</b>	<b>Analýza dat dálkového průzkumu země</b> .....	<b>23</b>
4.1	Sledovaná oblast Vysoké Tatry.....	23
4.1.1	Posouzení trendu vývoje sněhové pokrývky.....	28
4.1.2	Analýza doby pokrytí sněhovou pokrývkou .....	31
4.1.3	Fáze vývoje sněhové pokrývky, vliv teploty .....	40
4.2	Sledovaná oblast povodí Velké Studené doliny.....	48
4.2.1	Vývoj sněhové pokrývky a analýza doby pokrytí.....	50
4.2.2	Fáze vývoje sněhové pokrývky, vliv teploty .....	54
<b>5</b>	<b>Výsledky a diskuse, vliv klimatické změny</b> .....	<b>57</b>
5.1	Data .....	57
5.2	Vývoj sněhové pokrývky .....	57
5.3	Fáze sněhové pokrývky, vliv teploty .....	61
<b>6</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>Seznam grafů</b> .....	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>Seznam literatury</b> .....	<b>68</b>

---

# 1 Úvod a cíle

Sněhová pokrývka ve vysokohorských povodích je významný prvek hydrologického režimu. Voda z tání sněhové pokrývky tvoří v závislosti na ročním období 10 až 40 % celkového odtoku z Vysokých Tater. Vodní zdroje v horských oblastech jsou a budou v nadcházejících desetiletích vystaveny dramatickým změnám v důsledku probíhajících klimatických změn. Dopad těchto změn je obzvláště kritický pro citlivé horské systémy, protože představují vodní věže, které jsou zdrojem vody pro pitnou a průmyslovou vodu, zavlažování, vodní energii a částečně také pro rekreační účely (Messerli, 2004).

Cílem této práce je porozumět procesu tvorby a ablace sněhové pokrývky, analyzovat její vývoj v posledních dvou dekadách a zjistit, zdali je na vývoji možné pozorovat trend, který by mohl být způsoben probíhající klimatickou změnou. Liší se vývoj ve výškových pásmech a v alpském povodí? Jak přesná jsou data z dálkového průzkumu země v porovnání s měřenými hodnotami?

Vývoj je analyzován pomocí dálkového průzkumu země programem MODIS. Sledovanou oblastí jsou Vysoké Tatry, nejvyšší část Karpat, ve které pramení řeky Bílý Váh a Poprad. Pro porovnání je vybráno alpské povodí Velké Studené doliny v západní části Vysokých Tater.

## 2 Tvorba a vývoj sněhové pokrývky v horském prostředí

Sněhová pokrývka je větší množství sněhu nahromaděné na povrchu země. Sníh se tvoří v mracích, které přesahují úroveň nasycení za teploty nižší než 0 °C. Přechlazené vodní kapičky vznikají kondenzací vodní páry na kondenzačních jádrech, což mohou být prachové půdní částice, sůl a jiné znečištění. Drobné ledové krystalky se také tvoří v mracích přesycených vodou samovolným mrznutím kapiček vody, sublimací vodní páry na mrznoucích jádrech a namrznáním kapiček na jádrech. Vodní pára se váže na krystaly a ty tak rostou, dokud je v mraku dostatek vodní páry nebo dokud nedorostou do velikosti, kdy na ně začne působit gravitační usazování a vypadnou z mraku (DeWalle, Rango, 2008).

Podle teploty a stupně nasycení se liší typy sněhových krystalů. Teplota rozhoduje především o tom, zda budou sněhové krystaly deskové nebo sloupcové, zatímco nasycení rozhoduje o složitosti struktury (Libbrecht, 2005). Sněhové krystaly podléhají přeměně,



---

čímž mění svůj tvar. Přeměny sněhové pokrývky jsou řízeny dvěma vzájemně se ovlivňujícími procesy, usazováním sněhu a metamorfózou sněhu. Usazování je způsobeno hmotností horních vrstev sněhu. Metamorfóza závisí na proměnných jako je teplota, teplotní gradient a obsah kapalné vody v sněhu. Usazování a metamorfóza jsou zásadní jevy, protože většina fyzikálních vlastností sněhu silně závisí na hustotě sněhu a na typu a velikosti zrn tvořících sněhovou vrstvu, které se těmito přeměnami změní (Pomeroy, Brun, 2001).

Na proces vývoje sněhové pokrývky mají hlavní vliv tyto faktory:

- Geomorfologické podmínky – nadmořská výška, sklon a orientace svahů, zastínění
- Meteorologické podmínky – teplota, srážky, radiace, směr a rychlost větru
- Struktura vegetace

Vývoj sněhové pokrývky můžeme dělit na fázi akumulace a ablace, které se mohou vzájemně prolínat.

## **2.1 Akumulace sněhové pokrývky**

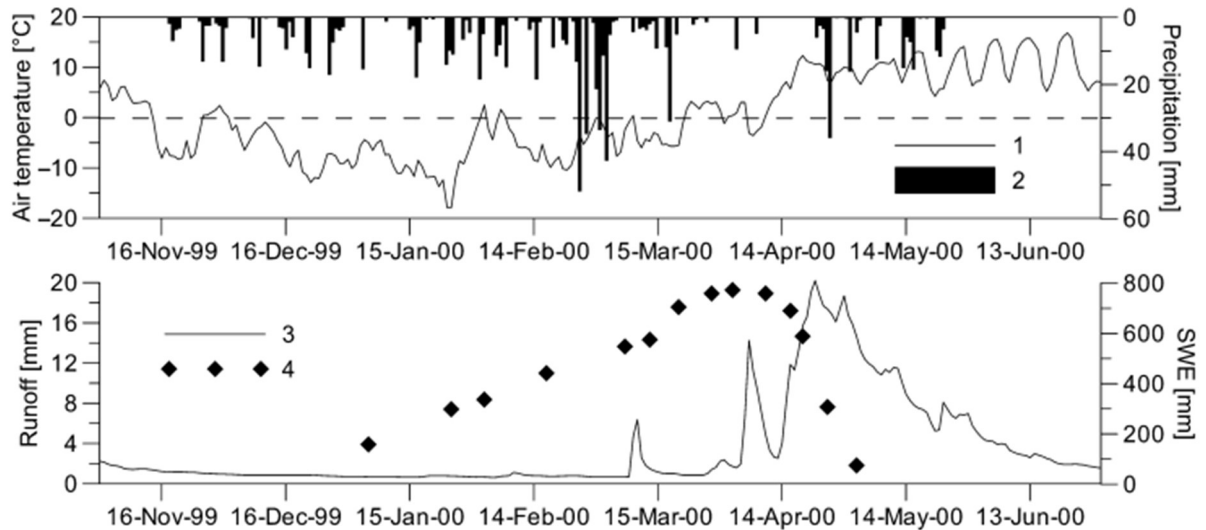
Sněhová pokrývka se začíná akumulovat v závislosti na teplotě, nadmořské výšce a množství srážek. Pro vypadávání sněhových srážek jsou potřeba teploty nižší než 0 °C. Pokud vypadávají sněhové vločky, ale zemský povrch má teplotu vyšší než 0 °C, dojde po kontaktu s povrchem k okamžitému tání. V rámci akumulace dochází také k přeměně sněhové pokrývky popsané výše. Na ukládání sněhové pokrývky má nejvýznamnější vliv sklon svahů a vítr. Přestože sněhové vločky vypadávají z mraku rovnoměrně, působením větru jsou redistribuovány. V místech, kde proudění zpomaluje se sníh ukládá do závějí, zatímco v oblastech s rychlejším prouděním eroduje, podobně jako sediment v řece. Při prudkém sklonu svahů může dojít k přemístění sněhu pomocí laviny z vrcholů do údolí. V nižších nadmořských výškách má na akumulaci sněhu vliv vegetace. Padající sníh může být zachycen v korunách stromů, kde může sublimovat. Jehličnatý les dokáže zachytit až 60 % spadlých srážek (Hasa, 2010, Elder et al., 1991, The COMET® Program, 2011).

---

## 2.2 Ablace sněhové pokrývky

Ablace je proces ubývání sněhové pokrývky vlivem tání nebo sublimace sněhu. Jedná se o proces řízený výměnou energie na rozhraní sníh/vzduch a sníh/půda. Energie pro tuto výměnu pochází z krátkovlnného záření přímého a odraženého, dlouhovlnného tepelného záření, turbulentního přenosu zjevného a skrytého (latentní teplo), přenosem tepla vyzařovaného zemským povrchem a advekcí při dešti nebo sněžení. Vliv jednotlivých procesů je proměnný, vzhledem ke geomorfologickým a meteorologickým podmínkám. Dominantní zdroj energie podílející se z 60 až 90 % na celkové energetické bilanci je energie pochází ze záření (The COMET® Program, 2011, Elder et al., 1991). Energie ze vstupů vede ke změnám ve struktuře sněhu a zvýšení teploty na 0 °C a více, které je následováno táním a odtokem vody z tajícího sněhu (Holko et al., 2011).

Proces tání můžeme dělit na tři fáze. První fáze obvykle přichází v druhé polovině března či na začátku dubna. Bývá odstartována kapalnými srážkami, které způsobí nepatrný odtok. Dochází k tání sněhové pokrývky v údolích, zatímco ve vyšších horských partiích zůstává sněhová pokrývky beze změn. Odtékající sníh netvoří dominantní složku hydrogramu, tu tvoří stará voda, která se nacházela v povodí před táním sněhu. Druhá fáze je charakterizována krátkou odmlkou odtoku v první polovině dubna, která je způsobena chladným vzduchem. Tento jev je typický pro jarní období ve střední Evropě. Třetí fáze začíná nejčastěji třetí týden v dubnu. K intenzivnímu tání dochází především ve vyšších nadmořských výškách. Tání bývá doprovázeno kapalnými srážkami, podíl tání na odtoku z povodí se zvyšuje. Díky kombinaci srážek a tání se v tomto období vyskytují roční průtoková maxima. V případě nepřítomnosti srážek se řídí odtok teplotou vzduchu a slunečním zářením. Odtok v tomto případě osciluje, protože radiační bilance je ve dne pozitivní a v noci negativní. Odtok je oproti maximální teplotě vzduchu opožděn, velikost zpoždění závisí na intenzitě tání sněhu, charakteristice povodí a datu oscilačního období. Zpoždění v nejvyšších částech Západních Karpat, tedy Tatrách se pohybují od 10 hodin na začátku období tání do 6 hodin na konci období tání. Maximální odtoky se vyskytují v pozdních večerních nebo nočních hodinách (Holko et al., 2011).



Obr. 1 Zobrazení tří hlavních fází tání sněhové pokrývky, povodí v Západních Tatrách, průměrná výška 1500 m n. m., 1 – teplota vzduchu v 1500 m n. m., 2 – srážky v 1500 m n. m., 3 – odtok z povodí, 4 – SWE (vodní hodnota sněhu) v 1500 m n. m (Holko et al., 2011)

### 2.3 Sublimace sněhové pokrývky

Ve fázích akumulace a ablace probíhá také proces sublimace. Jedná se o proces skupenské přeměny, při které se pevná látka tedy sníh mění na plyn, aniž by došlo k tání pevné látky. Tento proces je výrazněji pomalejší než tání kvůli energetické náročnosti, avšak probíhá při teplotách nižších než 0°C. Ve vysokohorských oblastech, kde teploty nestoupají nad bod mrazu se může jednat o jedinou ztrátu sněhové pokrývky. Řídicími mechanismy jsou: dostupná energie pro turbulentní tok, tlak par ve vzduchu nad sněhovou pokrývkou a rychlost a působení větru. Ideální podmínky pro sublimaci jsou teploty kolem 0 °C, slunečné počasí, suchý vzduch a mírný vítr. Studie uvádí že z otevřené planiny za sezónu vysublimuje 10-20 % ročních sněhových srážek. Sníh zachycený ve větvích stromů je intenzivněji vystaven povětrnostním vlivům a přímému záření, než sníh uložený na zemi a také má větší povrch v poměru k objemu. Proto je náchylnější k sublimaci. 30-40 % ročních sněhových srážek spadlých na smrkový porost může sublimovat. Nižší hodnoty sublimace je možné pozorovat pod korunami jehličnatých stromů, a to z důvodu snížení krátkovlnného záření, nižší rychlosti větru, menšího množství srážek, zatímco dlouhovlnné záření a vlhkost jsou vyšší. Za sezónu z pod korun stromů vysublimuje méně než 10 % ročních sněhových srážek. Z hodnot je patrné, že se jedná o významné množství sněhu, se kterým je ve vodní bilanci potřeba uvažovat (Strasser et al., 2008; The COMET® Program, 2011; Sexstone et al., 2018)

---

## 3 Dálkový průzkum zemského povrchu, MODIS

Dálkový průzkum je bezdotykové zaznamenávání informací z elektromagnetického spektra pomocí mechanických, fotografických, číselných nebo vizuálních senzorů umístěných na letadlech či kosmických zařízeních (Fussell, Rundquist, Harrington, 1986)

### 3.1 Vývoj dálkového průzkumu země

Za počátky dálkového průzkumu se dá považovat snímání zemského povrchu fotoaparátem z balonů v 19. století. Velký rozvoj systematického snímání probíhal v období od 1. světové války do období studené války. V období 1. světové války se snímky pořizovaly z vojenských důvodů, avšak po konci konfliktu došlo na civilní využití v oblastech lesnictví, zemědělství a geologii. V období 2. světové války se dálkový průzkum posunul do oblasti infračerveného záření a radarových systémů. Stále se však jednalo o fotografické snímky z vertikální nebo šikmé plochy. První snímek Země z družice byl pořízen 18. srpna roku 1960. V tomto období neexistovala technologie pro přenos dat, a tak byla kazeta se snímky Země po skončení mise vyhozena z družice a zachycena letadlem před dopadem do oceánu. NASA zahájila svůj program Landsat v roce 1972 vypuštěním družice Earth Resources Technology Satellite 1 (ERTS 1), později přejmenovanou na Landsat 1. Landsat je nejdéle fungující program družicového dálkového průzkumu Země, který v letošním roce oslavil 50 let. Za tu dobu bylo vypuštěno 9 družic. Na snímcích Landsat nejsou vidět jednotlivé domy ale velké objekty ano, toto rozlišení je dostatečné pro globální pokrytí, ze kterého je možné pozorovat probíhající procesy. Dalšími programy jsou francouzský SPOT, americký NOAA, indický program IRS a komerční IKONOS a Quickbird. Některé systémy dnes disponují rozlišením pixelů až 1 m (Horning, McPhearson, Wallace, 2009).

Mezi dnes nejčastěji používané technologie patří hyperspektrální senzor, který pořizuje obrazové záznamy daného území ve velmi úzkých na sebe navazujících intervalech spektra v oblasti viditelného, blízkého a středního infračerveného elektromagnetického záření. Podle zvolených pásem lze počítat jednotlivé parametry, které nám dávají informace o povrchu země. Tento dálkový průzkum lze využít k měření vlastností vegetace, indexu listové plochy, struktury lesa, sněhové pokrývky, ledu, vodních ploch, složení půdního substrátu, v geologii a dalších odvětvích (Horning, McPhearson, Wallace, 2009, Česká Geologická služba).

---

## 3.2 Možnosti detekce vegetace a sněhové pokrývky

Pro detekci vegetace pomocí dálkového průzkumu země se používají indexy. Nejpoužívanějším z nich je NDVI neboli Normalizovaný diferenční vegetační index. Ten je vypočten na základě rozdílu hodnot blízkého infračerveného záření a viditelného záření. Pigment v rostlinách silně absorbuje viditelné světlo pro proces fotosyntézy, zatímco blízké infračervené světlo odráží. Pokud bude více odraženého záření v blízkých infračervených vlnách a méně ve vlnách viditelných, jedná se o hustou vegetaci. Pokud je rozdíl v intenzitě vlnových délek malý, vegetace je řídká. Hodnoty NDVI se pohybují od -1 do 1, čím vyšší hodnota, tím hustší je vegetace. Hodnoty menší než 0 signalizují neživou přírodu. Další používané indexy jsou LAI neboli index listové plochy, EVI (vylepšený vegetační index), který je méně ovlivněn atmosférou, šumem pozadí korun stromů a je citlivější v oblastech s hustou vegetací, nebo RVI (poměrový index vegetace), který je vypočten z blízkého infračerveného záření a červeného záření (Dušková, 2021; Vávrová, 2019; Duro et al., 2007)

K detekci sněhové pokrývky jsou rovněž využívány indexy, založené na viditelném a infračerveném spektrálním pásmu. Index S3 dobře identifikuje smíšené pixely, a to i pod vrstvou vegetace díky tomu že používá kombinaci blízkého infračerveného pásma, červeného viditelného pásma a krátkovlnného infračerveného pásma. NDCI (Normalizovaný diferenční index mraků) se používá pro detekci mraků, ale také sněhové pokrývky. Používá k tomu červené viditelné pásmo a krátkovlnné infračervené pásmo. NDFSÍ (Normalizovaný diferenční index sněhu v lesích) je index vyvinutý pro lepší detekci sněhu v hustých lesích (Kučera, 2017). Nejpoužívanější index je NDSI (Normalizovaný diferenční sněhový index) který jsme využili po potreby této práce a je podrobněji popsán níže.

## 3.3 MODIS, NDSI

Pro účely této práce byl vybrán produkt MODIS. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) je zobrazovací spektrometr umístěný na družicích Terra a Aqua, který poskytuje dálkové snímky zemského povrchu a mraků. Tento přístroj je používán pro sledování globální vegetace a půdního pokryvu, jejich změn, povrchové odrazivosti, povrchové teploty, sněhové a ledové pokrývky. Spektrometr využívá křížové skenovací zrcadlo, sběrnou optiku a sadu jednotlivých detekčních prvků k získání snímků zemského povrchu a mraků v 36 diskretních úzkých spektrálních pásmech od 0,4 do 14,0  $\mu\text{m}$ . Tyto pásma se dále analyzují, podle požadovaného výstupu. Rozlišení se liší podle spektrálního

---

pásma, v rozmezí od 250 m do 1 km (Hall et al., 2002). Datové produkty týkající se sněhové pokrývky jsou k dispozici v Národním centru dat o sněhu a ledu (NSIDC, ©2022).

K získání dat pro tuto práci jsme využili balíček M\*D10A2 Snow\_Cov\_8\_Day\_500m. Tento balíček vybírá z 8denního pozorování snímek s maximálním zastoupením sněhové pokrývky a nejmenší oblačností, který dále prezentuje 8denní období. V případě, že je po všechny dny přítomna oblačnost, jsou i na finálním snímku zastoupeny pixely oblačnosti. Při nepřítomnosti sněhové pokrývky se zobrazuje snímek s nejmenším pokrytím mraky. 8denní období je zvoleno z důvodu délky opakování pozemní dráhy družice. První snímek je přiřazen k 1. lednu daného roku, dále jsou snímky číslovány v 8denních intervalech. Rozlišení pixelu tohoto balíčku je 500 m (Riggs, 2019).

Algoritmus mapování je automatizován. Jednotlivé pixely mají při výstupu z programu přiřazenou číselnou hodnotu, která charakterizuje typ povrchu. Typ povrchu získáme pomocí výpočtu normalizovaného rozdílového sněhového indexu (NSIDC, ©2022). NDSI popisuje, zda je v pixelu přítomnost sněhové pokrývky. Sníh má obvykle velmi vysokou odrazivost ve viditelné oblasti (VIS) a velmi nízkou odrazivost v krátkovlnném infračerveném pásmu (SWIR), což je vlastnost, která se používá k detekci sněhu při rozlišování mezi sněhem, půdou a většinou typů oblačnosti. Sníh detekujeme pomocí rozdílu odrazivosti pásmem 4 (0,545-0,565  $\mu\text{m}$ ) a 6 (1,628-1,652  $\mu\text{m}$ ) (Riggs, 2019, NSIDC, ©2022).

NDSI je vypočítáno jako (1):

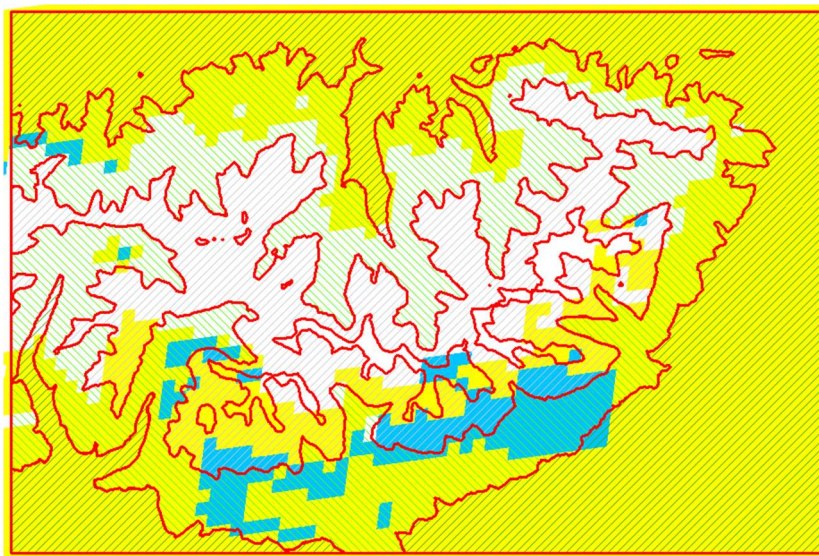
$$NDSI = \frac{\text{pásma 4} - \text{pásma 6}}{\text{pásma 4} + \text{pásma 6}} \quad (1)$$

Pokud je hodnota NDSI > 0,4, pixel bude zobrazen jako sníh. V případě že je NDSI < 0,4 a hodnota NDVI (normalizovaný rozdílový vegetační index) naznačuje, že pixel je zalesněný a zároveň zelené pásmo 4 má minimální odrazivost 0,1 (pro zabránění mapování tmavých lesů jako sníh) je pixel rovněž klasifikován jako sníh. Pokud tyto podmínky nejsou splněny, nejedná se o pixel obsahující sníh (Xin et al., 2012).

Data jsou dostupná od 13.9.2000 do současnosti. Snímky je možné stáhnout do počítače pomocí balíčku v programu R Studio. Dále byly pixely v jednotlivých snímcích převedeny na procentuální zastoupení sněhu, mraků a půdy. Po odstranění chybných snímků, které je popsáno níže, byly pixely pro snazší analýzu převedeny pouze na procenta

---

sněhu a půdy, zastoupení oblačnosti bylo vynecháno. Tyto hodnoty byly analyzovány v programech R Studio a Excel.



Obr. 2 Zobrazení pixelů s přiřazenou hodnotou, bílá barva zobrazuje sníh, modrá oblačnost a žlutá barva půdy, snímek z 21.9.2004

### 3.4 Chyby v důsledku zastínění lesním porostem

Lesní porost zakrývá významnou část oblastí s výskytem sněhové pokrývky a je tak významnou překážkou pro přesný monitoring sněhové pokrývky. Lesy ztěžují dálkový průzkum sněhové pokrývky, zejména pro senzor MODIS se širokým zorným úhlem snímání, protože podíl viditelných mezer skrz lesy se snižuje s rostoucím zenitovým úhlem pohledu. Zenitový úhel je úhlová vzdálenost mezi bodem na nebeské sféře a zenitem, což je polopřímka vedená z místa pozorovatele kolmo vzhůru vůči horizontální rovině (Česká meteorologická společnost, ©2017).

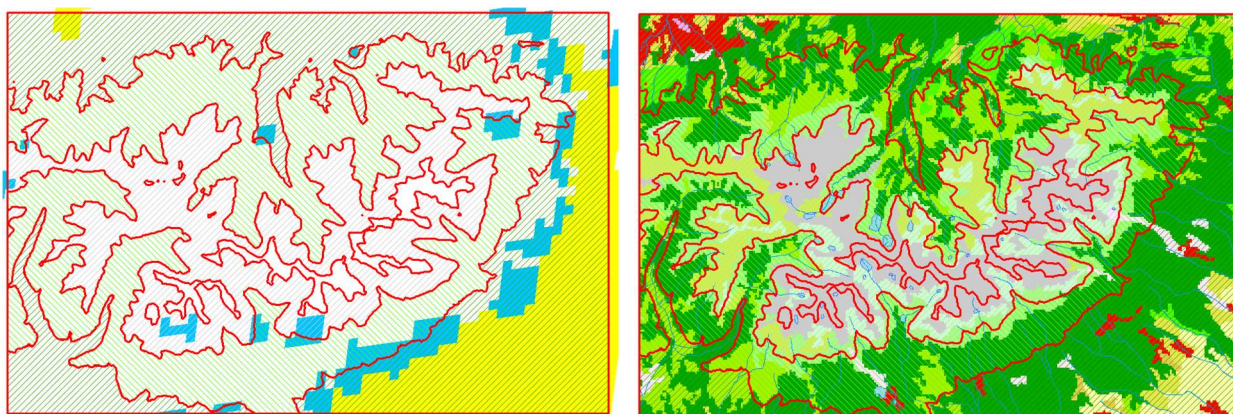
Schopnost detekce sněhové pokrývky klesá s hustotou lesa, která zmenšuje volné plochy mezi stromy. Schopnost detekce sněhové pokrývky klesá také se zenitovým úhlem, který má stejný efekt. Při největším zenitovém úhlu klesá schopnost detekce sněhu až o 50 %. Xin et al., (2012) zjistil, že hodnoty NDSI mění s velikostí zenitového úhlu. Proto mohou produkty MODIS pro sněhovou pokrývku udávat různé hodnoty podílu sněhové pokrývky pro pozorování v rámci různých dnů, i když se sněhová pokrývka výrazně neměnila. Xin et al. (2012) také odhalil korelace mezi NDSI a NDVI v lesích pokrytých sněhem, což je další způsob, jak ukázat silný vliv zenitového úhlu. Při pohledu od nadiru vidíme více stromů a méně sněhu, takže NDSI klesá, zatímco NDVI roste. Lze konstatovat, že



---

díky této provázanosti NDSI a NDVI není NDSI ideální produkt pro detekci sněhu v zalesněných oblastech. Možností pro eliminaci chyb může být použití dat v rozsahu zenitových úhlů od 0° do 30°, v případech že se v oblasti nachází lesní porost. (Xin et al., 2012).

Neznáme hodnoty zenitových úhlů použitých snímku, avšak při porovnání využití území a pozorovaných snímků se zdá, že MODIS nemá problém s detekcí sněhové pokrývky pod lesním porostem, a to ani v jarním období, kdy se nachází sněhová pokrývky pouze pod stromy a není již zachycena ve větvích viz Obr. 3 a 4.



Obr. 3 a 4 Vlevo zobrazení pixelů, bíle sněhová pokrývky, modře oblačnost a žlutě půda, 21. března 2021, vpravo využití půdy, tmavě zelená jehličnatý les, červeně označena výšková pásma

### 3.5 Chyby v důsledku zastínění mraky, jejich eliminace

Algoritmus provádí screening mraků prostřednictvím pásma 6. V krátkovlnném infračerveném pásmu zůstává odrazivost většiny mraků vysoká, zatímco odrazivost sněhu klesá k nule. NDSI tak účinně rozlišuje většinu mraků od sněhu, až na výjimky v podobě vysoké oblačnosti, která obsahuje led, který může být chybně zmapovány jako sníh. Výhodou pro eliminaci chyb z oblačnosti je, že algoritmus pracuje binárně. Tedy rozhoduje pouze zda je v pixelu obsažen sníh nebo ne (Hall et al., 2002).

Použitý balíček dobře minimalizuje zastínění mraky tím, že vybírá snímek s největší sněhovou pokrývkou a nejmenší oblačností. I přes to se však vyskytují snímky s významným zastoupením mraků. Nejproblematictější jsou období s dlouhotrvající oblačností, které

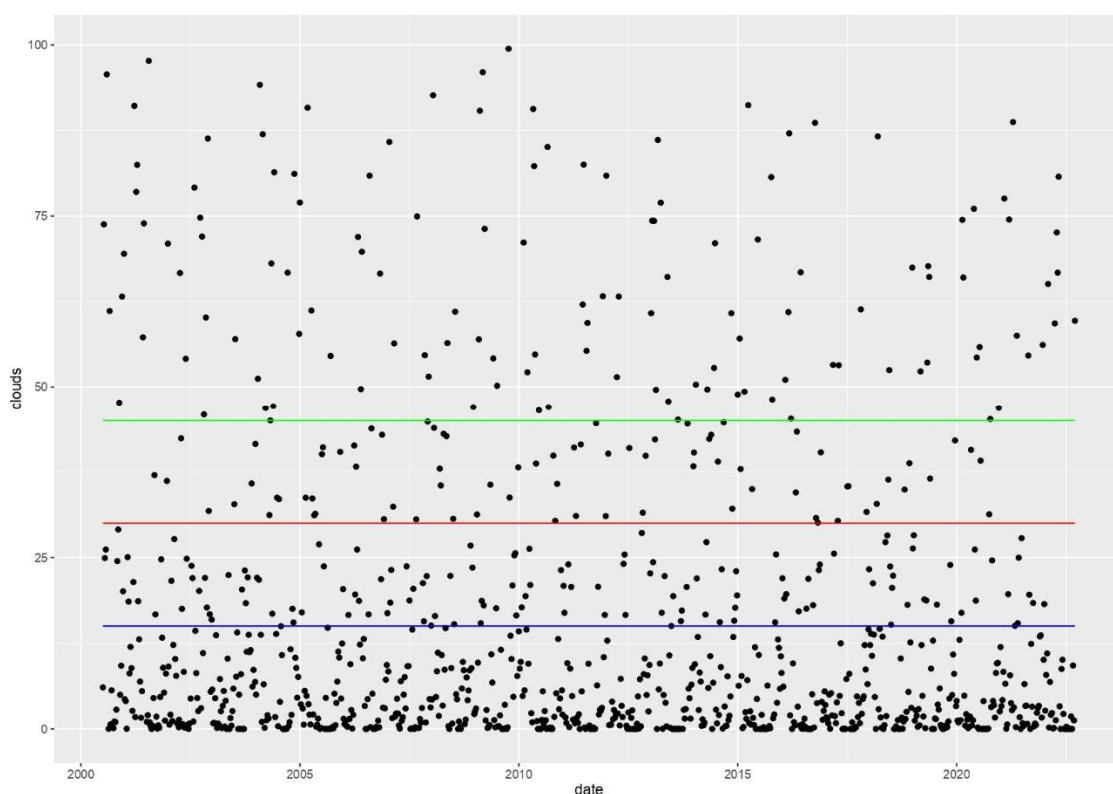


---

mohou zakrýt vývoj sněhové pokrývky po delší období. Může takto dojít k ztrátě dat například z celého období tání.

Z důvodu zvýšení přesnosti, byly snímky s procentuálním zastoupením mraků v snímku větší než 30 % odstraněny z dalších výpočtů. Hranice 30 % byla zvolena po analýze trendů v časových řadách a množství nahrazených snímků hodnotou NA (Not Available).

Byly testovány hranice 15 %, 30 % a 45 %. Při použití 15 % hranice dojde k nahrazení 344 snímků, což odpovídá 34 % snímků z celkového počtu. 30 % hranice nahradí 207 snímků, tedy 20 % z celku. Hranice 45 % eliminuje 129 snímků, které se rovnají 13 % z celkového počtu.

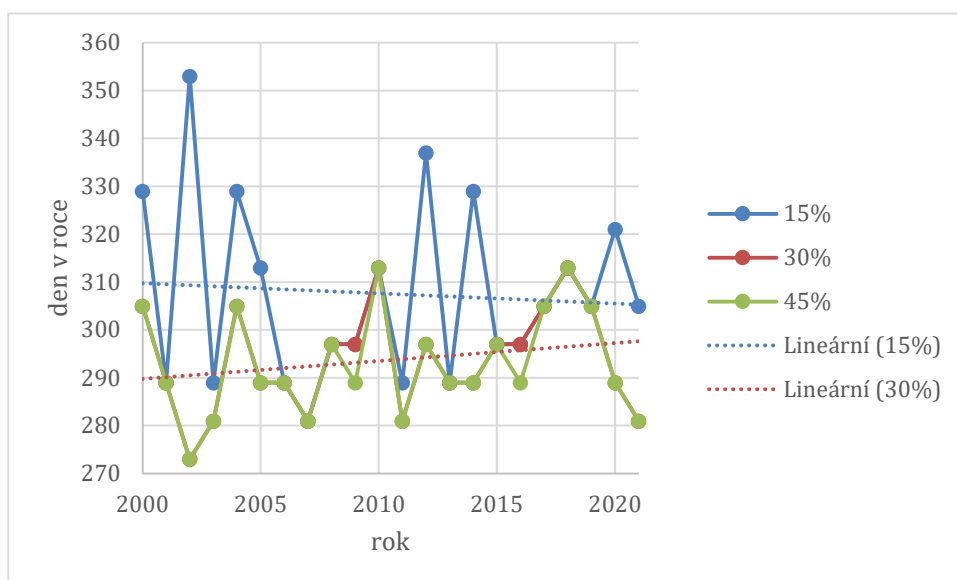


Graf 1: Procentuální pokrytí snímku oblačností, modře zobrazena hranice 15 %, červeně 30 % a zeleně 45%

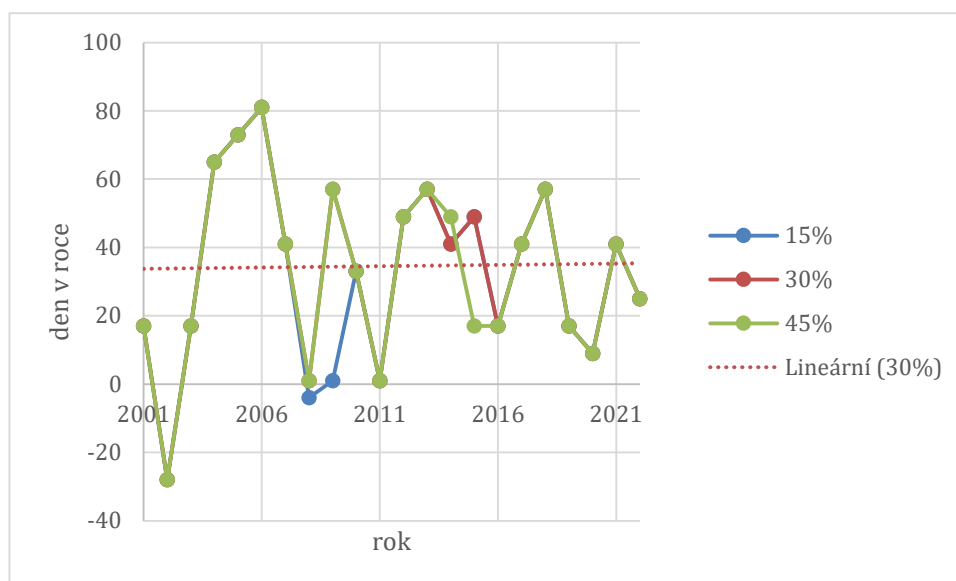
Pro vyhodnocení, zdali dojde k odlišnému trendu při změně hranice byly analyzovány následující parametry: poslední den se sněhovou pokrývkou na celém území, první a poslední den se sněhovou pokrývkou na minimálně 10 % plochy a z toho vyplývající doba pokrytí sněhem na minimálně 10 % plochy. Při změně hranic u posledního dne s maximální sněhovou pokrývkou a nedojde k žádné výrazné přeměně výsledků, stejně jako u posledního

dne s pokrývkou na více jak 10 % plochy. U prvního dne se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy dojde při změně hranice na 15 % k oddálení počátku pokrytí sněhem v průměru o 10 dní oproti výsledkům s 30 % a 45 % hranicí. Odstraněním snímků s 15 % hranicí totiž eliminujeme některé snímky které již obsahovali dostatečné množství sněhu pro splnění podmínky i přes přítomnost mraků. Dochází zde k změně trendu z rostoucího na klesající, avšak oba trendy jsou statisticky nevýznamné s 95 % pravděpodobností. Díky této změně dojde i k transformaci doby pokrytí sněhem na více jak 1/10 plochy, a to k zkrácení období o přibližně 10 dní. K změně trendu zde nedochází, jedná se o statisticky nevýznamné trendy dle Mann Kendalova testu na hladině významnosti  $p=0,05$ .

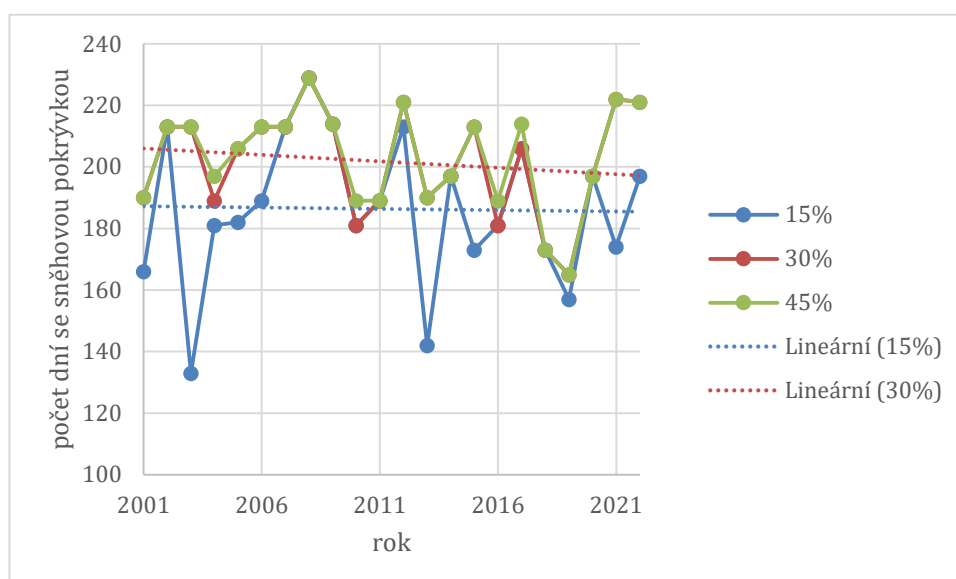
Touto analýzou docházíme k závěru, že nejvhodnější se jeví použití 30 % hranice, při níž eliminujeme významný počet chybných snímků, avšak nedochází k významné negativní transformaci výsledků.



Graf 2: Zobrazení prvních dnů v roce, kdy se nachází sněhová pokrývka na více jak 10 % plochy domény



Graf 3: Zobrazení posledních dnů v roce se sněhovou pokrývkou na více jak 10 % plochy sledované oblasti



Graf 4: Zobrazení doby pokrytí sněhem na více jak 10 % plochy oblasti s trendy

K transformaci výsledků by z důvodu nedostatečného počtu snímků mohlo dojít i v rámci jednotlivých období. Byla proto provedena analýza snímků za období, po které se nachází sněhová pokrývka na více než 10% plochy celé oblasti, tedy zimní období a letní období, kdy se na území nenachází sníh. Ukázkový výpočet je zobrazen v Tab. 1. chybné snímky obsahující oblačnost na více jak 30 % plochy a mají tak přiřazenou hodnotu NA. Vyhovující snímky neobsahující oblačnost na více než 30 % plochy. Evaluace velikosti vzorku byla vypočtena podle vzorce (2). Pokud je hodnota evaluace velikosti vzorku menší než 90 %, je období považované za nevhodné pro další použití a bylo z dalších analýz

odstraněno. Tato analýza byla provedena zvlášť pro všechny sledované domény, odstraněná období jsou zobrazena v Tab.1.

$$E_{\text{vaulace}} = \frac{\frac{n_i}{l_i}}{\frac{n}{l}} \quad (2)$$

- $n$  počet vyhovujících snímků [ks]  
 $l$  délka období [dny]

Tab. 1 Analýza snímků MODIS pro zimní období

start (doy)	konec (doy)	délka období (dny)	celkový počet snímků	počet chybných snímků (NA)	počet vyhovujících snímků	evaluace velikosti vzorku
2000_305	2001_129	190	24	6	18	95.8%
2001_289	2002_137	214	27	4	23	108.7%
2002_273	2003_121	214	27	5	22	104.0%
2003_281	2004_105	190	24	6	18	95.8%
2004_305	2005_145	206	26	9	17	83.5%
2005_289	2006_137	214	27	4	23	108.7%
2006_289	2007_137	214	27	6	21	99.3%
2007_281	2008_145	230	29	10	19	83.6%
2008_297	2009_145	214	27	7	20	94.5%
2009_297	2010_113	182	23	3	20	111.2%
2010_313	2011_137	190	24	3	21	111.8%
2011_281	2012_137	222	28	7	21	95.7%
2012_297	2013_121	190	24	9	15	79.9%
2013_289	2014_121	198	25	5	20	102.2%
2014_289	2015_137	214	27	8	19	89.8%
2015_297	2016_113	182	22	4	18	100.0%
2016_297	2017_137	206	26	5	21	103.1%
2017_305	2018_113	174	22	3	19	110.5%
2018_313	2019_113	166	21	3	18	109.7%
2019_305	2020_137	198	25	4	21	107.3%
2020_289	2021_145	222	28	5	23	104.8%
2021_281	2022_137	222	28	6	22	100.2%
<b>PRŮMĚR</b>		202.4	25.5	5.5	20.0	

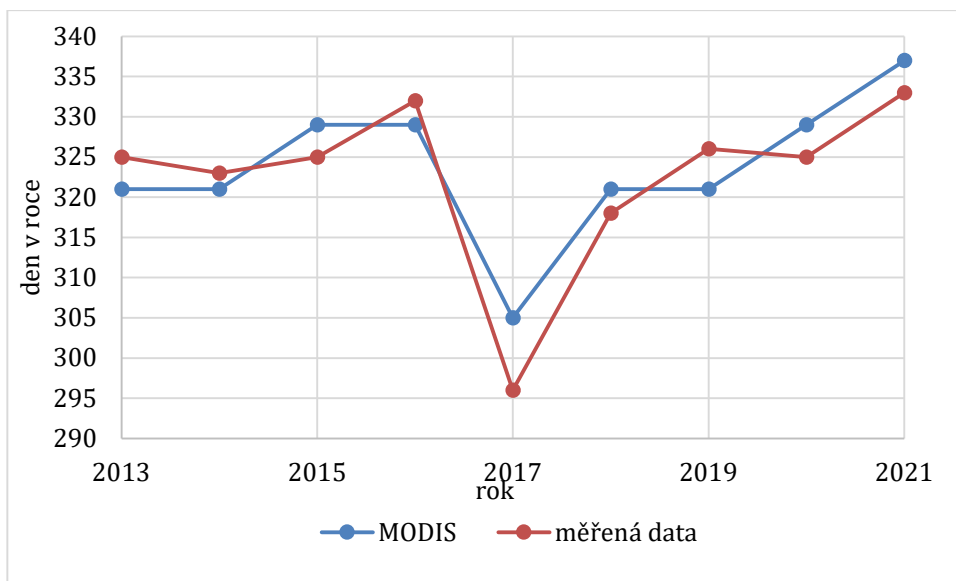
Tab. 2 Odstraněná zimní období pro dané domény

odstraněná zimní období	Vysoké Tatry	Pásmo 1	Pásmo 2	Pásmo 3	Pásmo 4	Studená dolina
	2004-2005	2004-2005	2000-2003	2007-2008	2000-2001	2000-2001
	2007-2008	2007-2008	2007-2008	2009-2010	2007-2008	2003-2004
	2012-2013	2008-2009	2012-2013	2012-2013	2009-2010	2005-2006
	2014-2015	2012-2013			2012-2013	2012-2013
	2015-2016				2015-2016	

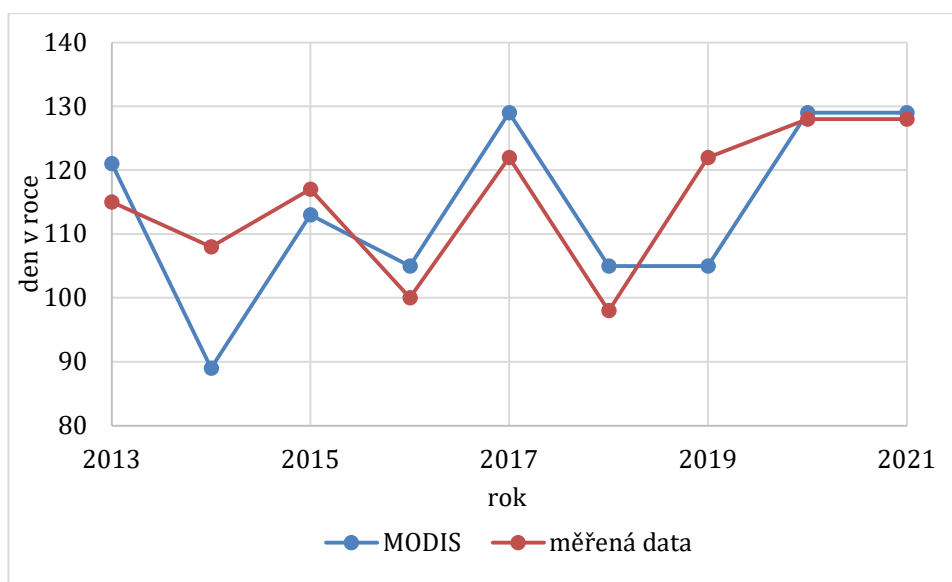
### 3.6 Porovnání dat dálkového průzkumu s pozemním měřením sněhové pokrývky

Pro zjištění přesnosti snímků MODIS zaznamenat sněhovou pokrývkou bylo provedeno porovnání jednoho pixelu MODIS v oblasti Skalnatého plesa na volném prostranství s údaji o výšce sněhové pokrývky měřené na stanici Skalnaté pleso. Komparace dat byla provedena pro období mezi roky 2013-2021. Je možné porovnat pouze zda se na území sníh vyskytuje či ne. Data o množství sněhu nejsou z MODISu dostupná. Porovnávány byly první a poslední dny se sněhovou pokrývkou. Byla snaha porovnat výskyt sněhu v letních měsících, avšak zdá se, že MODIS špatně reaguje na nesouvislou sněhovou pokrývkou a sníh nebyl na snímcích zaznamenán.

Velmi dobrou shodu výsledků můžeme pozorovat jak u prvního, tak posledního dne se sněhovou pokrývkou. U obou typů analyzovaných hodnot mezi sebou data vykazují statisticky významnou korelaci viz Grafy X a Y. Rozdíl mezi daty je u prvního dne se sněhovou pokrývkou vždy menší než 8 dní, což je časová rozlišovací schopnost dat MODIS. U posledního dne se sněhovou pokrývkou dochází ve dvou případech k výraznější odchylce, která je způsobena zastíněním země oblačností při reálném posledním dni se sněhovou pokrývkou. Tento den je proto na datech MODIS zobrazen dříve než ve skutečnosti. Zbylé dny mají opět rozdíl menší než 8 dní, fungují tedy korektně.



Graf 5: Porovnání měřených hodnot s daty MODIS, první den se sněhovou pokrývkou



Graf 6: Porovnání měřených hodnot s daty MODIS, poslední den se sněhovou pokrývkou

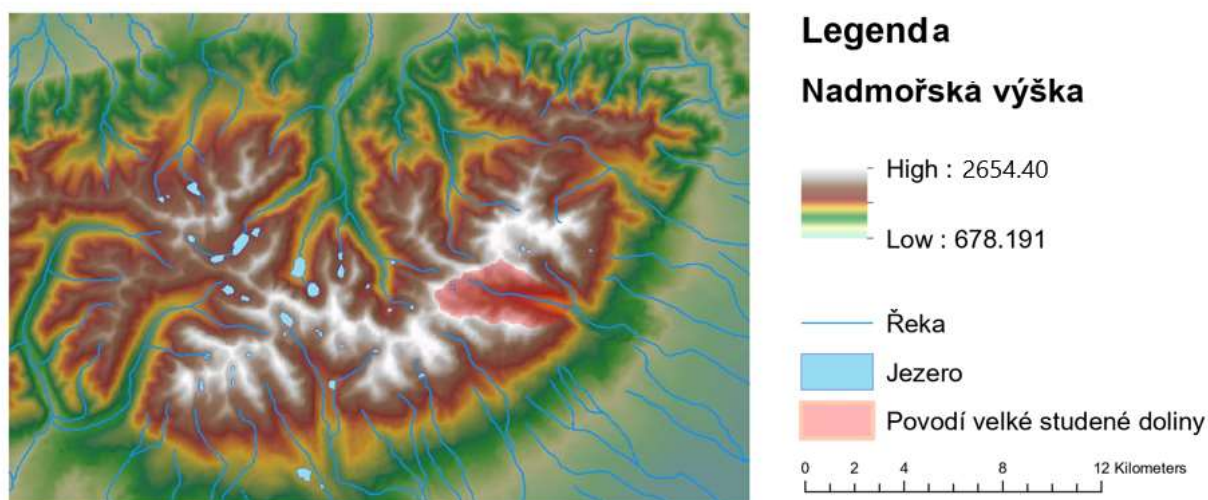
---

## 4 Analýza dat dálkového průzkumu země

V této kapitole jsou podrobněji popsány časoprostorové vývoje sněhové pokrývky v povodí Vysokých Tater pro období 2000-2021, jak pro celou oblast, tak pro jednotlivá výšková pásma a alpské povodí Velké Studené doliny.

### 4.1 Sledovaná oblast Vysoké Tatry

Pro analýzu vývoje sněhové pokrývky ve vysokohorském prostředí Vysokých Tater byla vybrána obdélníková oblast o délce strany 30 000 m a šířce 20 000 m. Sledovaná plocha pokrývá celé pohoří Vysokých Tater, které jsou součástí Karpatského oblouku. Na východě začíná oblast u Ľaliového sedla a Kôprové doliny, odkud se táhne na západ k hranicím Tatranského národního parku. Na severu prochází hranice od Zakopaného k údolí řeky Biela. Jižní hranice oblasti se nachází na úrovni obce Štrbské pleso. Částí hlavního hřebene prochází státní hranice mezi Polskou a Slovenskou republikou.



Obr. 4 Popisovaná oblast Vysokých Tater, červeně vyznačena Velká Studená dolina

Nejnižší bod oblasti je ve výšce 678 m n. m. Nejvyšší bod oblasti odpovídá výšce nejvyšší hory Karpat – Gerlachovskému štítu, který dosahuje výšky 2654 m n. m. Na sledovaném území se nachází nejvyšší vrcholky Tater, například Lomnický štít, Ľadový štít, Zadní Gerlach, Pyšný štít, Ľadová kopa a mnoho dalších. Vrcholky hor jsou špičaté a skalnaté. Průměrný sklon svahů v oblasti Vysokých Tater je 25°43' (Veverka et al., 1951).

Ve Vysokých Tatrách převažuje mírné atlantické kontinentální klima. Nejteplejší měsíc je červenec, nejchladnější pak leden. Průměrná teplota za období mezi roky 1991-2006



---

naměřená ve stanici Skalnaté pleso je 2,4 °C (Ostrožlík). Průměrný roční srážkový úhrn ve stanici Štrbské pleso je 1010 mm (Majerčaková et al., 2007). Srážkové úhrny jsou obecně vyšší v severní části pohoří, protože hory tvoří přirozenou bariéru vzduchu, přicházejícího ze severozápadu a západu. V některých údolích mohou srážkové úhrny dosahovat více než 2000 mm za rok. Srážkový gradient vzrůstá s každými 100 m o 50 mm, teplotní gradient klesá o 0,6 C na 100 m (Křeček et al., 2006). Srážkově nejbohatší měsíc je měsíc červenec s 16 % celkového ročního úhrnu. Nejsušším měsícem je únor, kdy srážky dosahují přibližně 4,5 % z celkového ročního úhrnu (Lacika et al., 2007). Sněhová pokrývka leží v polohách vyšších než 1000 m n. m. od konce října, přibližně do 20. dubna. Průměrný počet dní se sněhovou pokrývkou je na Štrbském plese 155,3 dní, v nižších polohách jako Poprad 86,4 dnů (Kunský, 1974).

Tekoucí i stojaté vody jsou napájeny atmosférickými srážkami a tajícím sněhem. Prameny se nachází buď vysoko v dolinách nebo na úpatí Vysokých Tater. Prameny vysoko v horách jsou chladnější, protože vznikají převážně z tajícího sněhu. Jejich vydatnost je proto proměnná. Prameny na úpatí jsou teplejší a stálější, voda v nich pochází z dešťů a sněhového tání. Voda se pod úpatí dostala podzemním prouděním. Pod Tatrami se nachází minerální prameny, voda v nich pochází z hlubších vrstev. Vysoké Tatry tvoří hranici úmoří Černého a Baltského moře. Tato hranice se nachází u Štrbského plesa. Do Černého moře odvádí vodu řeka Váh a dále pak Dunaj, do moře Baltského odtéká vody skrz Poprad, který dále ústí do řeky Visly (Veverka et al., 1951).

Odtok z vysokohorských povodí je závislý na teplotním režimu. Nejmenší průtoky se vyskytují v Tatranských tocích v zimních měsících, kdy většina srážek vypadává ve formě sněhu. K navyšování průtoků dochází v dubnu, kdy se otepluje a začíná tání sněhové pokrývky. Kulminace průtoků přichází na začátku léta, v období nejvyšších teplot. Toto je nejvýznamnější rozdíl oproti tokům pramenicím mimo vysokohorská povodí, která kulminují již na jaře. (Lacika et al., 2007).

Na území Vysokých Tater se nachází přibližně 100 jezer neboli ples glaciálního původu. Jejich počet se snižuje, a to z důvodu zasypávání kamennou sutí. Tento jev je dobře patrný například na Dlhém plese pod Gerlachovským štítem, kde je dlouhá strana jezera postupně zasypávána. Hloubka jezera je většinou tím hlubší, čím je jezero větší. Plošně největší jezera se nachází na polské straně Vysokých Tater, jako Wielki staw, Morskie Oko a další. Na



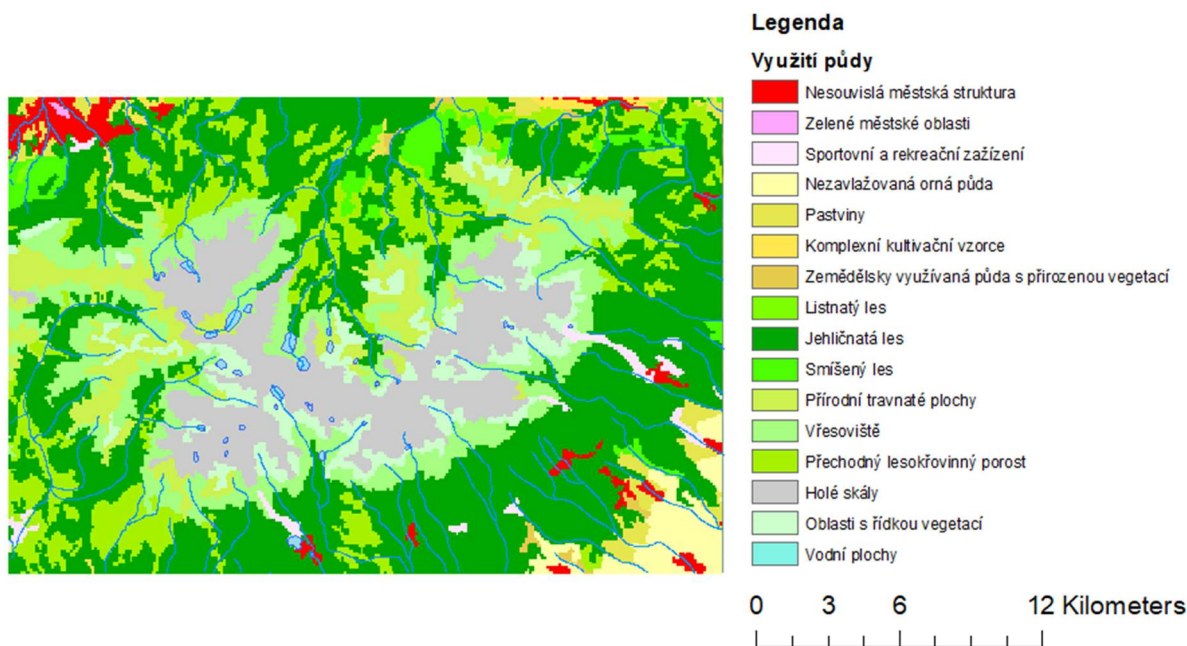
---

slovenské straně je největší Štrbské pleso, Velké Hincovo pleso a Zelené pleso pod Krivánem (Veverka et al., 1951).

Terén oblasti je z 40 % pokryt jehličnatým lesem, z 12 % vřesovišti, 12 % lesokřovinovým porostem a z 12 % holými skalami. Zbylé typy půdního pokryvu jsou zastoupeny v jednotkách procent viz. Tab. 3. Rostlinná patra lze rozdělit podle výšky. Nejnižší se nachází podhorské, submontánní pásmo, které zasahuje do výšky 800 m n. m. Toto pásmo bylo odlesněno pro zemědělství, případně druhotně zalesněno smrčiny a bory. Výše se nachází horské montánní pásmo, které sahá k horní hranici lesa, přibližně do 1500 m n. m. Toto pásmo je porostlé bučinami s jedlím a smrkem. Stromy ojediněle rostou i ve vyšších nadmořských výškách, jsou zde ničeny námrazou a lavinami. Do 1800 m n. m. zasahuje pásmo subalpínského, ve kterém je zastoupena především kleč. Výše se nachází pásmo alpského s horskými lučinami, které sahají až do výšky 2300 m n. m. Dále už se nachází pouze skály s chomáči kvetoucích rostlin v subniválním patře (Kunský, 1974).

Tab. 3 Využití půdy pro oblast Vysokých Tater

Využití půdy	% zastoupení
Jehličnatý les	40.77
Vřesoviště	12.36
Holé skály	12.26
Přechodný lesokřovinový porost	11.4
Přírodní travnaté plochy	6.99
Oblasti s řídkou vegetací	5.34
Nezavlažovaná orná půda	2.43
Smíšený les	2.39
Nesouvislá městská struktura	2.19
Pastviny	1.75
Sportovní a rekreační zařízení	1.05
Komplexní kultivační vzorce	0.42
Zemědělsky využívaná půda s významnými plochami přirozené vegetace.	0.36
Vodní plochy	0.22
Zelené městské oblasti	0.04
Listnatý les	0.04



Obr. 5 Využití půdy v oblasti Vysokých Tater, 2019

19. listopadu roku 2004 byla jižní strana Vysokých Tater zasažena vichřicí Alžběta, která způsobila ekologickou katastrofu. Vichřice zasáhla území o velikosti 12 600 ha od Podbanské ke Kežmarskému Žlabu. Došlo k poškození 3 milionů m<sup>3</sup> smrkového dřeva, které nebylo možné rychle vytěžit a došlo tak k množení kůrovce, který dokonal zkázu oslabeného lesního porostu. Kůrovec zasáhl od roku 2005 více jak 2 miliony stromů. Tatranský národní park vysadil v letech 2004-2013 5 milionů stromů. Nyní se na zasaženém území již vyskytuje mladý les (Lompech, 2018).

Pro podrobnější analýzu vývoje sněhové pokrývky v sledované doméně byla oblast rozdělena do 4 výškových pásem viz tabulka 4. Výška jednoho pásma je 500 m.

Tab. 4 Rozdělení výškových pásem

	nadmořská výška (m n. m.)	plocha (km <sup>2</sup> )
pásma 1	676–1176	227.4
pásma 2	1176–1676	218.4
pásma 3	1676–2176	132.5
pásma 4	2176–2654	18.3

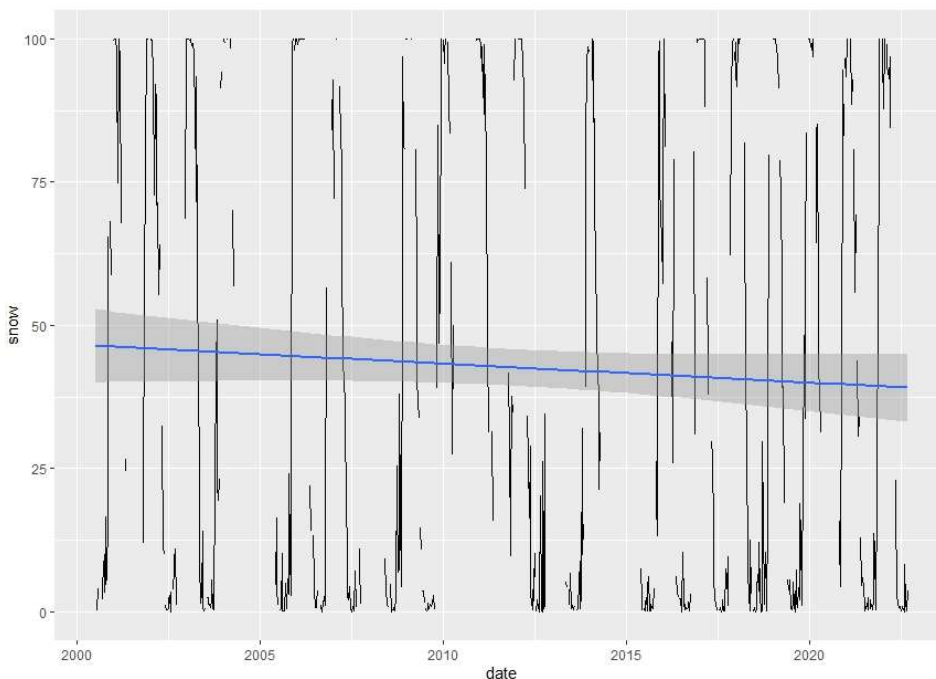


Obr. 6 Rozdělení domény do jednotlivých pásem dle výšky

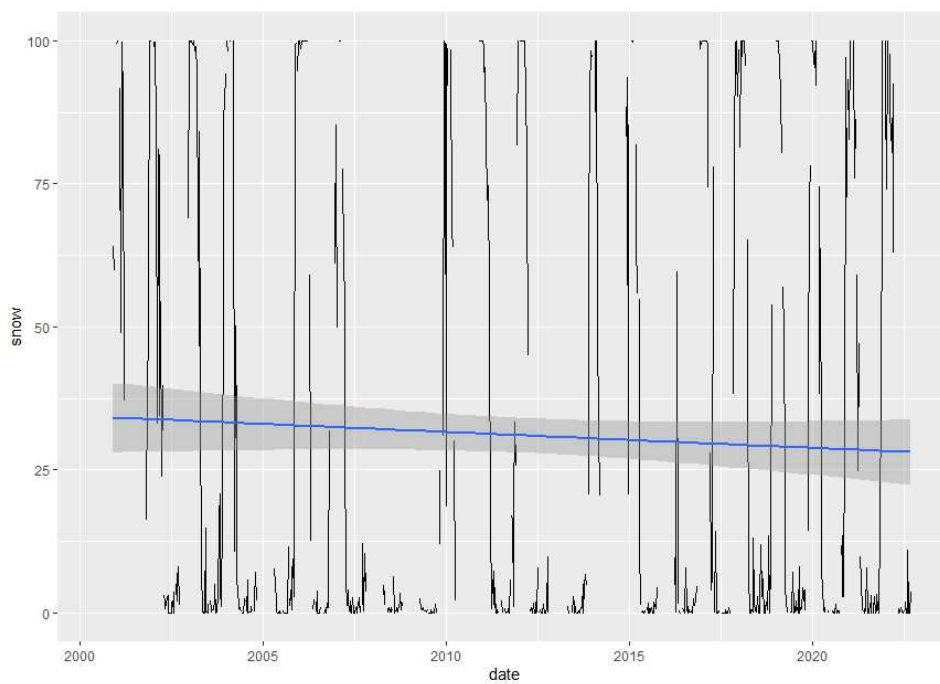
---

### 4.1.1 Posouzení trendu vývoje sněhové pokrývky

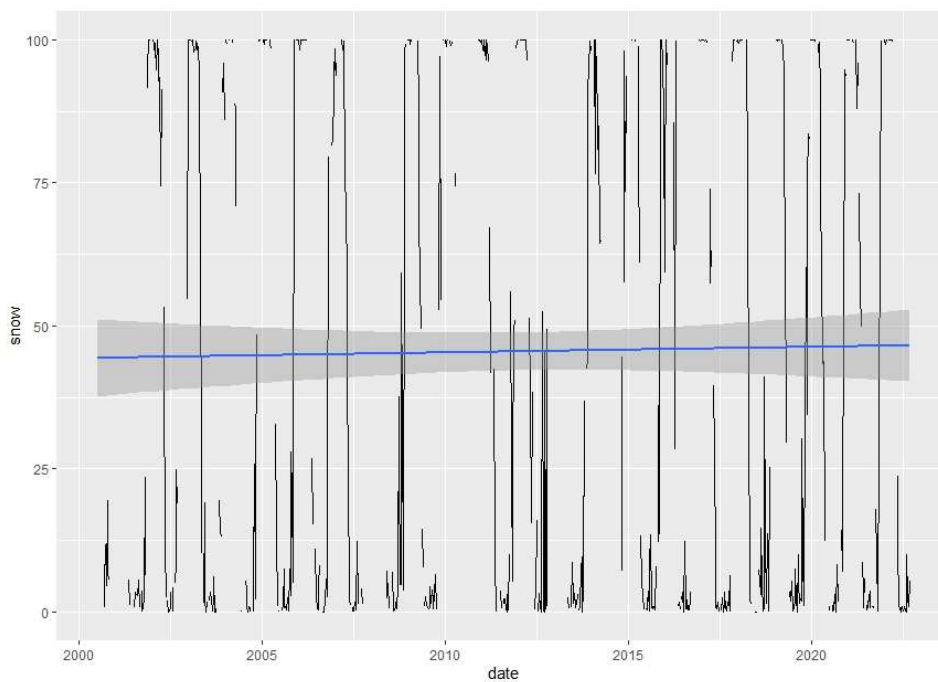
Stažená data z programu MODIS byla očištěna o snímky s významným zastoupením mraků a přepočtena na procentuální pokrytí sledované oblasti sněhem. Časový vývoj pokrytí sněhem celé oblasti je zobrazen na Grafu 7. Můžeme vidět, že z důvodu odstranění snímků s oblačností větší než 30 %, dostáváme výrazné časové mezery, díky kterým není vždy přesně možné analyzovat vývoj. Dle Mann Kendallova testu není z dlouhodobého hlediska možné pozorovat statisticky významný trend s 95 % pravděpodobností. Je však možné pozorovat roky sněhově bohatší a chudší. Podrobněji lze tento jev analyzovat na délce doby pokrytí sněhem. Dále můžeme pozorovat, že i v letních měsících dochází k výskytu sněhové pokrývky na části území.



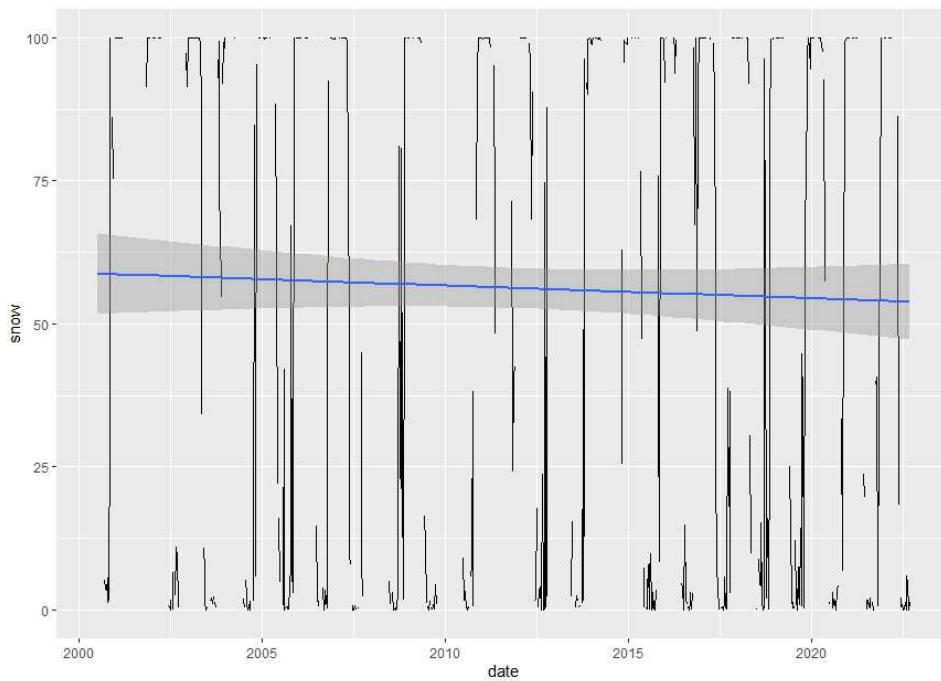
Graf 7: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, celá oblast



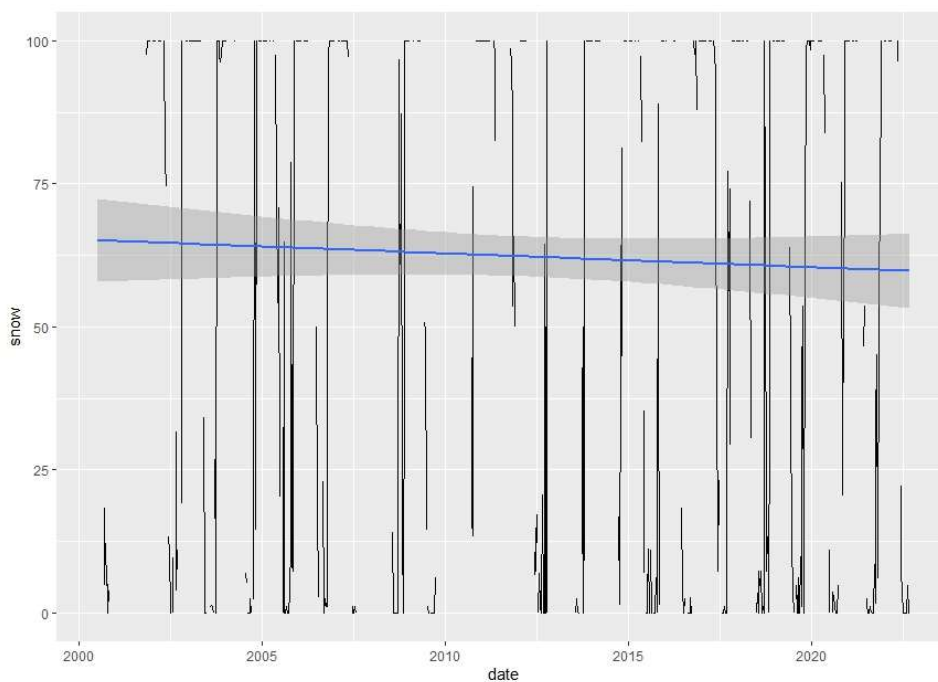
Graf 8: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, pásmo 1



Graf 9: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, pásmo 2



Graf 10: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, pásmo 3



Graf 11: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, pásmo 4

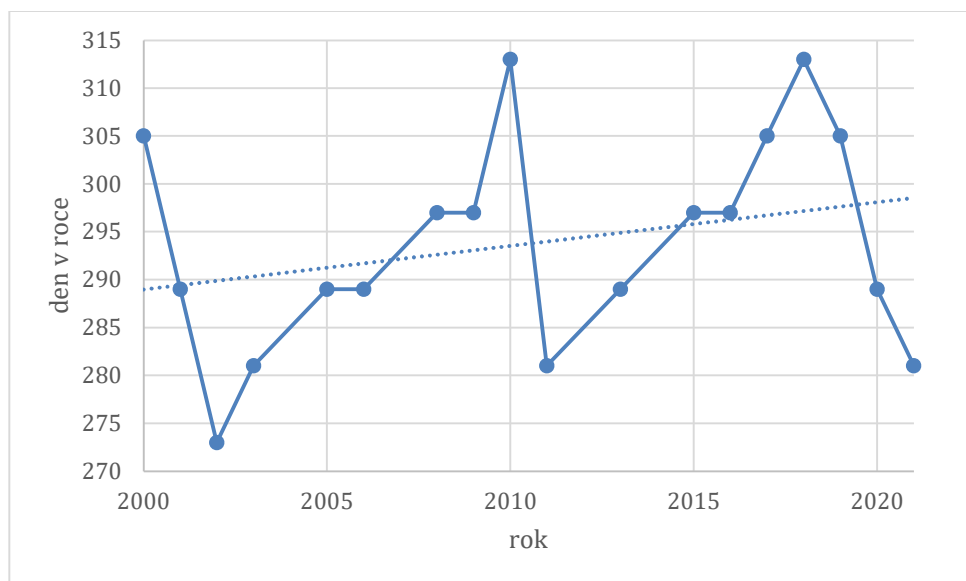
Na Grafech 8 až 11 můžeme pozorovat časový vývoj NDSI v jednotlivých výškových pásmech. Z grafů je dobře patrné, že s nárůstem nadmořské výšky se prodlužuje doba pokrytí sněhem v zimních obdobích a období bez sněhové pokrývky se zkracuje. Pásmo 1 vykazuje statisticky významný klesající trend s 95 % pravděpodobností dle Mann Kendallova testu. Zbylá pásma jsou bez statisticky významného trendu podle stejného testu.

---

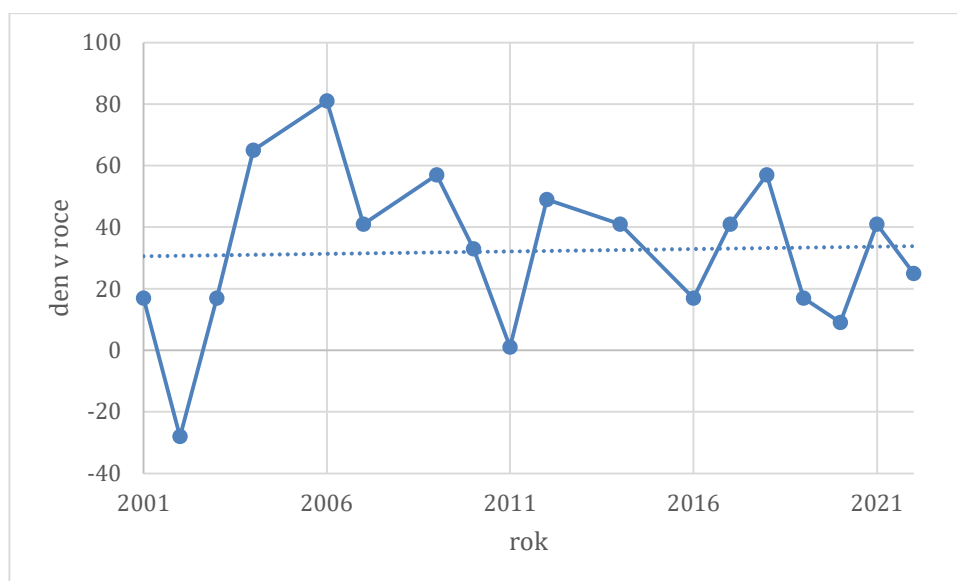
### 4.1.2 Analýza doby pokrytí sněhovou pokrývkou

Tato kapitola se zabývá popisem jednotlivých pozorovaných parametrů, jak pro celou doménu, tak pro jednotlivá výšková pásma. Analyzovanými parametry jsou: první a poslední den se sněhovou pokrývkou na více jak 10 % plochy domény, poslední den se sněhovou pokrývkou na celé ploše (vrchol akumulace), doba pokrytí sněhem na 10 %, 50 % a 100 % plochy. Nejprve jsou rozebrány parametry na celé ploše domény, dále pak v jednotlivých výškových pásmech.

První oblasti pokryté sněhem se na území vyskytují v průměru od druhé poloviny října. Nejdříve byla dálkovým průzkumem na území zaznamenána sněhová pokrývka na podzim roku 2002 a to 30. září. Naopak nejpozději tomu bylo v letech 2010 a 2018, kdy se sníh objevil na 10 % plochy až 9. listopadu. Na Grafu 12 můžeme pozorovat významný rozptyl počátečních dnů se sněhovou pokrývkou, bez statisticky významného trendu dle Mann Kendallova testu.



Graf 12: Znázornění prvních dní, kdy je sněhová pokrývka na více než 10 % plochy domény



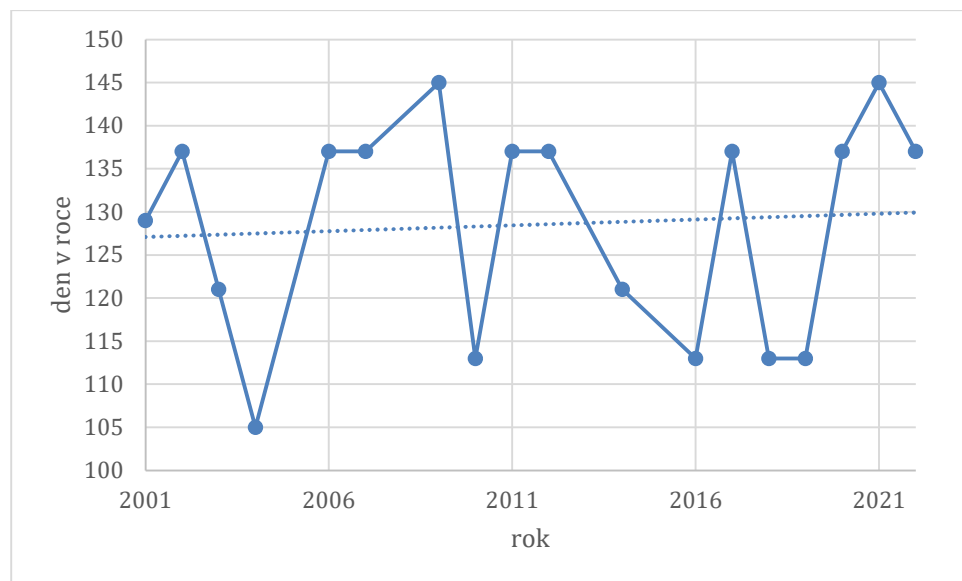
Graf 13: Poslední den v roce se sněhovou pokrývkou na celé ploše území

Dalším analyzovaným parametrem byl poslední den v sezóně, při němž se vyskytuje sněhová pokrývka na celé ploše území. Tento den můžeme označit za vrchol akumulace sněhové pokrývky. Další dny lze označit jako období ablace. Maximální sněhové pokrývky je dosaženo v průměru na začátku února. Můžeme si všimnout, že rozptyl se s přibývajícimi roky zmenšuje. Data nevykazují žádný statisticky významný trend dle testu podle Mann Kendalla.

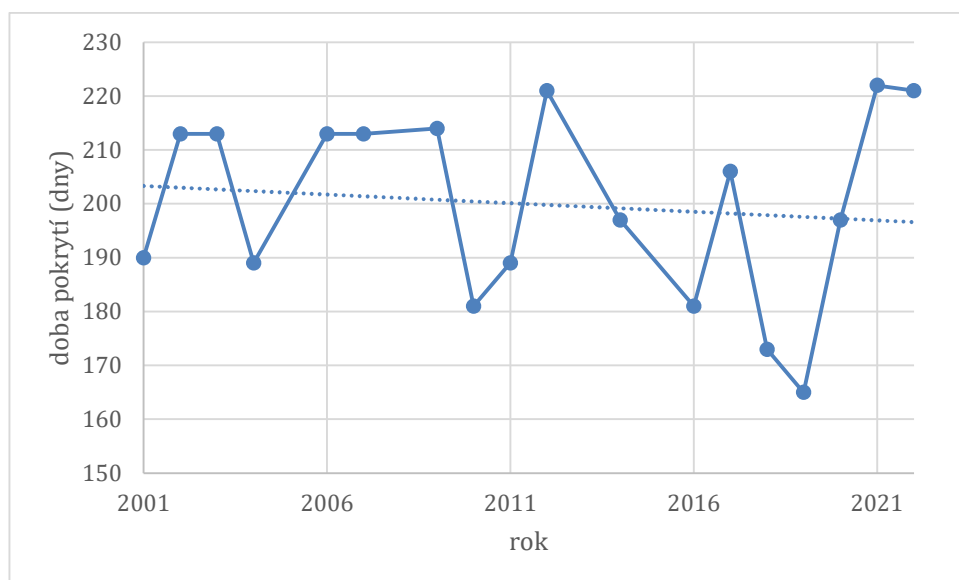
Poslední známky sněhové pokrývky na více než 10% plochy se v oblasti Vysokých Tater vyskytují v průměru do začátku května viz. Graf 14. Nejdéle se držel sníh v oblasti do 25. května roků 2009 a 2021. Nejdříve roztál sníh v sledované doméně v roce 2004, 15. dubna. I tato data jsou poněkud rozptýlená a nelze u nich dle Mann Kendallova testu pozorovat statisticky významný trend.

Výpočtem z těchto datových řad vyplívá doba pokrytí sněhovou pokrývkou na více než 1/10 plochy oblasti. Průměrně se sněhová pokrývka nachází na území 200 dnů. Nejdéle sníh ležel na území 221 dnů, a to v zimě 2011/2012. Nejkratší pozorované období trvalo pouze 165 dní. Jednalo se o sezónu 2018/2019. Na Grafu 15 se nám potvrzuje střídání období se zimami sněhově chudšími a bohatšími. Mezi sněhově bohaté období můžeme zařadit periodu mezi roky 2006-2009, kterou však následuje zima sněhově velmi chudá. Poslední dekáda vykazovala klesající trend, který byl přerušen sněhově bohatou sezónou 2020/2021. Datová řada nevykazuje statisticky významný trend dle Mann Kendallova testu na hladině významnosti  $p=0,05$ .

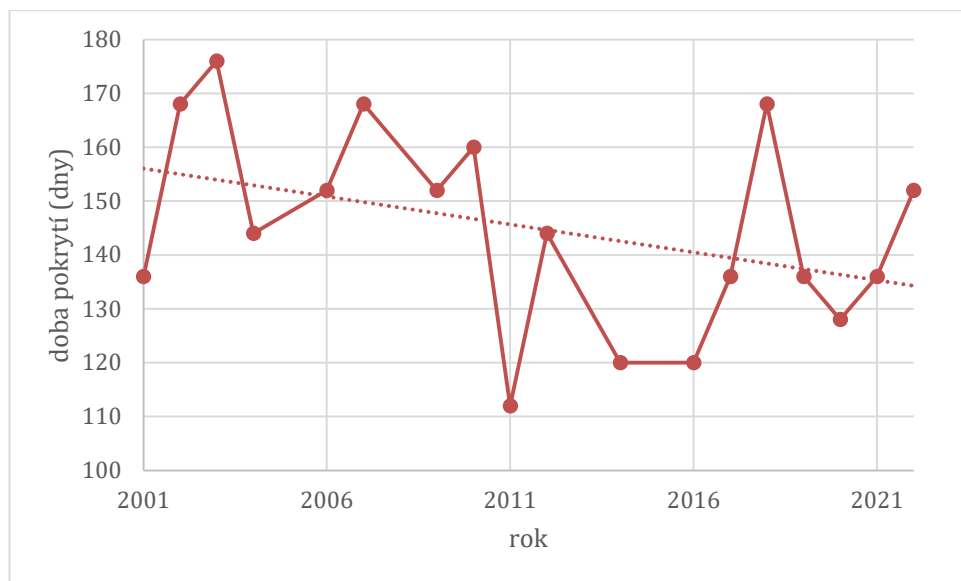




Graf 14: Zobrazení posledních dní v roce, kdy je sněhová pokrývka na minimálně 10 % plochy celé domény

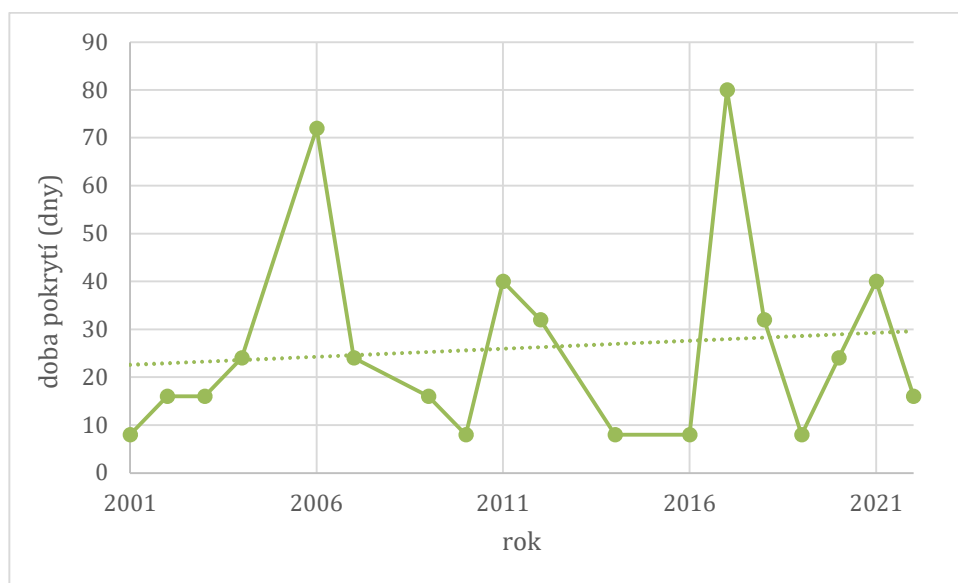


Graf 15: Délka doby pokrytí sněhem na minimálně 10 % celé plochy domény



Graf 16: Doba pokrytí sněhovou pokrývkou na min 50% plochy oblasti

Na Grafu 15 je znázorněna transformace doby pokrytí sněhem na minimálně 50 % plochy mezi roky 2001-2022. Nejkratší doba pokrytí byla 112 dní v zimě na přelomu roků 2010/2011, naopak nejdelší 176 dnů v zimě 2002/2003. Data vykazují statisticky nevýznamný klesající trend s 95 % pravděpodobností dle Mann Kendallova testu. Za sledované období došlo ke zkrácení doby pokrytí sněhem na více než 50 % plochy z průměrných 158 dní na 135 dní, tedy o 23 dní.

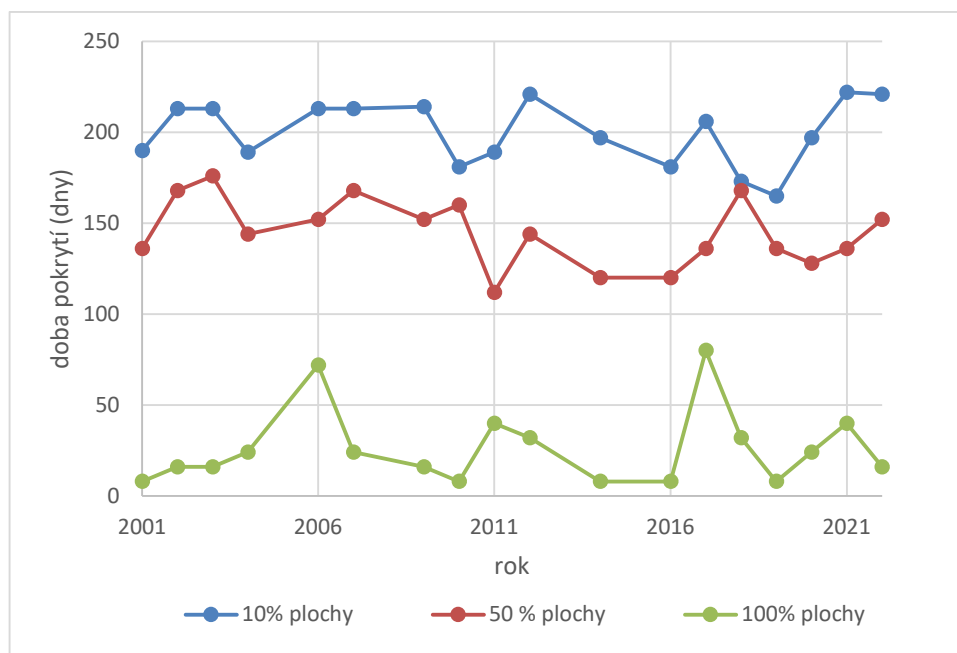


Graf 17: Doba pokrytí na 100 % plochy oblasti Vysoké Tatry

Doba, po kterou leží sníh v celé oblasti Vysokých Tater má rostoucí, statisticky nevýznamný trend dle Mann Kendallova testu s 95 % pravděpodobností viz Graf 17.

Vyskytují se dva sněhově bohaté roky (2006, 2017), které ale nekorelují se sněhově bohatými roky z 10 % a 50 % plochy. Vyskytují se zde i roky sněhově chudé, a to v letech 2001, 2010, 2014, 2016 a 2019, kdy MODIS detekoval sníh pouze na jednom snímku.

Při porovnání dob pokrytí na 10 a 50 procentech plochy můžeme vidět, že hodnoty jsou si mezi roky 2001-2007 podobné. Avšak v následujících obdobích již ke korelaci hodnot nedochází, a to ani v případě 100% pokrytí plochy sněhovou pokrývkou



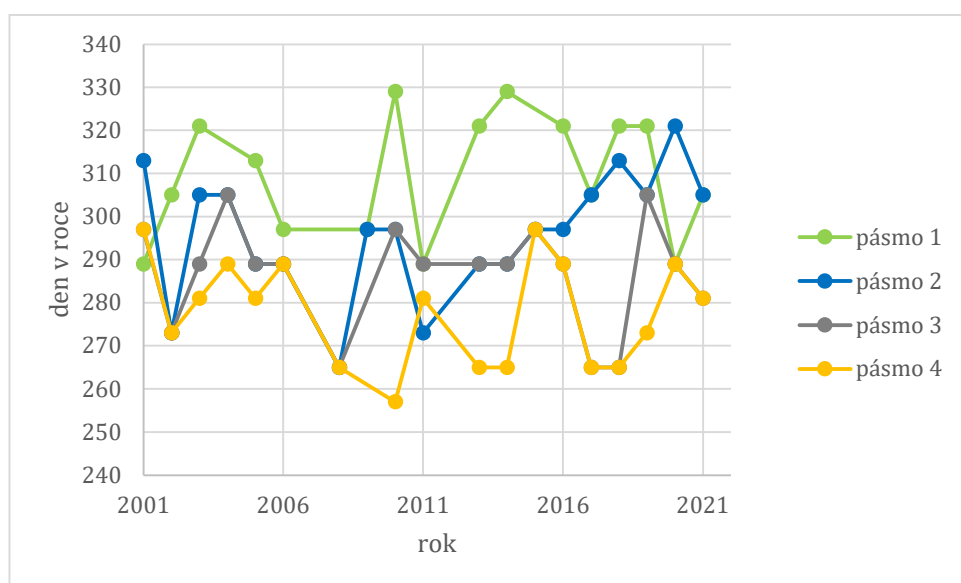
Graf 18: Porovnání doby pokrytí sněhem na 10 %, 50 % a 100% celé oblasti

V dalších odstavcích jsou popsány analýzy jednotlivých parametrů pro výšková pásma dle kapitoly 3.2. Použité parametry jsou stejné jako pro celou doménu.

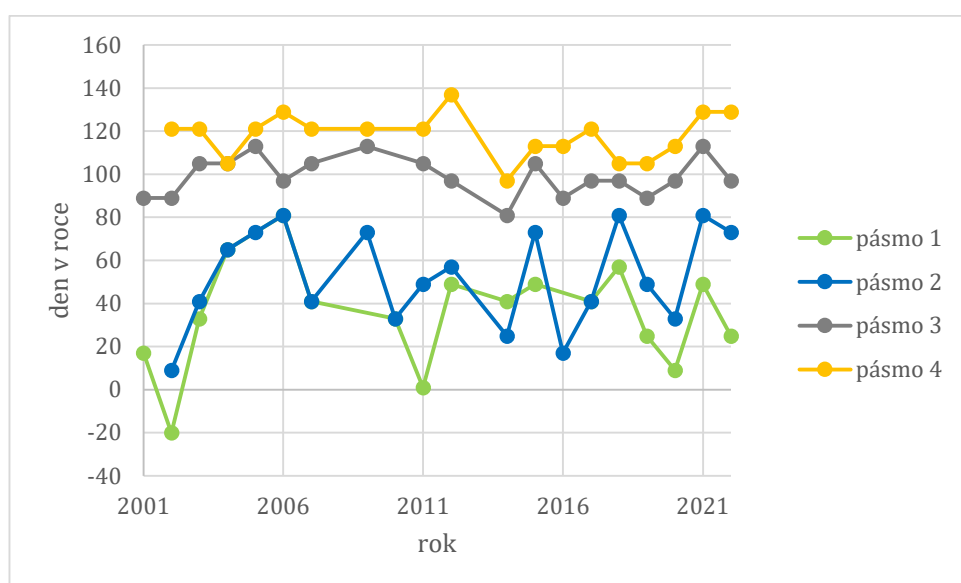
První den v roce se sněhovou pokrývkou je zobrazen na Grafu 19. Trend není ani pro jedno z pásem dle Mann Kendallova testu s 95 % pravděpodobností statisticky významný. V nejnižším pásmu 1 se za sledované období posunul první den se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy pásma o 5 dní dále do zimy. Průměrně se vyskytuje první sněhová pokrývka na území pásma 1 na začátku listopadu. V pásmu 2 došlo k posunu do zimních měsíců o 14 dnů, průměrný první den se sněhem je 22. říjen. Naopak tomu je v pásmech s vysokou nadmořskou výškou. V pásmech 3 a 4 leží sněhová pokrývka na 10 % plochy v průměru o 10 dní dříve. V pásmu 3 je průměrný první den se sněhovou pokrývkou 13. říjen v pásmu 4 3. říjen. Mezi roky 2000-2006 můžeme pozorovat, že se sněhová pokrývka vytváří ve všech vrstvách v podobném časovém období. To znamená významnou sněhovou srážku,

kteřá pokryje celou oblast sněhem. V pozdějším období se tvoří sněhová pokrývka v páslech postupně.

Poslední den s maximální sněhovou pokrývkou je ve všech pásmech bez statisticky významného trendu s 95 % pravděpodobností dle Mann Kendalla. Pásma 1 a 2 vykazují rostoucí trend s nárůstem 10 dní za období 2001-2022. Poslední den se sněhovou pokrývkou na celé ploše pásma 2 se v průměru posunul z 48. dne v roce na 58. den v roce (konec února). U pásma 3 a 4 se vyskytuje klesající trend s posunem 5 dní do zimních měsíců. Průměrný poslední den se sněhovou pokrývkou na celé ploše pásma je v pásmu 1 35. den, v pásmu 2 52. den, pásmu 3 99. den v roce a v pásmu 4 118. den v roce.

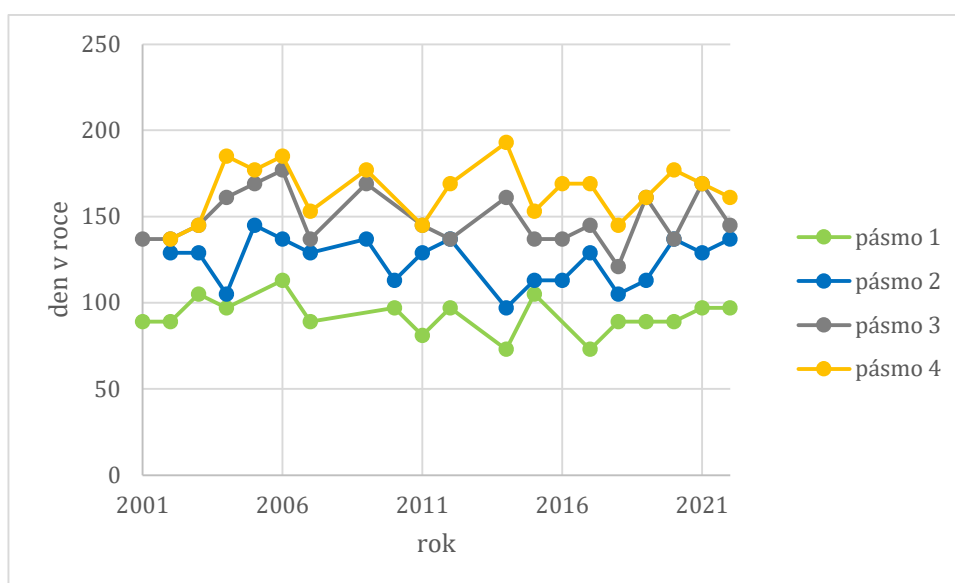


Graf 19: První den v roce se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy výškového pásma

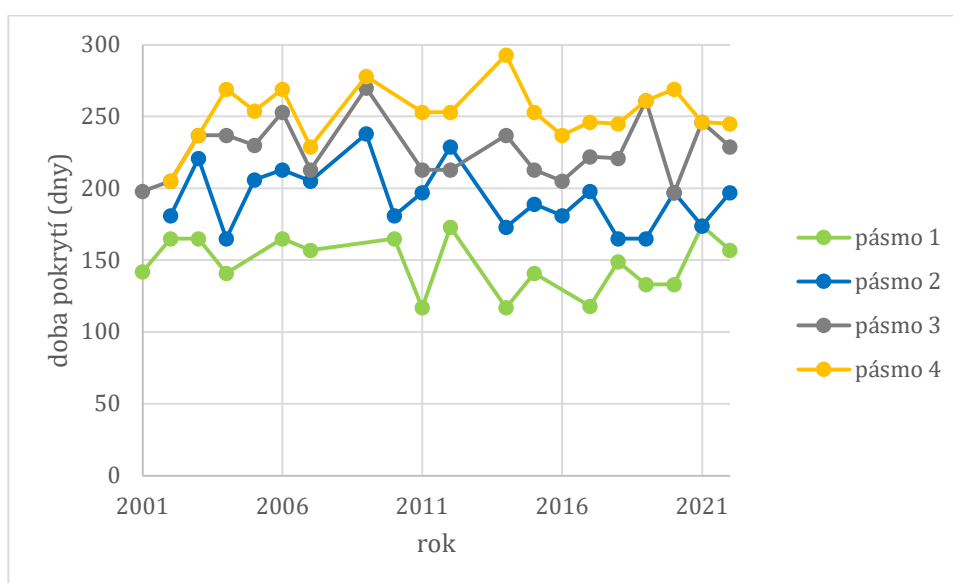


Graf 20: Poslední den v sezóně se sněhovou pokrývkou na celé ploše pásma

Na Grafu 21 je zobrazen vývoj posledního dne se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy. Nejdříve odtává sníh z nejnižšího pásma 1, a to v průměru na začátku dubna. Tento den nastávají o 8 dní dříve než na začátku pozorování. U pásma 2 dochází k odtoku sněhové pokrývky na začátku května, trend je klesající. Za sledované období dojde k posunu o 8 dní do letních měsíců. Mírný klesající trend můžeme pozorovat u pásma 3, kde je průměrný poslední den se sněhovou pokrývkou na 10 % plochy 27. květen. V pásmu 4 se naopak tento den posouvá dále do jarních měsíců a to o 5 dní. K odtání zbytků sněhové pokrývky v nejvyšších polohách dochází na začátku června. Trend není dle Mann Kendallova testu u žádné z datových řad statisticky významný.

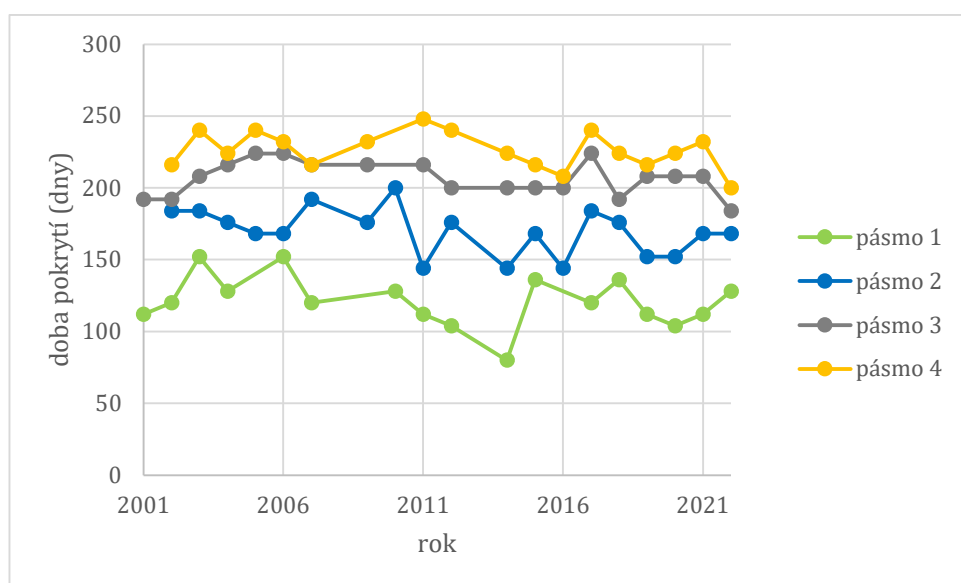


Graf 21: Poslední den v roce se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy výškového pásma



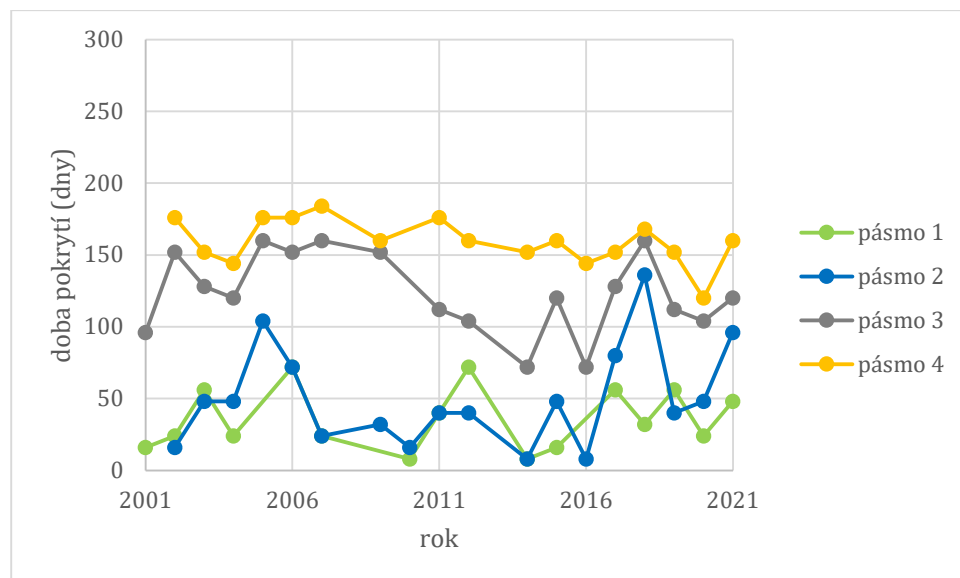
Graf 22: Doba pokrytí sněhem na minimálně 10 % plochy výškového pásma

Analýzou těchto datových řad dostáváme dobu pokrytí sněhovou pokrývkou na více než 10% plochy pásma. Průměrná doba pokrytí sněhem v pásmu 1 je 148 dní, za sledované období došlo k poklesu počtu dní v průměru o 18 dní. Trend je dle Mann Kendallova testu s 95 % pravděpodobností statisticky nevýznamný, stejně jako zbývající trendy pro tento parametr. V pásmu 2 je průměrná doba pokrytí 193 dní, a i zde průměrný počet dní klesl oproti počátku o 23 dnů. Pásmo 3 má průměrnou dobu pokrytí 226 dní, což je 53 % nárůst oproti pásmu 1. V tomto pásmu se vyskytuje u dat mírně rostoucí trend. Sníh pokrývá plochu pásma 4 přibližně 2/3 roku, tedy průměrně 252 dní. Tato doba je o 71 % delší než doba pokrytí v pásmu 1. Za sledované období došlo k nárůstu na doby pokrytí z 248 na 258 dní.



Graf 23: Doba pokrytí sněhem na minimálně 50 % plochy výškového pásma

Na Grafu 23 je zobrazena doba pokrytí sněhem na minimálně 50 % plochy pro jednotlivá výšková pásma. Doba pokrytí na 50 % plochy je obecně kratší než na 10 % plochy. Nejkratší dobu setrvá sníh v nejnižším pásmu 1 a to průměrně 121 dní. Trend je klesající, statisticky nevýznamný dle Mann Kendallova testu s 95 % pravděpodobností. Za období mezi roky 2001 a 2022 došlo ke zkrácení doby pokrytí v pásmu 1 o 18 dní. V pásmu 2 byla na začátku období průměrná doba pokrytí 180 dnů, na konci 160 dnů. Trend je dle Mann Kendallova testu statisticky nevýznamný jak pro pásmo 2, tak i pro pásmo 3 a 4. Pásmo 3 má průměrnou dobu pokrytí 208 dní, což je o 70 % déle než v pásmu 1. Za sledované období došlo k zkrácení doby pokrytí v průměru o 10 dní. Nejvyšší 4. pásmo je průměrně pokryto sněhovou pokrývkou po dobu 226 dnů, i zde však došlo k poklesu, a to v průměru o 13 dní.

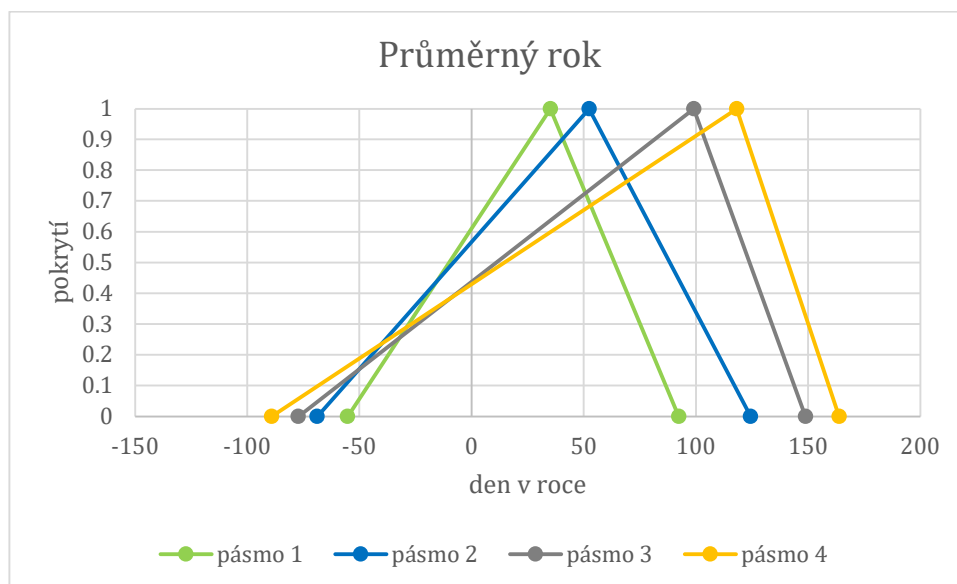


Graf 24: Doba pokrytí sněhem na 100% plochy výškového pásma

Posledním analyzovaným parametrem je doba pokrytí na 100 % plochy výškového pásma na Grafu 24. Pásmo 1 vykazuje mírný rostoucí trend. Rostoucí trend má rovněž pásmo 2, kde dojde k nárustu doby pokrytí za sledované období o 35 dnů. Klesající trend vykazují vyšší nadmořská pásma 3 a 4, kde dochází k poklesu přibližně o 20 dní za sledované období mezi rok 2001 až 2021. Žádný z trendů není statisticky významný dle Mann Kendallova testu s 95 % pravděpodobností.

### 4.1.3 Fáze vývoje sněhové pokrývky, vliv teploty

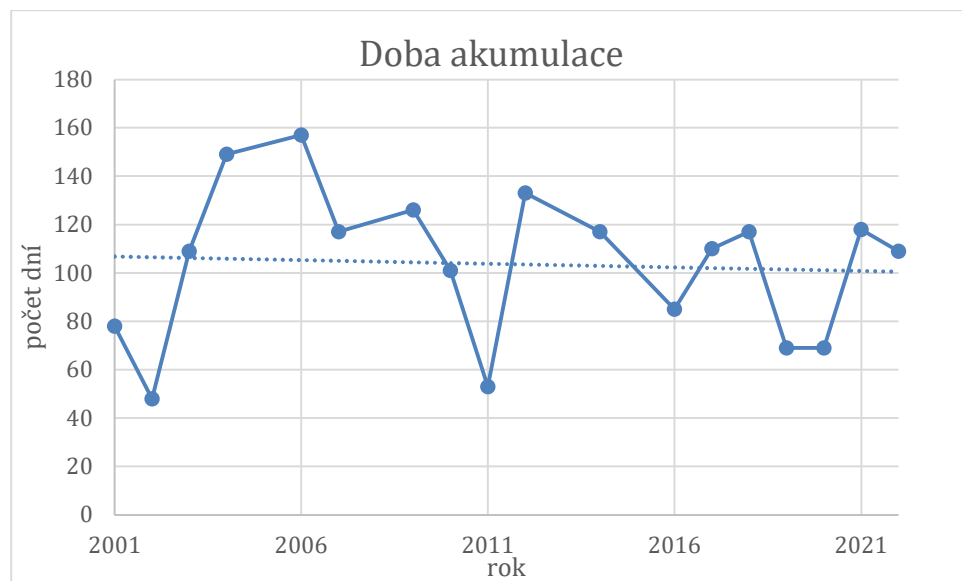
Vývoj sněhové pokrývky dělíme na dvě fáze, fáze akumulace a fáze ablace. Pro naši analýzu je doba akumulace počítána od prvního dne se sněhovou pokrývkou na více jak 10 % plochy domény do posledního dne se sněhovou pokrývkou na celé ploše povodí. Obvykle začíná akumulace sněhové pokrývky v listopadu či prosinci, v závislosti na nadmořské výšce. Doba akumulace trvá v oblasti Západních Karpat v závislosti na nadmořské výšce od 40 do 180 dní (Holko et al., 2011). Doba fáze ablace je počítána od posledního dne se sněhovou pokrývkou na celé ploše povodí do posledního dne se sněhovou pokrývkou na minimálně 10 % plochy domény. Ablace začíná většinou v měsíci březnu a trvá v závislosti na nadmořské výšce, teplotě a množství srážek do května (Holko et al., 2011).



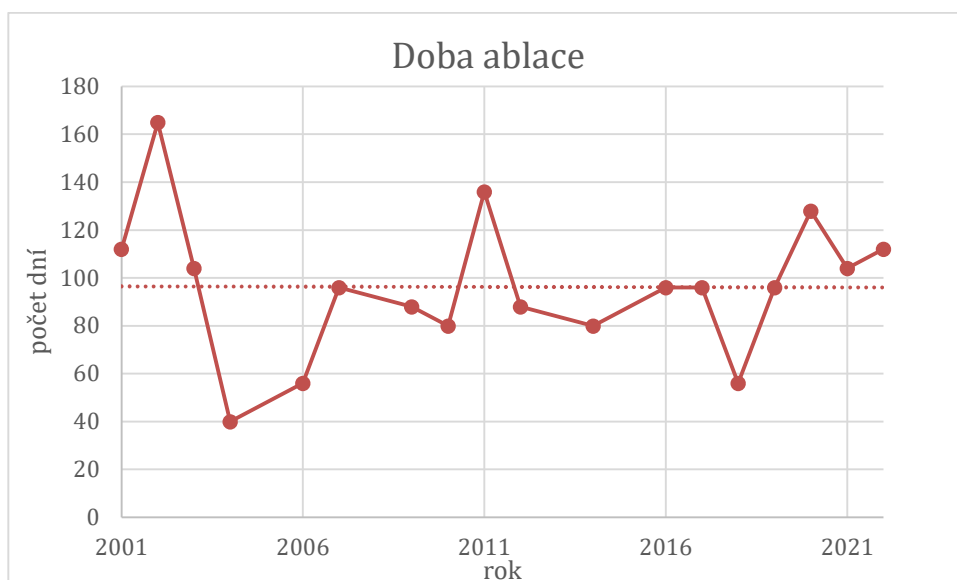
Graf 25: Zjednodušený graf vývoje sněhové pokrývky pro výšková pásma, průměrný rok

Pro lepší představu vývoje sněhové pokrývky je výše zobrazen zjednodušený Graf 25. Rostoucí větev symbolizuje akumulaci, větev klesající ablaci. Jednotlivé milníky jsou časově posunuty dle nadmořské výšky. V nejvyšších pásmech začíná akumulace dříve a trvá déle. Ablace probíhá nejrychleji ve vysokých nadmořských pásmech.





Graf 26: Délka doby akumulace pro celou oblast pozorování



Graf 27: Délka období ablace sněhové pokrývky pro celou oblast pozorování

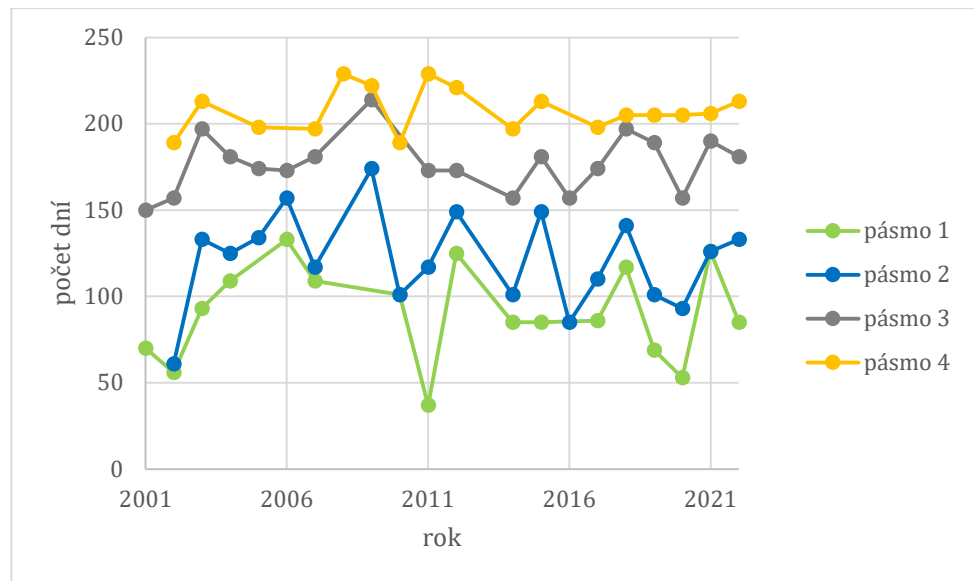
Na Grafech 26, 27 a v tabulce 5 jsou zobrazeny délky fází vývoje sněhové pokrývky pro sledovanou oblast Vysokých Tater. Průměrná délka doby akumulace je 104 dnů. Období ablace trvá průměrně 96 dnů. Ani jedna z fází nevykazuje trend se statistickou významností 95 % dle Mann Kendallova testu.

Tab. 5 Délky fáze vývoje sněhové pokrývky, celá oblast Vysokých Tater

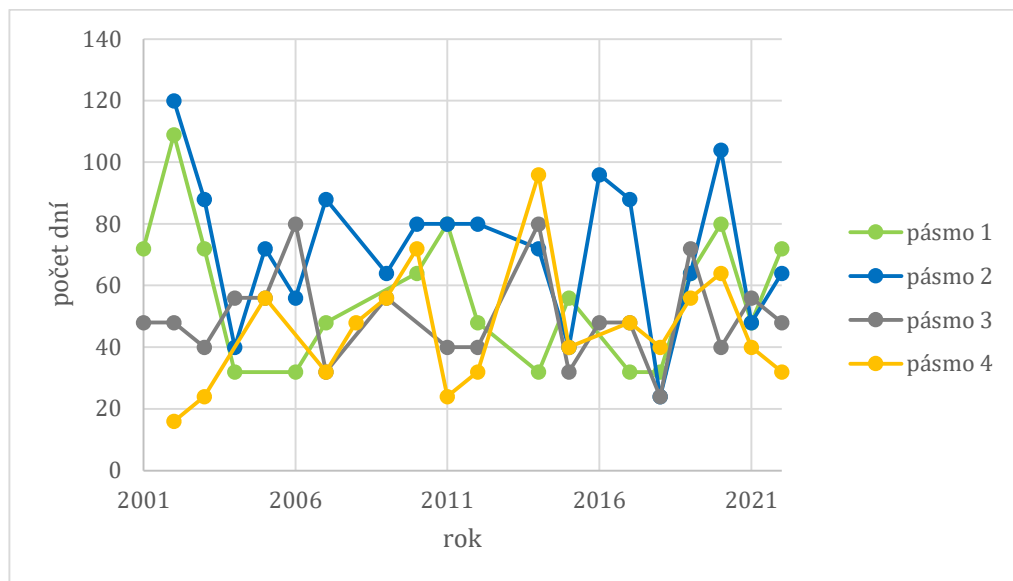
rok	den v roce			počet dní	
	počátek	vrchol	konec	Akumulace	Ablace
2001	305	17	129	78	112
2002	289	-28	137	48	165
2003	273	17	121	109	104
2004	281	65	105	149	40
2006	289	81	137	157	56
2007	289	41	137	117	96
2009	297	57	145	126	88
2010	297	33	113	101	80
2011	313	1	137	53	136
2012	281	49	137	133	88
2014	289	41	121	117	80
2016	297	17	113	85	96
2017	297	41	137	110	96
2018	305	57	113	117	56
2019	313	17	113	69	96
2020	305	9	137	69	128
2021	289	41	145	118	104
2022	281	25	137	109	112
průměr	294	32	129	104	96

Fáze vývoje sněhové pokrývky byly rovněž analyzovány pro jednotlivá výšková pásma. Nejkratší dobu trvá akumulace sněhu v nejnižším pásmu 1 a to průměrně 90 dní, nedochází k vývoji trendu. V pásmu 2 je trend mírně klesající, průměrná doba akumulace sněhové pokrývky je 121 dnů. V pásmu 3 je trend mírně rostoucí, průměrná doba akumulace sněhové pokrývky je 176 dnů. V nejvyšším pásmu 4 trvá akumulace průměrně 208 dní. Za sledované období dojde k prodloužení o 5 dnů. Žádný z trendů nevykazuje statistickou významnost dle Mann Kendallova testu s 95 % pravděpodobností.

Délka ablace sněhové pokrývky je z pravidla kratší než doba akumulace. V pásmu 1 je průměrná doba ablace 57 dnů. V období mezi roky 2001-2022 došlo v průměru ke zkrácení o 15 dnů. Pásmo 2 vykazuje strmější pokles počtu dní a to o 20 dnů za sledované období. Průměrná délka ablace sněhu je zde 72 dnů. Pásmo 3 nevykazuje žádný vývoj, průměrná doba ablace je 50 dnů. O den kratší je průměrná doba ablace v pásmu 4. Toto pásmo vykazuje za sledované období nárůst délky trvání o 15 dnů. Ani zde žádný z trendů není statisticky významný s 95 % pravděpodobností dle Mann Kendallova testu.



Graf 28: Doba akumulace sněhové pokrývky pro jednotlivá výšková pásma



Graf 29: Doba ablace sněhové pokrývky pro výšková pásma

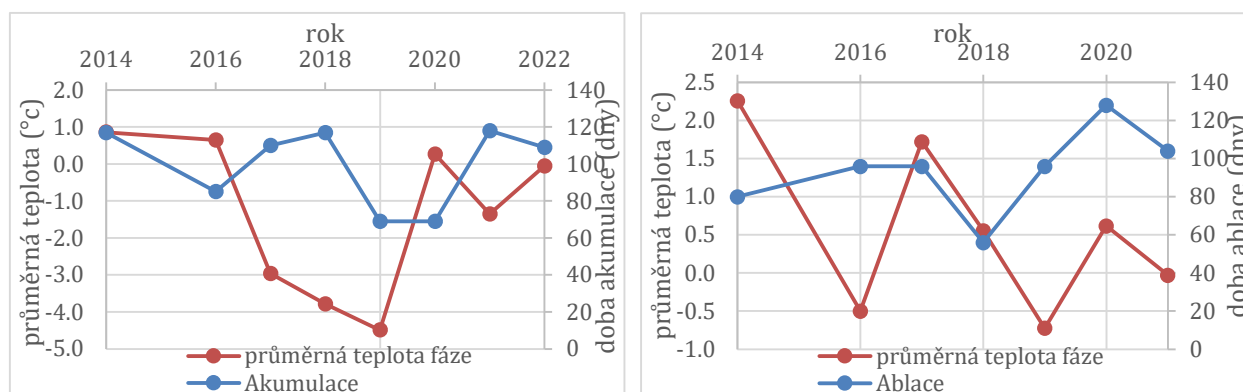
Dalším cílem bylo posoudit vliv teploty na délky fáze vývoje sněhové pokrývky. Analýza byla provedena pro dvě nezávislé meteorologické řady, a to z důvodu nedostatečné délky denních pozorování. Denní pozorování, které je nejvhodnější pro prokázání vzájemné korelace mezi teplotami a délkou fáze bylo k dispozici ze stanice Skalnaté pleso. Tato stanice se nachází v nadmořské výšce 1765 m n. m. Denní data byla k dispozici pro období 1.1.2013 – 31.12.2021. Druhá použitá řada pochází ze stanice Štrbské pleso v nadmořské výšce 1261 m n. m. Jedná se o průměrné měsíční teploty v daném roce v období leden 2000–srpen 2016. Zbylé průměrné měsíční teploty byly vypočteny z denních dat ze Skalnatého plesa. Pro další

použití bylo potřeba vypočítat výškový gradient. Teplota se mění s nadmořskou výškou. Pro každý měsíc je tento gradient odlišný. Výpočet byl proveden podle metodiky Liston a Elder (2006) mezi stanicemi Skalnaté a Štrbské pleso viz. Tab. 6. Dále byly teploty převedeny pomocí tohoto gradientu na teploty nacházející se v nadmořské výšce jednotlivých pásem a průměrné výšce celé domény.

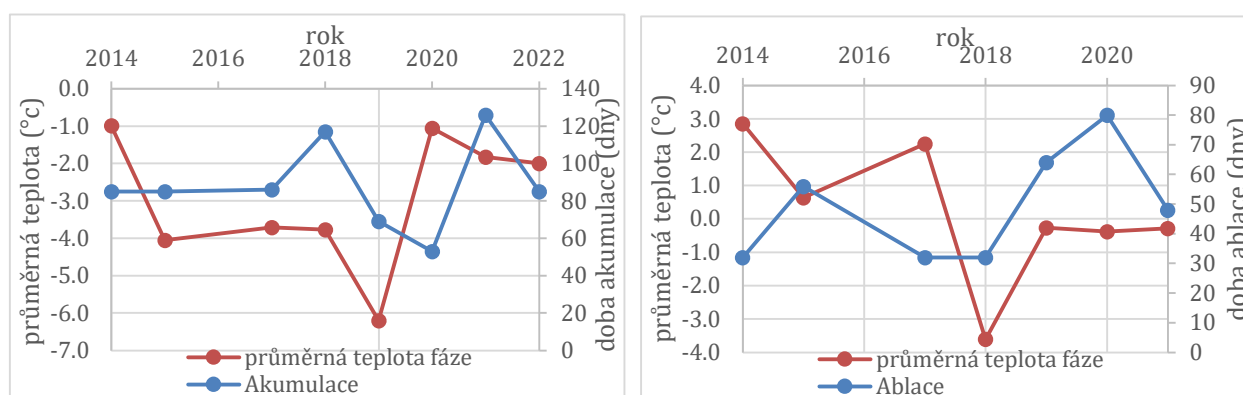
Byla snaha provést obdobnou analýzu pro zjištění vlivu srážek na délku období, avšak z důvodu nedostatečné kvality pozorování ve stanici Ľadové pleso a absenci jiné srážkoměrné stanice s alespoň měsíčními úhrny bylo od této analýzy upuštěno. Bylo by možné použít výškový gradient měsíčních úhrnů z odborné studie Klimatické poměry Vysokých Tater (Slovenská lesnícká spoločnosť, 2012), jedná se však o velmi nepřesnou možnost, která se jeví jako nevhodná.

Tab. 6. Teplotní výškový gradient pro jednotlivé měsíce

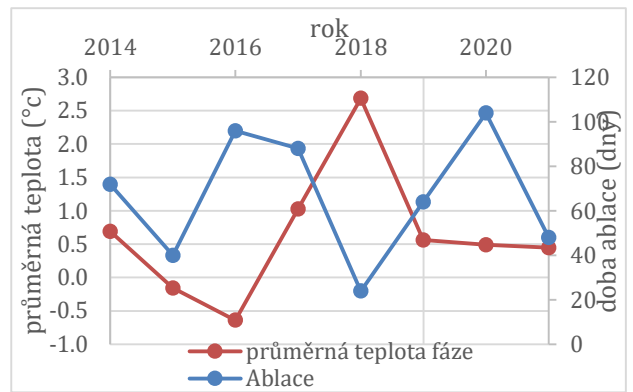
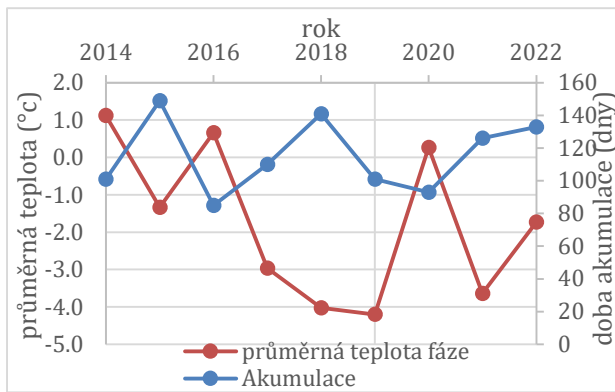
měsíc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
gradient (°C km <sup>-1</sup> )	0.06	-1.45	-3.24	-5.25	-5.48	-5.93	-6.10	-4.88	-4.67	-2.25	-0.89	1.89



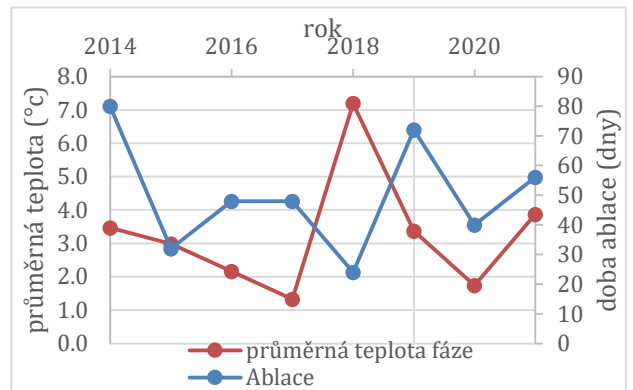
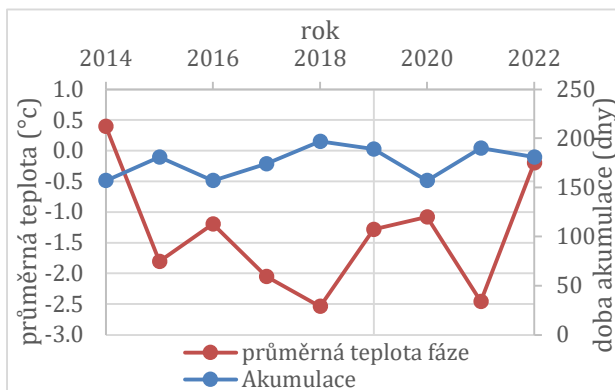
Graf 30: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, celá doména



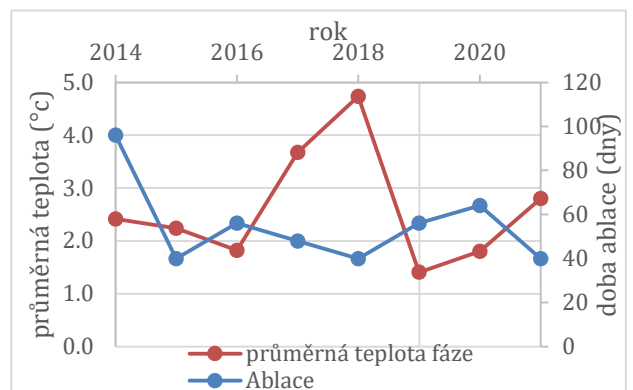
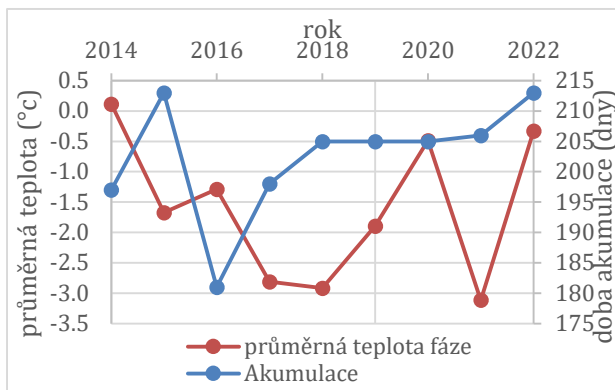
Graf 31: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 1



Graf 32: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 2



Graf 33: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 3

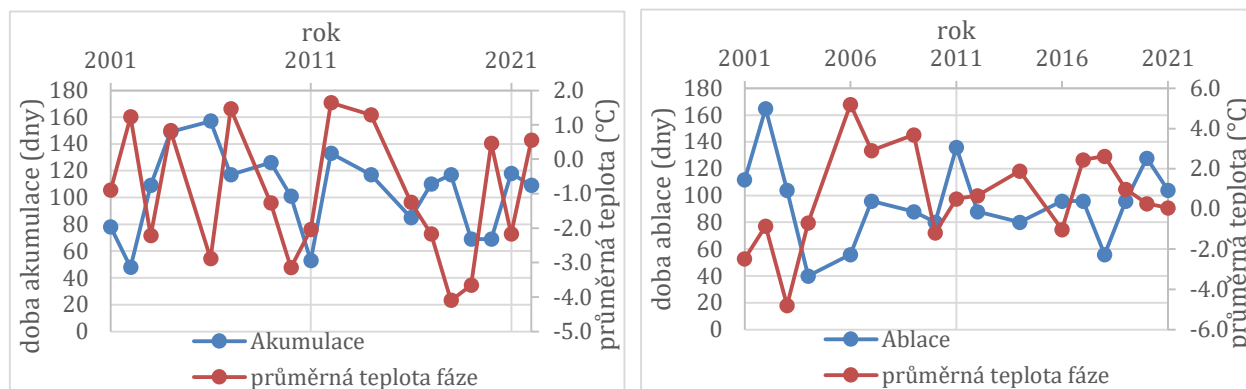


Graf 34: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 4

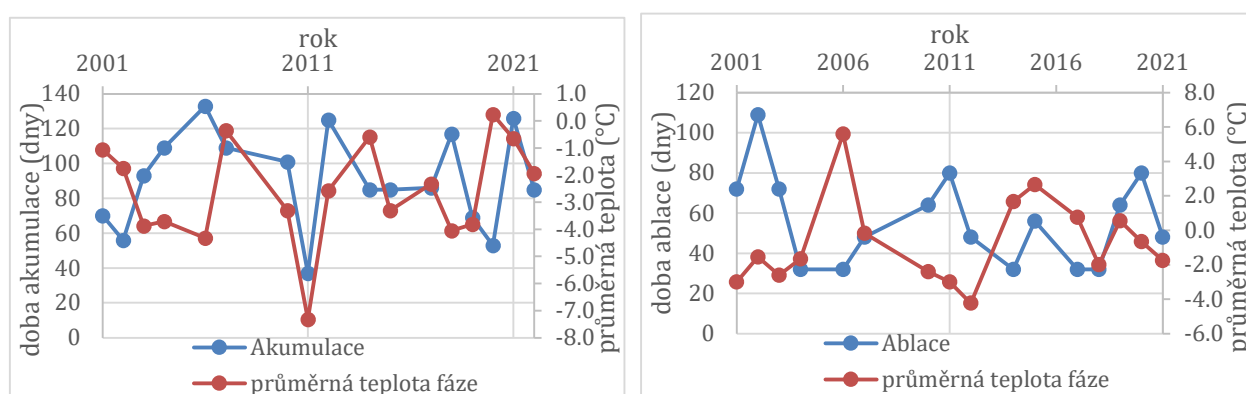
Na výše zobrazených grafech jsou znázorněny jednotlivé délky fáze vývoje sněhové pokrývky v korelaci s průměrnými teplotami fáze, vypočtenými z denních teplot. Pro posouzení korelace teploty a délky fáze byl použit Spearmanův koeficient pořadové korelace. Statisticky významná korelace byla prokázána pouze u fáze akumulace v pásmu 3. Lze říct, že v tomto případě má teplota významný vliv na délku doby akumulace. Patrný vliv

teploty na délku fází můžeme pozorovat i u pásma 2 a fáze ablace u pásma 1 a 4, avšak nejedná se o statisticky významné jevy.

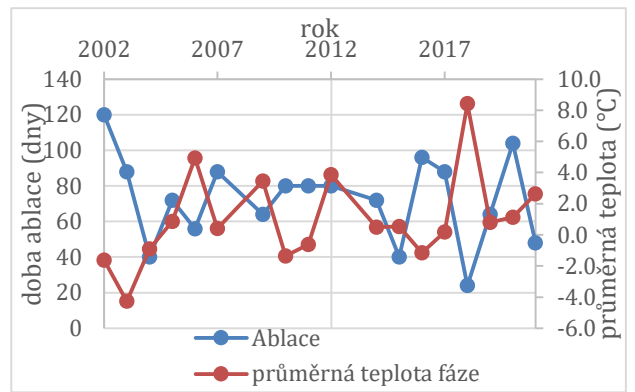
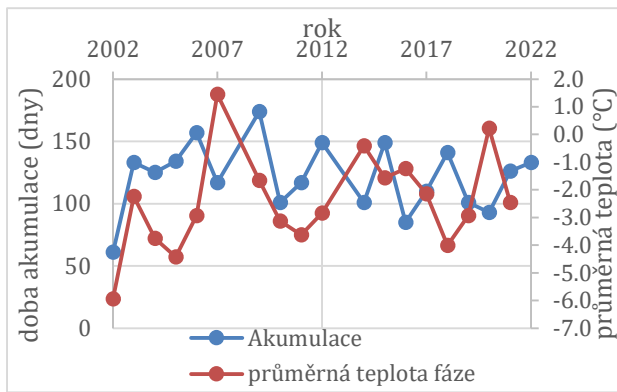
Na grafech 35-39 jsou zobrazeny průměrné teploty fáze vypočtené z měsíčních dat a délky fází. Průměrné teploty vypočtené z měsíčních hodnot mají nižší přesnost. To je způsobeno tím, že když ablace sněhové pokrývky bude dokončeno například 20. dubna, bude do výpočtu započten celý měsíc, a tedy i například výrazně vyšší teploty na konci měsíce, po které už sněhová pokrývka na území neleží. Průměrné měsíční teploty se do průměru započítávají v případě, že fáze zasahuje do větší poloviny měsíce. Statisticky významná korelace mezi teplotou a délkou fáze vypočtená pomocí Spearmanova koeficientu pořadové korelace s 95 % pravděpodobností byla prokázána pro fázi ablace v pásmu 2. Částečnou, avšak statisticky nevýznamnou korelaci vykazují data pro fázi ablace v celé doméně a pásmu 4. Zbylá pásma nevykazují statisticky významnou korelaci v žádné z fází.



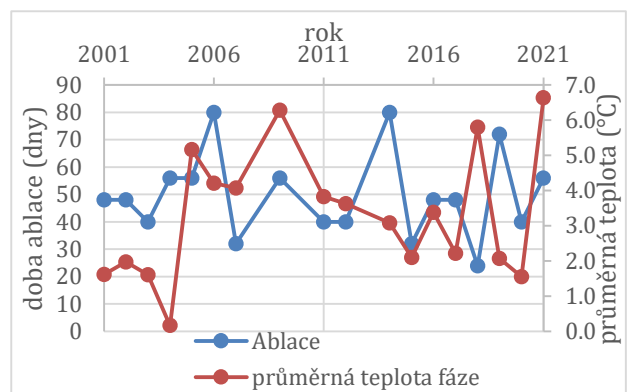
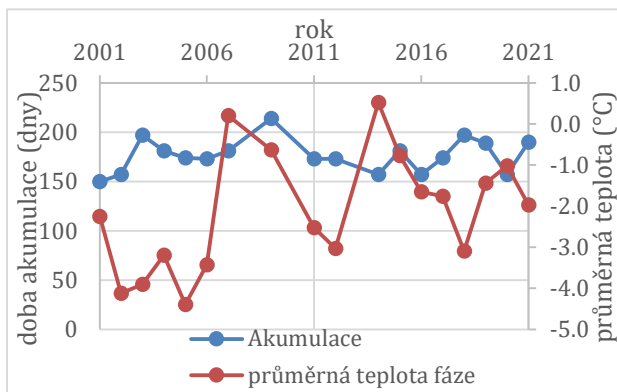
Graf 35: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, celá doména



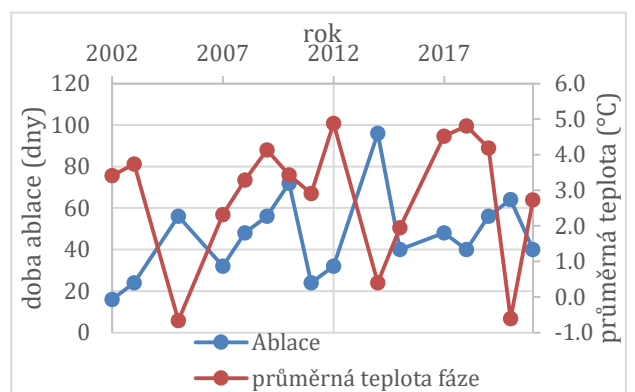
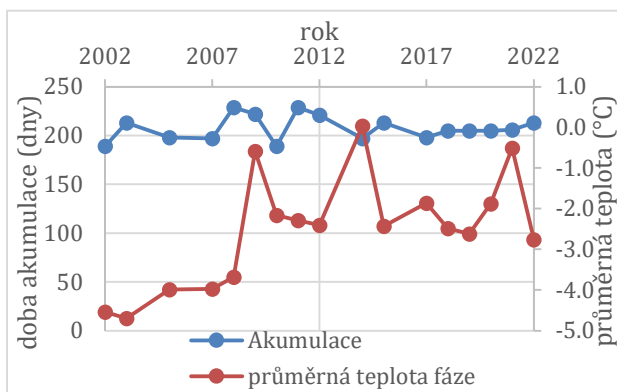
Graf 36: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 1



Graf 37: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 2



Graf 38: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 3



Graf 3930: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 4

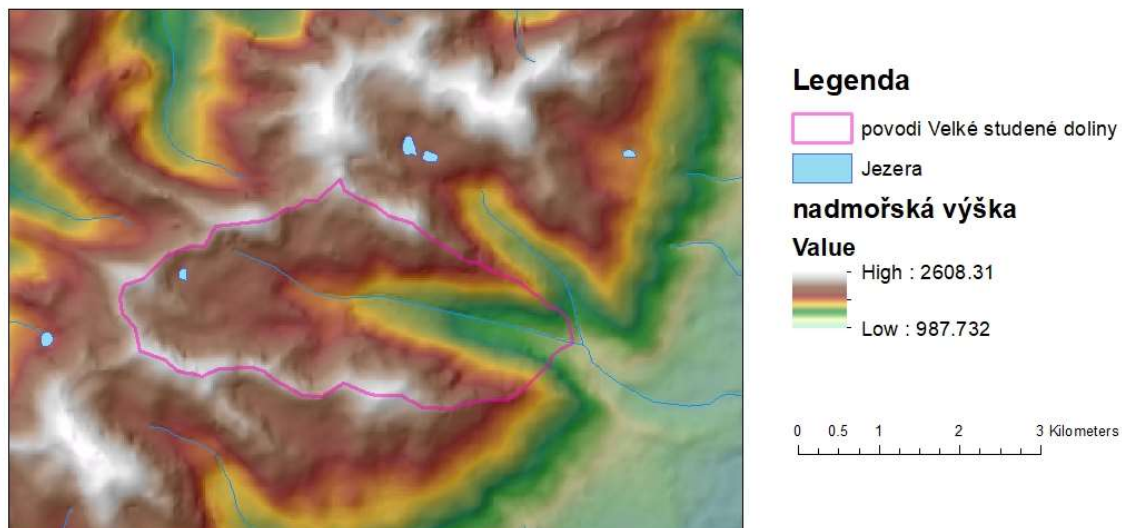
---

## 4.2 Sledovaná oblast povodí Velké Studené doliny

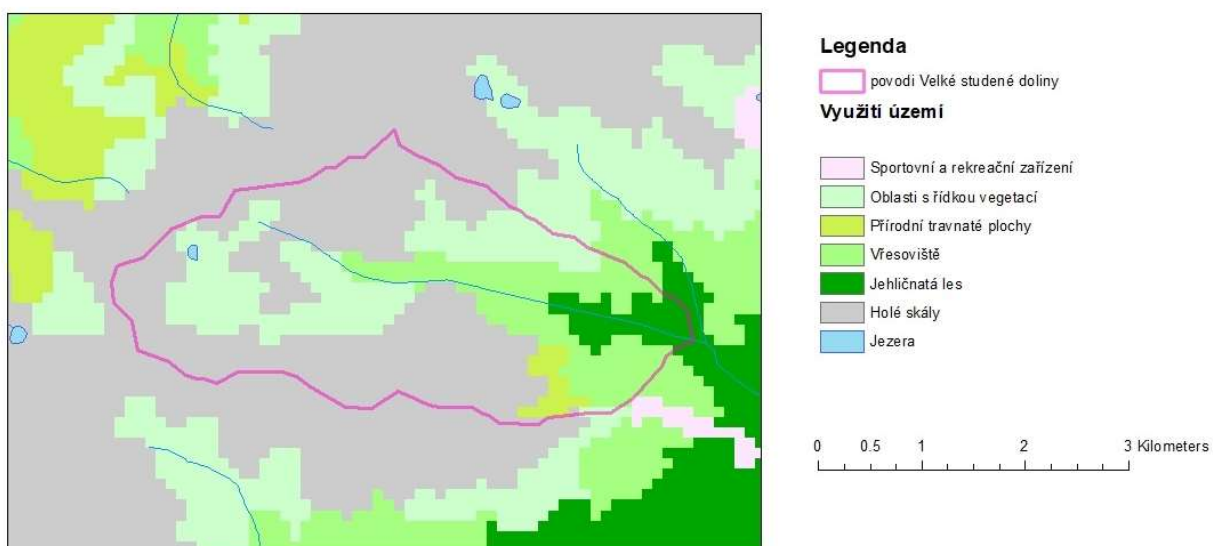
Povodí Velké Studené doliny se nachází ve východní oblasti sledované domény Vysokých Tater. Povodí odvodňuje plochu 960 ha, průměrná výška povodí je 1930 m n. m. Nejvyšší bod povodí má výšku 2424 m n. m. Dolina je pojmenovaná po Velkém Studeném potoku, který proudí údolím k Reinerově chatě, kde dochází k soutoku s Malým Studeným potokem. Toto místo je uzávěrovým profilem sledovaného povodí, jeho nadmořská výška je 1307 m n. m. Do Velkého Studeného potoku ústí řada bezejmenných přítoků z jednotlivých žlabů. Studený potok pramení v horní části povodí, kde se nachází 26 ples neboli jezer (Baláž, 2010). Největší jezero nacházející se v dolině je Zbojnické Ľadové pleso s rozlohou 1,72 ha (Křeček et al., 2006). Na jeho břehu se nachází doplňková automatická meteorologická stanice. Jedná se o oblast s vysokými průměrnými ročními srážkovými úhrny. V povodí Ľadového plesa, menším povodí spadající do povodí Velké Studené doliny byl vypočten průměrný roční úhrn srážek 1469 mm za období mezi roky 1961-2006. Průměrná roční teplota v povodí Ľadové plesa byla za stejné období 0,18 °C (Dušková, 2021).

Hranice povodí je tvořena na jihu hřebenem Slavkovského štítu, ze západu hlavním hřebenem Vysokých Tater a ze severovýchodu hřebenem Prostředného hrotu. Téměř celé povodí se nachází nad hranicí lesa. Povodí je z 50,7 % pokryto holými skalami, z 24,1 % oblastmi s řídkou vegetací, 17,2 % pokrývají vřesoviště a 5,5 % plochy povodí pokrývají v nejnižší části jehličnaté lesy. Jedná tedy o povodí alpínského typu, protože většina povodí se nachází nad hranicí lesa a hydrologický režim je řízen teplotním režimem (Shaw, 2011).





Obr. 7 Zobrazení polohy a výškopisu povodí Velké Studené doliny



Obr. 8 Znázornění využití půdy v povodí Velké Studené doliny, 2019

Tab. 7 Využití půdy v povodí Velké Studené doliny

Využití půdy	% zastoupení
Holé skály	50.7
Oblasti s řídkou vegetací	24.1
Vřesoviště	17.2
Jehličnatý les	5.5
Přírodní travnaté plochy	2.5

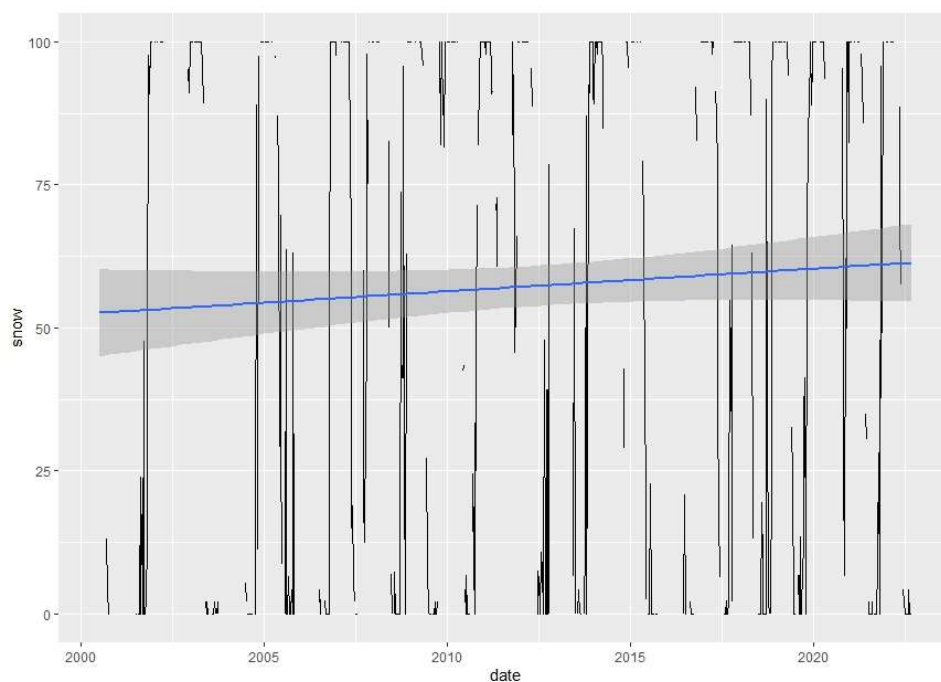
---

## 4.2.1 Vývoj sněhové pokrývky a analýza doby pokrytí

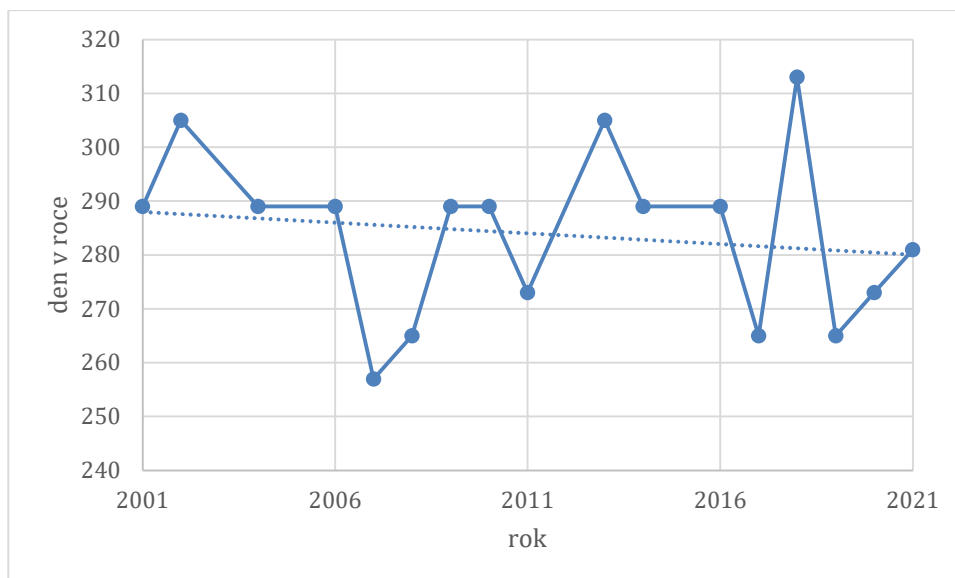
V této kapitole je popsán vývoj sněhové pokrývky a analýza jednotlivých sledovaných parametrů pro povodí Velké Studené doliny. Sledovaná oblast se nachází ve výškových pásmech 3 a 4 viz. Kapitola 4.1. Cílem těchto analýz je zjistit rozdíl mezi těmito výškovými pásmy a malým alpínským povodím. Pro tuto oblast byly z důvodu nedostatečného množství vyhovujících snímků odstraněny zimní období 2000-2001, 2003-2004, 2005-2006, 2012-2013, 2015-2016.

Na Grafu 40 je zobrazen procentuální vývoj sněhové pokrývky na území Velké Studené doliny. Data vykazují statisticky nevýznamný rostoucí trend dle Mann Kendallova testu s 95 % pravděpodobností.

První den v roce se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy se v povodí Velké Studené doliny vyskytuje průměrně 9. října, tedy 284 den v roce. Nejdříve byl sníh v povodí pozorován 13. září v roce 2007, nejpozději pak 8. listopadu 2018 viz Graf 41. Na datech je možné pozorovat statisticky nevýznamný klesající trend dle Mann Kendallova testu.

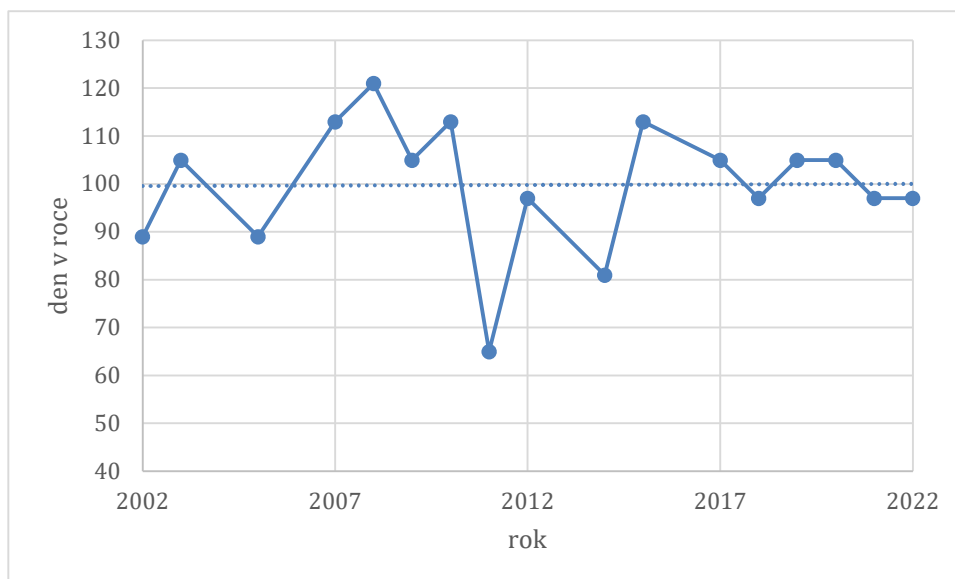


Graf 40: Vývoj procentuálního pokrytí území Velké Studené doliny sněhovou pokrývkou



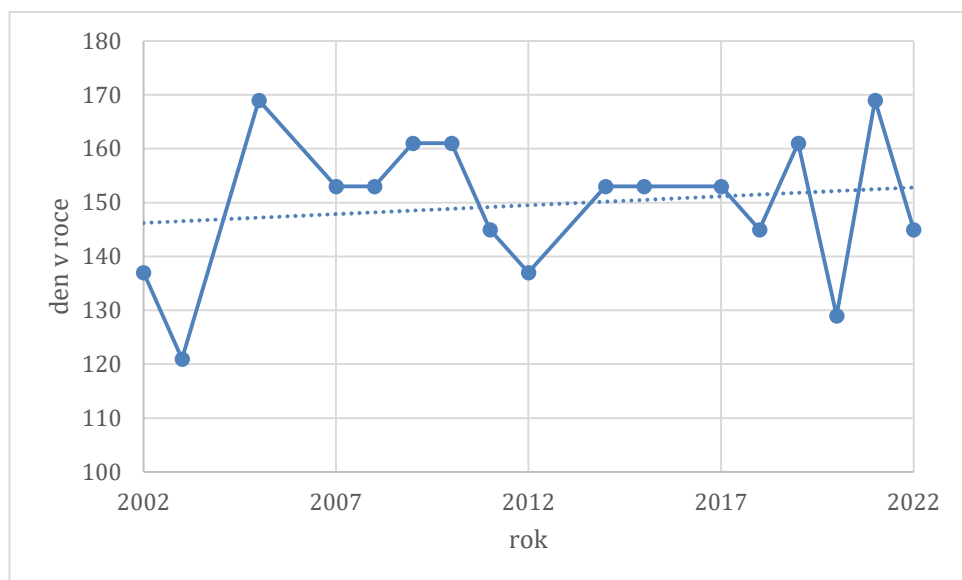
Graf 41: Zobrazení prvních dní, kdy je sněhová pokrývka na více než 10 % plochy Velké Studené doliny

Poslední den se sněhovou pokrývkou na celé ploše povodí Velké Studené doliny se vyskytuje průměrně 8. dubna. Nejzazší výskyt tohoto dne byl pozorován 30. dubna roku 2008. Nejdříve se vyskytl vrchol akumulace 5. března roku 2011. Trend je konstantní, statisticky nevýznamný dle Mann Kendallova testu.

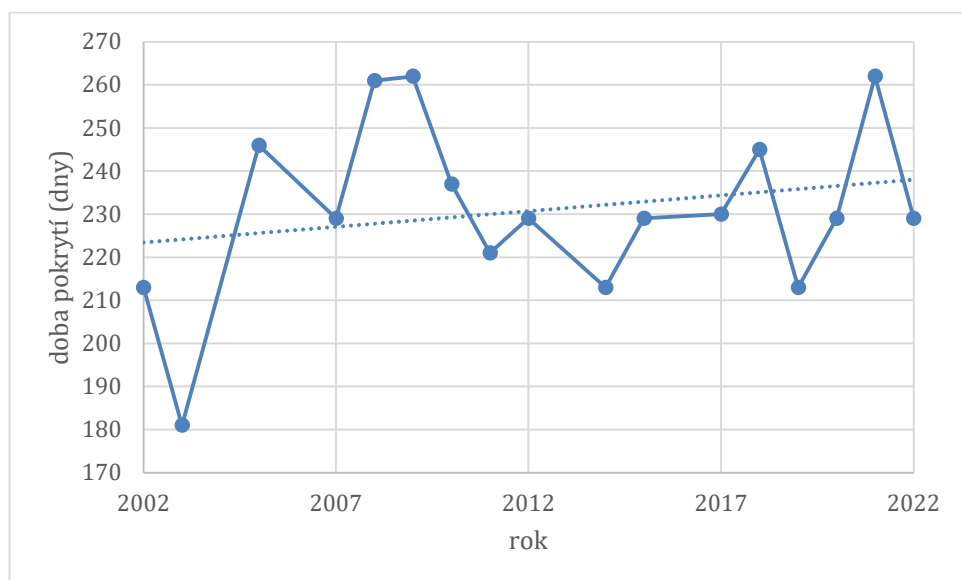


Graf 42: Poslední den v sezóně se sněhovou pokrývkou na celé ploše Velké Studené doliny

Poslední pozorovaný den se sněhovou pokrývkou na minimálně 10 % povodí se v průměru vyskytuje 28. května. Nejdříve skončilo zimní období v roce 2003 30. dubna. Nejdéle ležely zbytky sněhové pokrývky na území do 17 června roku 2021. Data vykazují rostoucí trend bez statistické významnosti s 95 % pravděpodobností dle Mann Kendalova testu.



Graf 43: Poslední den se sněhovou pokrývkou na min. 10 % plochy Velké Studené doliny

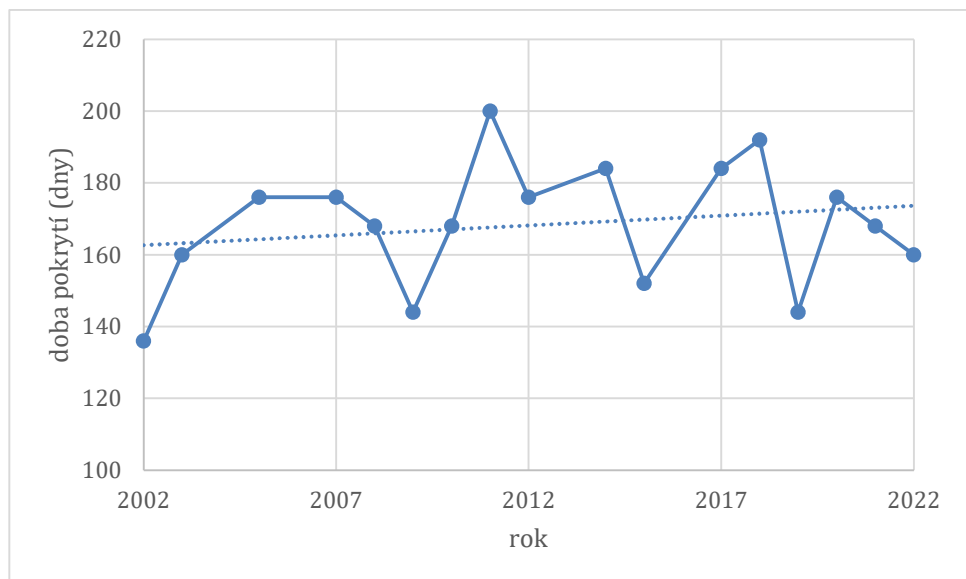


Graf 44: Doba pokrytí sněhem na minimálně 10 % plochy Velké Studené doliny

Doba pokrytí sněhem na minimálně 10 % plochy vycházející z rozdílu mezi prvním a posledním dnem se sněhovou pokrývkou na minimálně 10 % plochy vykazuje rostoucí, statisticky nevýznamný trend dle Mann Kendalova testu s 95 % pravděpodobností. Průměrná doba pokrytí je 231 dní, což znamená že sníh se na ploše povodí průměrně

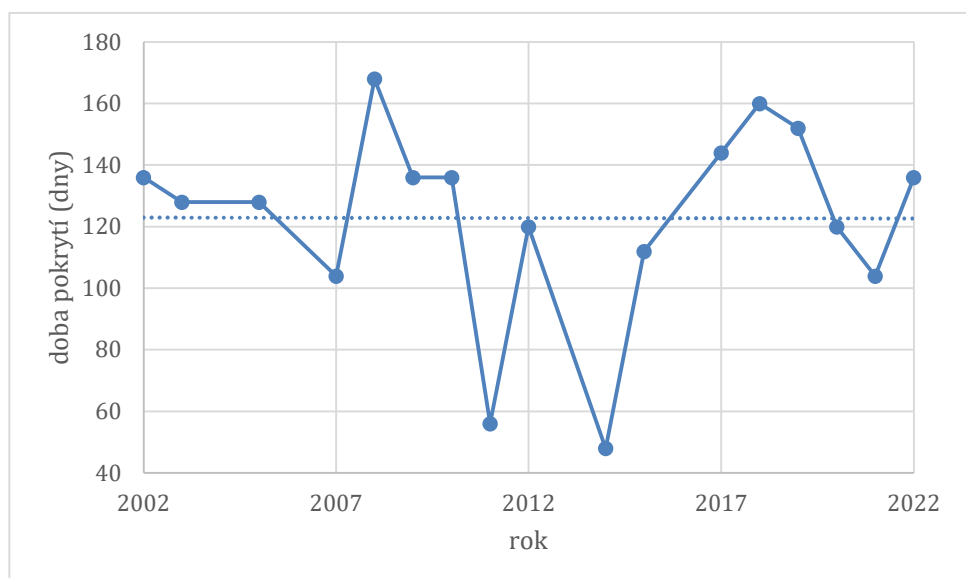
vyskytuje po 2/3 roku. Nejkratší doba pokrytí byla 181 dní v roce 2003, nejdelší 262 dní v roce 2009.

Doba pokrytí na 50 % plochy je v průměru o 61 dní kratší, průměrná doba pokrytí je tedy 168 dní. Délky doby pokrytí na 10 % a 50 % plochy spolu nekorelují. Nejkratší doba pokrytí byla 136 dní v roce 2002, nejdelší 200 dní v roce 2011. Trend doby pokrytí sněhem na 50 % plochy povodí je rostoucí, statisticky nevýznamný.



Graf 4315: Doba pokrytí sněhem na minimálně 50 % plochy Velké Studené doliny

Parametr doby pokrytí na 100% plochy má statisticky nevýznamný konstantní trend.



Graf 46: Doba pokrytí na 100% plochy povodí Velké Studené doliny

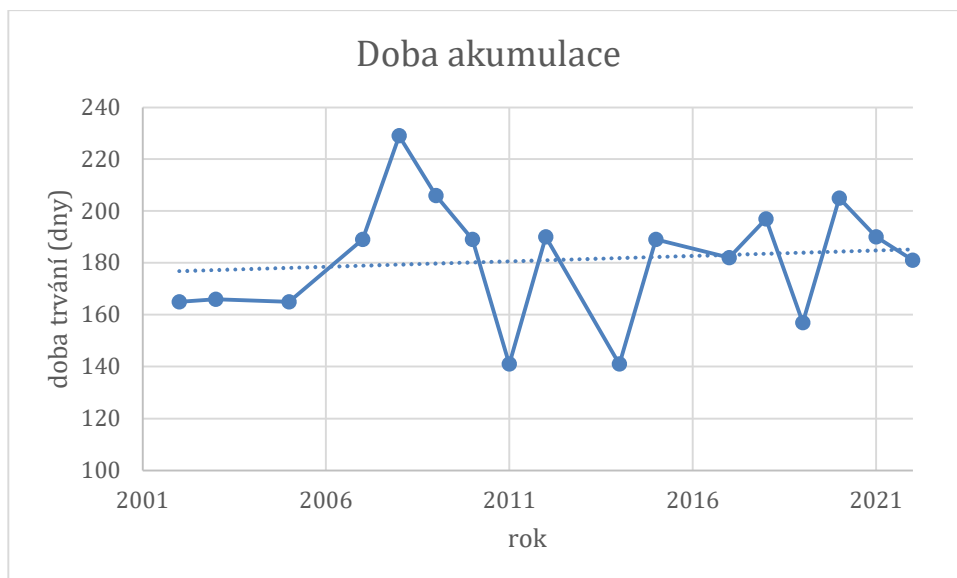
## 4.2.2 Fáze vývoje sněhové pokrývky, vliv teploty

V této kapitole je popsána analýza fází vývoje sněhové pokrývky v povodí Velké Studené doliny a vliv teploty na délku fáze. Délky fáze a meteorologická data jsou určena podle stejného klíče jako v kapitole 4.1.3.

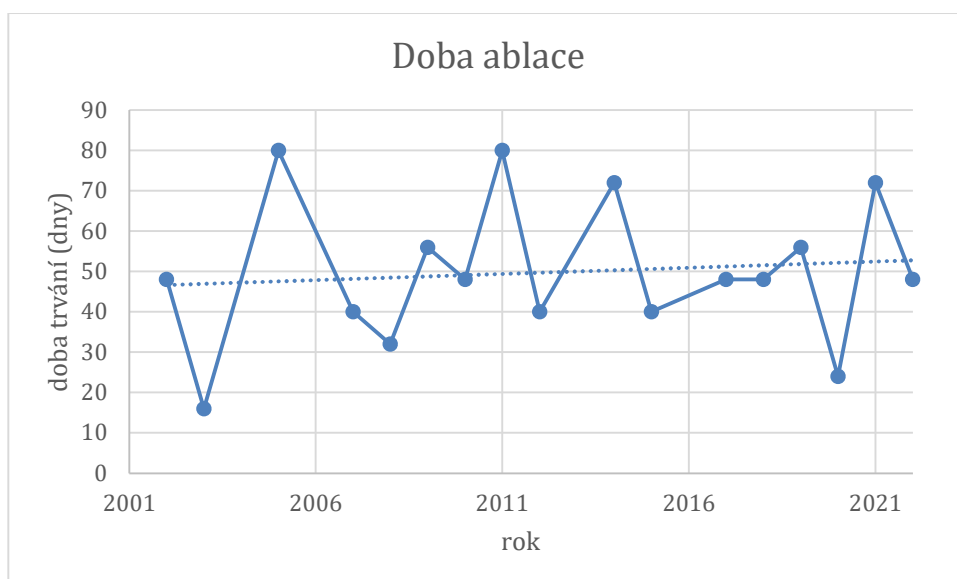
Délka fáze akumulace je počítaná jako doba mezi prvním dnem se sněhovou pokrývkou na min. 10% plochy povodí a posledním dnem s maximální sněhovou pokrývkou. Průměrná délka fáze akumulace trvá v povodí Velké Studené doliny 181 dní. Nejkratší období akumulace se vyskytuje v zimním období roku 2010-2011 a 2013-2014. Nejdéle probíhala akumulace v zimě na přelomu let 2007-2008 229 dní. Doba délky akumulace vykazuje statisticky nevýznamný rostoucí trend s 95 % pravděpodobností dle Mann Kendallova testu.

Tab. 8 Délky fáze vývoje sněhové pokrývky, Velká Studená dolina

rok	den v roce			fáze	
	start	vrchol	konec	akumulace	ablace
2002	289	89	137	165	48
2003	305	105	121	166	16
2005	289	89	169	165	80
2007	289	113	153	189	40
2008	257	121	153	229	32
2009	265	105	161	206	56
2010	289	113	161	189	48
2011	289	65	145	141	80
2012	273	97	137	190	40
2014	305	81	153	141	72
2015	289	113	153	189	40
2017	289	105	153	182	48
2018	265	97	145	197	48
2019	313	105	161	157	56
2020	265	105	129	205	24
2021	273	97	169	190	72
2022	281	97	145	181	48
průměr	284	100	150	181	50



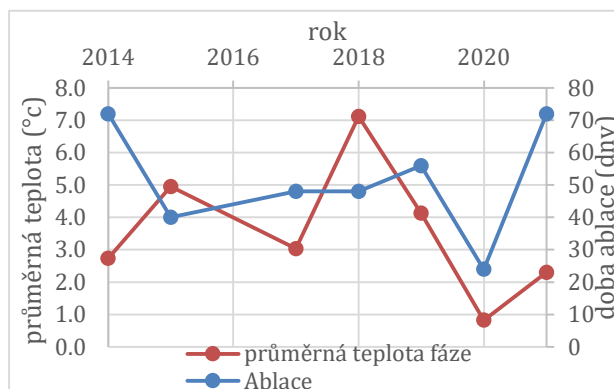
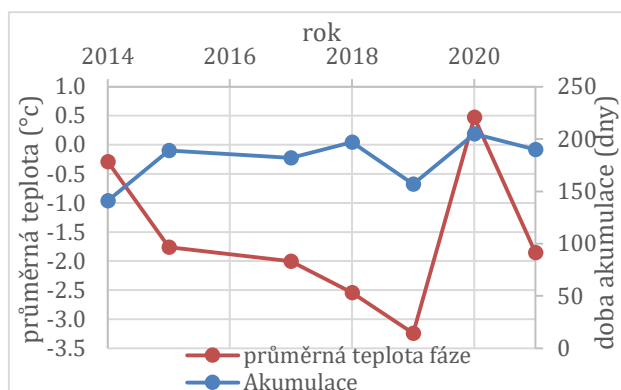
Graf 47: Vývoj délky doby akumulace v povodí Velké Studené doliny



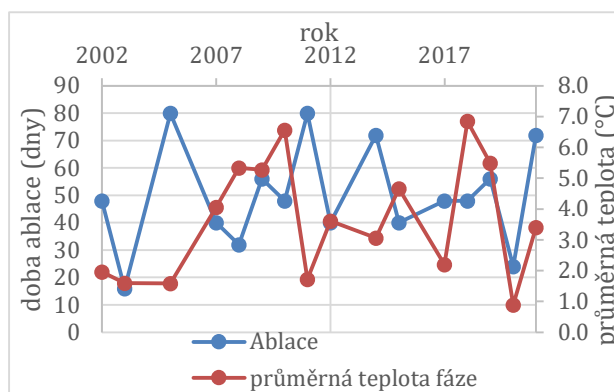
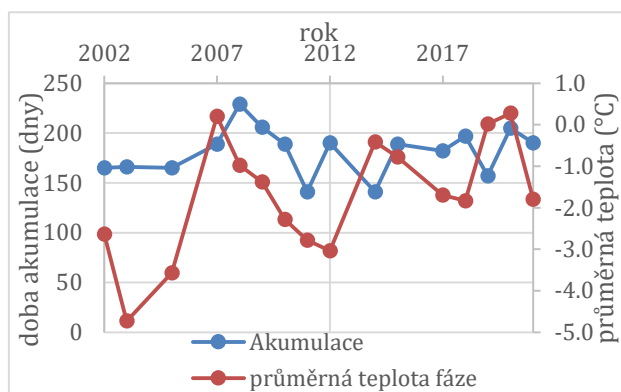
Graf 48: Vývoj délky doby ablace v povodí Velké Studené doliny

Doba ablace trvá kratší dobu než fáze akumulace, počítáme ji jako dobu mezi posledním dnem se sněhovou pokrývkou na celé ploše povodí a na 10 % povodí. Průměrná doba ablace je 50 dní, nejrychleji roztál sníh v povodí Velké Studené doliny za 16 dní na jaře roku 2003. Nejdéle trvala ablace 80 dní v letech 2005 a 2011. Délka doby ablace vykazuje statisticky nevýznamný rostoucí trend s 95 % pravděpodobností dle Mann Kendallova testu.

Na Grafu 50 jsou zobrazeny korelace mezi průměrnými teplotami fáze vypočtených z měsíčních dat a délkou fází. Na Grafu 49 pak korelace mezi průměrnými teplotami fáze vypočtených z denních dat a délkou fází. Žádná z fází nevykazuje statisticky významnou korelaci mezi teplotou a délkou fáze.



Graf 49: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, Velká Studená dolina



Graf 50: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, Velká Studená dolina



---

## 5 Výsledky a diskuse, vliv klimatické změny

### 5.1 Data

Z porovnání dat dálkového průzkumu země MODIS a měřených hodnot sněhové pokrývky ve stanici Skalnaté pleso můžeme konstatovat, že pozorovaná data MODIS jsou pro zimní období validní. Rozdíly mezi měřenými hodnotami a hodnotami z dálkového průzkumu se až na výjimky způsobené zastíněním mraky neliší o více než 8 dní, což je časový krok programu MODIS. Ke špatné detekci sněhové pokrývky dochází v letních měsících. Důvodem může být nejednotná sněhová pokrývka, klasifikování mraků jako sněhové pokrývky, případně časový posun měření oproti dálkovému průzkumu země. Za tuto dobu však může dojít k odtání sněhové pokrývky, či naopak k jejímu nárustu. Častým důvodem také může být chybná klasifikace sněhové pokrývky jako půdy při výšce sněhu mezi 5 a 10 cm (Parajka a Blöschl, 2006).

Pro eliminaci chyb vzniklých zastíněním mraky byly odstraněny snímky s procentuálním zastoupením mraků na více než 30 %. Pokud množství těchto snímků v zimním období nepřekročilo evaluační velikost vzorku na hodnotě 90 %, bylo období z datové řady odstraněno viz. Tab.2. Tímto procesem byl získán co nejkvalitnější datový soubor.

### 5.2 Vývoj sněhové pokrývky

Za pozorované období nelze z dat určit jednoznačný významný trend ve vývoji sněhové pokrývky. Délka sledovaného období je pro určení trendu dlouhodobého vývoje sněhové pokrývky nedostatečná. Z našeho pozorování je patrné střídání období sněhově chudších, s obdobími sněhově bohatšími, což potvrzuje i Krajčí et al. (2016). Nejlépe je možné pozorovat změny ve vývoji sněhové pokrývky na sledovaných parametrech. Dle literatury se výsledky pozorovaných trendů liší v závislosti na sledovaném období (Holko et al., 2011), je proto potřeba brát tyto výsledky s rezervou vzhledem k délce pozorování a typu období.

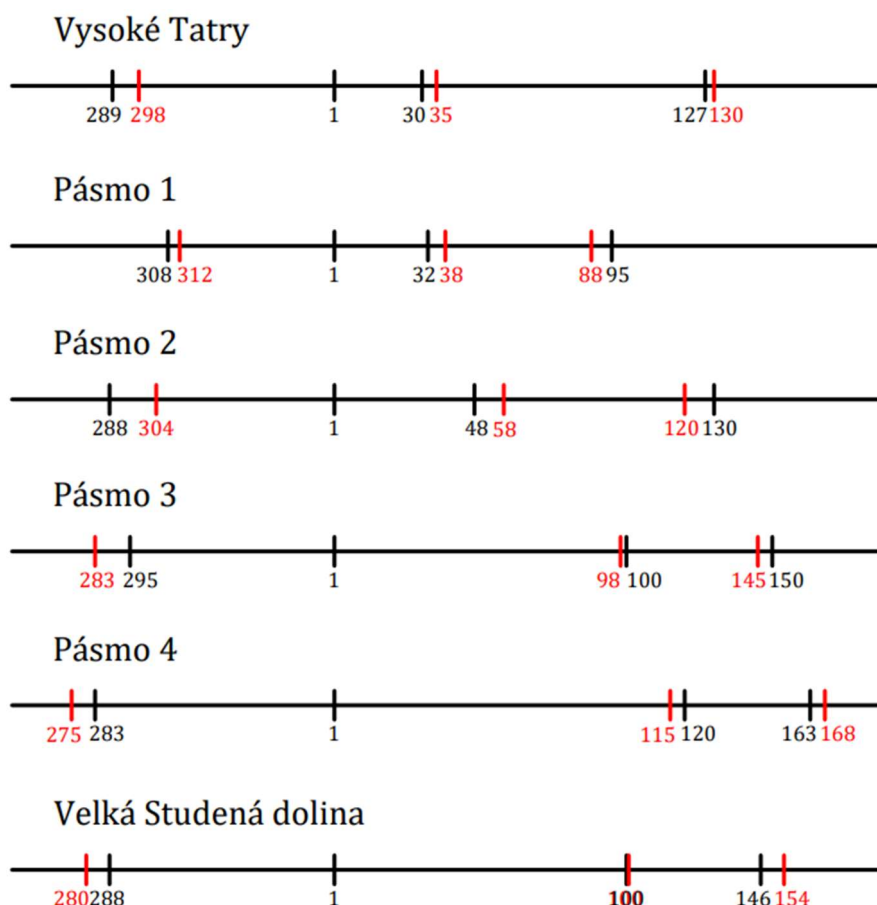
Za projevy klimatické změny na vysokohorská povodí považujeme nárůst teploty vzduchu, nárůst a změnu rozložení srážek. Na datech z celého vertikálního rozpětí Vysokých Tater bylo porovnáním klimatického normálu z let 1961-1990 a na datech z let 1991-2007 zjištěn statisticky významný lineární nárůst roční teploty (0,21-0,30 °C/dekáda). Největší

---

nárůst teplot byl zaznamenán v měsících červenec, srpen, prosinec a leden (Pribullová et al., 2013). Díky nárůstu teploty došlo téměř k vymizení nejchladnějšího teplotního pásu s průměrnými ročními teplotami vzduchu pod  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , který pokrýval vrcholky Tater. Nejvíce se rozšířil pás s průměrnými ročními teplotami vzduchu  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , který vytlačuje zbylé teplé pásy do vyšších nadmořských výšek (Łupikasza a Szypuła, 2019). Nárůst a změnu rozložení srážek potvrdil Górnik et al. (2017). Ti odhalily na datech z Vysokých Tater v období 1991-2010 významný nárůst srážek ve srovnání s předchozími desetiletími, převážně v jarních a letních měsících. V závislosti na nadmořské výšce se projevují tyto vlivy na sněhovou pokrývku.

Při analýze parametrů pro celou oblast Vysokých Tater bylo zjištěno, že dochází ke zkrácení doby pokrytí sněhem na polovině území o 20 dnů, tedy o 13 %. Sníh se vyskytuje na minimálně 10 % plochy v průměru o 10 dnů později než na začátku pozorování, což je pravděpodobně způsobeno nárůstem teploty. U vrcholu akumulace a posledního dne se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy nedochází k výraznému posunu. Můžeme tedy konstatovat, že sníh se na větší části povodí vyskytuje kratší dobu, avšak ve vrcholových partiích tato změna není tak patrná. U doby pokrytí sněhovou pokrývkou na 1/10 plochy totiž dochází ke zkrácení o pouhých 5 dnů. Doba pokrytí sněhem na celé ploše domény se prodloužila o 8 dní. Podrobněji je možné tento proces diskutovat na analýze jednotlivých výškových pásem.

U pozorování změn ve výškových pásmech je možné si všimnout, že pásma 1 a 2, tedy pásma s nižší nadmořskou výškou se často vyvíjejí stejně. Pásma 3 a 4 také často vykazují společný trend, avšak opačného charakteru než pásma s nižší nadmořskou výškou.



Graf 51: Grafické zobrazení milníků vývoje (první sníh, vrchol akumulace, poslední sníh) sněhové pokrývky v jednotlivých oblastech, hodnoty zobrazují den v roce, černě průměrné hodnoty na počátku pozorování, červeně průměrné hodnoty na konci pozorování

První dny se sněhovou pokrývkou se z počátku pozorování vyskytovaly v obdobný čas ve všech výškových pásmech. Od roku 2010 však dochází k tvorbě sněhové pokrývky odlišně, podle nadmořské výšky pásma. Tento jev je pravděpodobně způsoben významnými sněhovými srážkami z počátku sledovaného období, později již zřejmě nedochází k vypadávání velkého množství srážek najednou a pokrývka se tvoří postupně v závislosti na teplotě v daném výškovém pásnu. Vlivem klimatické změny, která s sebou přináší přesun srážek do jarního období, ale také vlivem nárustu teploty, se sníh vyskytuje v nižších pásmech později. Naopak tomu je v pásmech 3 a 4, kdy první dny se sněhovou pokrývkou přicházejí v průměru o 10 dní dříve.

Hodnoty vrcholu akumulace neboli poslední dny se sněhovou pokrývkou na celé ploše domény se v nižších pásmech 1 a 2 posouvají dále do jara, zatímco pásmo 3 a 4 posouvá svůj vrchol zpět do zimy. Poslední dny se sněhovou pokrývkou se tedy kumulují do kratšího období. Jedná se z pohledu přesnosti o nejproblematictější hodnotu, a to z důvodu že známe

---

pouze počet pixelů se sněhem, ale ne množství sněhu v oblasti. Vrchol akumulace nastává dříve, my však nejsme z binárního algoritmu schopni určit kdy přesně, a proto za vrchol považujeme poslední den se sněhovou pokrývkou na celé ploše povodí. Tento problém má vliv i na délky jednotlivých fází.

Vlivem zvyšující se průměrné teploty v jarních měsících dochází k posunu posledního dne se sněhovou pokrývkou na více než 10 % plochy v pásmech 1, 2 a 3 dříve do zimy. Nejvyšší pásmo 4 vykazuje mírný posun do jara.

Délky doby pokrytí lze rozdělit do dvou skupin, na vyšší nadmořská pásma 3 a 4 a nižší nadmořská pásma 1 a 2. Pásma ve skupině mají vždy stejný trend. V nižších nadmořských pásmech se doba pokrytí na 10 % a 50 % plochy zkracuje o 18 dní v pásmu 1 a o 22 dní v pásmu 2. Doba pokrytí na celé ploše pásma se však prodlužuje, v pásmu 2 dokonce o celý měsíc. Opačný průběh mají vyšší nadmořská pásma, kdy se doba pokrytí na 10 % plochy prodlužuje o 5 až 10 dnů. Klesající trend vykazuje jak doba pokrytí na 50% plochy, tak na 100 % plochy pásma. Lze tedy říci, že v nižších dvou pásmech dochází k nárůstu sněhových přeháněk, které zasáhnou celé území pásma, ale sníh taje rychleji než na počátku sledovaného období. Ve vyšších nadmořských pásmech pokrývá sníh větší část oblasti kratší dobu, ale zbytky sněhu se zde drží déle oproti počátku období. Tento proces je pravděpodobně způsoben zvyšující se teplotou a přesunem srážek.

Sněhová pokrývka v povodí Velké sněhové doliny se chová podobně jako nejvyšší pásmo 4, přestože průměrnou výškou spadá do pásma 3. Může to být způsobeno jak vyššími nadmořskými partiemi, které se v povodí nacházejí, tak vysokým množstvím srážkových úhrnů, nebo také orientací povodí. Vliv polohy svahu na množství sněhové pokrývky potvrzuje Blöschl a Kirnbauer (1992). Velká část povodí je kryta z jihu Slavkovským štítem, který vytváří stín sněhové pokrývky, která tak může v povodí setrvat delší dobu díky nižší radiaci ze slunce a tím i nižší průměrné teplotě. V povodí Velké studené doliny došlo u sněhové pokrývky v sledovaném období k následujícímu vývoji. První dny se sněhovou pokrývkou na 1/10 plochy přichází asi o 10 dní dříve, vrchol akumulace zůstává stejný a poslední sníh se na 1/10 plochy povodí zdržuje asi o 5 dní déle. Z těchto údajů vyplývá prodloužení doby pokrytí na 10 % plochy o 15 dní. Na rozdíl od pásma 4 zde však dochází i k prodloužení doby pokrytí na 50 % plochy rovněž o 15 dní. Přesto je doba pokrytí na 50% plochy výrazně kratší než v pásmu 3. U doby pokrytí na 100 % plochy nedochází k žádnému vývoji.

---

### 5.3 Fáze sněhové pokrývky, vliv teploty

Vývojové fáze sněhové pokrývky dělíme na dvě období, akumulace a ablace. V námi pozorovaném případě je doba akumulace vždy delší než doba ablace. Doba akumulace se prodlužuje s nadmořskou výškou. Nejdelší dobu akumulace je možné pozorovat v nejvyšším pásmu 4, naopak doba akumulace je v nejnižším pásmu 1 oproti pásmu 4 více než o polovinu kratší. Ablace probíhá nejrychleji ve vysokých nadmořských pásmech, tedy v pásmu 3 a 4, nejpomaleji pak v pásmu 2. Vliv na delší dobu ablace může mít jehličnatý les, jenž pokrývá více než 50 % plochy pásem 1 a 2. Lesní porost na jižní straně pohoří byl v roce 2004 významně poškozen vichřicí Alžběta, na vývoji sněhové pokrývky není tento zásah významně pozorovatelný, pravděpodobně protože nedošlo k zasažení celé domény, ale pouze její část. Les v důsledku snížení čisté radiace snižuje rychlost tání o 15-60 % ve srovnání s otevřenou plochou (DeWalle, Rango, 2008). Tento proces potvrzuje také Varhola et al. (2010), který tvrdí, že ve vyšších nadmořských výškách se rozdíly mezi táním v lesích a mýtinami zvětšují. Ablace začíná ve vyšších pásmech později, hodnoty čisté radiace jsou proto také vyšší. Nejvýznamnějším vlivem na rozdíl délky ablace budou mít teploty, které jsou v zimní části roku kdy tají pásma 1 a 2 chladnější, než v období ablace pásem 3 a 4. Proto pásma 1 a 2 tají pomaleji. Dalším vlivem, který může ovlivňovat délku ablace je již výše zmiňovaná nepřesně stanovená hodnota vrcholu akumulace. Z tohoto důvodu jsou reálné délky ablace delší a doba akumulace kratší, než jsou hodnoty udávané v této práci.

Doba akumulace se za sledované období v celé oblasti Vysokých Tater zkrátila o 10 dnů, v délce ablace nedošlo k žádnému vývoji. K žádnému vývoji nedošlo ani u fáze akumulace v pásmu 1. V pásmu 2 došlo ke zkrácení doby akumulace o 5 dnů. Ve zbylých pásmech se doba akumulace již prodlužuje, a to v pásmu 2 o 5 dnů, v pásmu 3 o 7 dnů a v pásmu 4 opět o 5 dnů. Délka ablace se v pásmech 1-3 zkracuje. K největšímu zkrácení doby ablace dochází v pásmu 2 a to o 21 %, tedy 17 dnů. V pásmech 1 a 3 se délka fáze ablace zkrátila o 5 dnů. K prodloužení délky ablace došlo v pásmu 4 o 6 dnů. Povodí Velké Studené doliny se opět vyvíjí stejně jako pásmo 4, délka doby akumulace i ablace se prodlužují o 7 dnů.

Ovlivnění délky fáze sněhové pokrývky průměrnou teplotou vzduchu v době fáze bylo ověřeno Spearmanovým koeficientem pořadové korelace s 95 % pravděpodobností. K statisticky významnému ovlivnění délky akumulace průměrnou teplotou fáze vypočtenou z průměrných měsíčních hodnot dochází pouze u pásma 3. U fáze ablace dochází k statisticky

významnému ovlivnění u pásma 3, kde byla počítána průměrná teplota fáze z denních hodnot. Z výsledků je tedy patrné, že teplota není jediný prvek ovlivňující délku fáze. Mezi další významné prvky ovlivňující délky fází patří lesní porost a jeho hustota, nadmořská výška a množství srážek (Varhola et al., 2010).

Tab. 9 Souhrnná statistika pozorovaných veličin pro jednotlivé oblasti

	Vysoké Tatry	pásma 1	pásma 2	pásma 3	pásma 4	Velká Studená dolina
Ø první den	19/10	4/11	22/10	13/10	3/10	9/10
Med první den	19/10	8/11	23/10	15/10	7/10	15/10
Ø maximální den	1/2	4/2	21/2	8/4	26/4	8/4
Med maximální den	6/2	10/2	18/2	6/4	30/4	14/4
Ø poslední den	7/5	1/4	3/5	27/5	13/6	28/5
Med poslední den	16/5	29/3	8/5	24/5	17/6	1/6
Ø doba pokrytí > 10%	200	148	193	226	252	231
Med doba pokrytí > 10 %	202	149	197	222	253	229
Ø doba akumulace	104	91	121	177	205	181
Med doby akumulace	110	86	125	174	205	189
Ø doba ablace	96	57	72	50	46	50
Med doby ablace	96	56	72	72	40	48
Ø teplota akumulace (°C)	-1.36	-2.95	-1.76	-1.36	-1.60	-1.60
Ø teplota ablace (°C)	0.56	0.17	0.64	3.27	2.61	3.59

---

## 6 Závěr

Ze sledovaných parametrů sněhové pokrývky v oblasti Vysokých Tater v analyzovaném období vyplívají určité časové změny, avšak sledované období je příliš krátké pro závěry z hlediska důsledků globální klimatické změny. Výsledky této studie nelze interpretovat s ohledem na množství sněhové pokrývky, jednoznačná je pouze plocha sněhové pokrývky. Tento fakt je nejproblematictější pro stanovení hodnoty vrcholu akumulace, tedy dne s maximální sněhovou pokrývkou. Z analýzy dat je patrné střídání období sněhově bohatších s obdobími sněhově chudšími. Pozorování vývoje sněhové pokrývky v celé doméně Vysokých Tater je obtížné, proto byla oblast rozdělena do výškových pásem, na kterých je možné pozorovat, odlišný vývoj sněhové pokrývky v závislosti na nadmořské výšce

Doba pokrytí povrchu sněhem se v pásmech s nižší nadmořskou výškou na 1/10 a 1/2 plochy se za sledované období zkracuje. V obou nejnižších nadmořských pásmech došlo v posledních letech k nárustu sněhové pokrývky na celé ploše povodí. Období od roku 2017 se tedy dá považovat za sněhově bohatou periodu, avšak kvůli zvyšujícím se teplotám sníh taje rychleji. Ve vyšších nadmořských pásmech leží sněhová pokrývka na větší části oblasti kratší dobu, ale zbytky sněhu se zde drží déle oproti počátku sledovaného období.

První dny se sněhovou pokrývkou se na začátku pozorování vyskytují v podobný čas, postupně dochází k jejich rozptylu. Hodnoty vrcholu akumulace se kumulují do kratšího časového období na konci zimy. Tyto hodnoty jsou zatěžkány velkou nepřesností. Poslední dny se sněhovou pokrývkou se vyskytují dříve než na začátku pozorování až na výjimku v podobě pásma 4, kde tento den přichází později.

Délka fáze ablace je vždy kratší než doba akumulace. Ablace probíhá rychleji ve vyšších nadmořských pásmech, vlivem vyšších teplot v pokročilé fázi jara. V nižších nadmořských pásmech je sněhová pokrývka chráněna proti radiaci lesním porostem. Za sledované období dochází k urychlení procesu ablace. Doba akumulace se prodlužuje s rostoucí nadmořskou výškou. U doby akumulace nedošlo za sledované období k žádnému významnému vývoji.

Povodí Velké Studené doliny kopíruje svým průběhem vývoje sněhové pokrývky nejvyšší nadmořské pásmo. Ve vývoji dochází k těmto změnám: první dny se sněhovou pokrývkou přicházejí dříve, vrchol akumulace se nepřemísťuje a poslední den se sněhovou

---

pokrývkou nastává později. Doba pokrytí sněhem na 10 % a 50% plochy se prodlužuje, na celé ploše povodí zůstává stejná.

Průměrná teplota fáze není jediným činitelem, který ovlivňuje délku fáze vývoje sněhové pokrývky. Tento fakt byl ověřen na průměrných teplotách fáze vypočtených z denních a měsíčních hodnot. K statisticky významnému ovlivnění teplotou dochází pouze v jednom případě fáze ablace a v jednom případě fáze akumulace.

O časové přesnosti dat na volném prostranství jsme se přesvědčili porovnáním měřených hodnot sněhové pokrývky s daty MODIS. Pokud v zimním období není oblast zakryta oblačností, data fungují bezchybně. Pro detekci letních sněhových přeháněk není MODIS vhodný.

Návrhem pro zlepšení analýzy sledované problematiky je rozbor přesnosti snímků MODIS pod lesním porostem v porovnání s NDFSI (Normalizovaný diferenční index sněhu v lesích). K výraznému zpřesnění a lepšímu porozumění pozorovaných procesů by přispělo modelování množství sněhové pokrývky v této oblasti. Pro tento rozbor však nejsou v oblasti dostatečně četná meteorologická pozorování. Poslední návrh na pokračování výzkumu se týká oblasti zasažené vichřicí v roce 2004. Zde by bylo zajímavé pozorovat, jaký mělo odlesnění vliv na vývoj sněhové pokrývky, speciálně na fázi ablace, kdy povrch není chráněn proti přímé radiaci.



---

## 7 Seznam obrázků

Obr. 1 Zobrazení tří hlavních fází tání sněhové pokrývky, povodí v Západních Tatrách, průměrná výška 1500 m n. m., 1 – teplota vzduchu v 1500 m n. m., 2 – srážky v 1500 m n. m., 3 – odtok z povodí, 4 – SWE (vodní hodnota sněhu) v 1500 m n. m (Holko et al., 2011).....	11
Obr. 2 Zobrazení pixelů s přiřazenou hodnotou, bílá barva zobrazuje sníh, modrá oblačnost a žlutá barva půdy, snímek z 21.9.2004 .....	15
Obr. 3 a 4 Vlevo zobrazení pixelů, bíle sněhová pokrývky, modře oblačnost a žlutě půda, 21. března 2021, vpravo využití půdy, tmavě zelená jehličnatý les, červeně označena výšková pásma.....	16
Obr. 5 Popisovaná oblast Vysokých Tater, červeně vyznačena Velká Studená dolina.....	23
Obr. 6 Využití půdy v oblasti Vysokých Tater, 2019 .....	26
Obr. 7 Rozdělení domény do jednotlivých pásem dle výšky .....	27
Obr. 8 Zobrazení polohy a výškopisu povodí Velké Studené doliny .....	49
Obr. 9 Znázornění využití půdy v povodí Velké Studené doliny, 2019 .....	49

## 8 Seznam tabulek

Tab. 1 Odstraněná zimní období pro dané domény .....	20
Tab. 2 Analýza snímků MODIS pro zimní období.....	21
Tab. 3 Využití půdy pro oblast Vysokých Tater .....	25
Tab. 4 Rozdělení výškových pásem.....	26
Tab. 5 Délky fáze vývoje sněhové pokrývky, celá oblast Vysokých Tater .....	42
Tab. 6. Teplotní výškový gradient pro jednotlivé měsíce .....	44
Tab. 7 Využití půdy v povodí Velké Studené doliny .....	49
Tab. 8 Délky fáze vývoje sněhové pokrývky, Velká Studená dolina .....	54
Tab. 9 Souhrnná statistika pozorovaných veličin pro jednotlivé oblasti .....	62

## 9 Seznam grafů

Graf 1: Procentuální pokrytí snímku oblačností, modře zobrazena hranice 15 %, červeně 30 % a zeleně 45% .....	17
Graf 2: Zobrazení prvních dnů v roce, kdy se nachází sněhová pokrývky na více jak 10 % plochy domény .....	18
Graf 3: Zobrazení posledních dnů v roce se sněhovou pokrývkou na více jak 10 % plochy sledované oblasti .....	19
Graf 4: Zobrazení doby pokrytí sněhem na více jak 10 % plochy oblasti s trendy .....	19
Graf 5: Porovnání měřených hodnot s daty MODIS, první den sněhovou pokrývkou .....	22
Graf 6: Porovnání měřených hodnot s daty MODIS, poslední den se sněhovou pokrývkou .....	22

---

Graf 7: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, celá oblast..	28
Graf 8: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, pásmo 1 .....	29
Graf 9: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021 pásmo 2 .....	29
Graf 10: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, pásmo 3 ...	30
Graf 11: Procentuální pokrytí celé plochy sněhovou pokrývkou mezi roky 2000–2021, pásmo 4 ...	30
Graf 12: Znázornění prvních dní, kdy je sněhová pokrývka na více než 10 % plochy domény .....	31
Graf 13: Poslední den v roce se sněhovou pokrývkou na celé ploše území .....	32
Graf 14: Zobrazení posledních dní v roce, kdy je sněhová pokrývka na minimálně 10 % plochy celé domény .....	33
Graf 15: Délka doby pokrytí sněhem na minimálně 10 % celé plochy domény .....	33
Graf 16: Doba pokrytí sněhovou pokrývkou na min 50% plochy oblasti .....	34
Graf 17: Doba pokrytí na 100 % plochy oblasti Vysoké Tatry .....	34
Graf 18: Porovnání doby pokrytí sněhem na 10 %, 50 % a 100% celé oblasti.....	35
Graf 19: První den v roce se sněhovou pokrývkou na více jak 10 % plochy výškového pásma .....	36
Graf 20: Poslední den v sezóně se sněhovou pokrývkou na celé ploše pásma .....	36
Graf 21: Poslední den v roce se sněhovou pokrývkou na více jak 10 % plochy výškového pásma....	37
Graf 22: Doba pokrytí sněhem na minimálně 10 % plochy výškového pásma.....	37
Graf 23: Doba pokrytí sněhem na minimálně 50 % plochy výškového pásma.....	38
Graf 24: Doba pokrytí sněhem na 100% plochy výškového pásma .....	39
Graf 25: zjednodušený graf vývoje sněhové pokrývky pro výšková pásma, průměrný rok.....	40
Graf 26: Délka doba akumulace pro celou oblast pozorování.....	41
Graf 27: Délka období ablace sněhové pokrývky pro celou oblast pozorování.....	41
Graf 28: Doba akumulace sněhové pokrývky pro jednotlivá výšková pásma .....	43
Graf 29: Doba ablace sněhové pokrývky pro výšková pásma .....	43
Graf 30: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, celá doména .....	454
Graf 31: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 1.....	454
Graf 32: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 2.....	465
Graf 33: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 3.....	475
Graf 34: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, pásmo 4.....	475
Graf 35: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, celá doména.....	46
Graf 36: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 1.....	46
Graf 37: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 2.....	47
Graf 38: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 3.....	47
Graf 39: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, pásmo 4.....	47

---

Graf 40: Vývoj procentuálního pokrytí území Velké Studené doliny sněhovou pokrývkou .....	50
Graf 41: Zobrazení prvních dní, kdy je sněhová pokrývka na více než 10 % plochy Velké Studené doliny .....	51
Graf 42: Poslední den v sezóně se sněhovou pokrývkou na celé ploše Velké Studené doliny .....	51
Graf 43: Poslední den se sněhovou pokrývkou na min 10 % plochy Velké Studené doliny.....	52
Graf 44: Doba pokrytí sněhem na minimálně 10 % plochy Velké Studené doliny .....	52
Graf 45: Doba pokrytí sněhem na minimálně 50 % plochy Velké Studené doliny .....	53
Graf 46: Doba pokrytí na 100% plochy povodí Velké Studené doliny .....	53
Graf 47: Vývoj délky doby akumulace v povodí Velké Studené doliny .....	55
Graf 48: Vývoj délky doby ablace v povodí Velké Studené doliny.....	55
Graf 49: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z denních teplot, Velká Studená dolina .....	56
Graf 50: Znázornění průměrné teploty fáze a její délky, průměr z měsíčních teplot, Velká Studená dolina .....	56
Graf 51: Grafické zobrazení milníků vývoje (první sníh, vrchol akumulace, poslední sníh) sněhové pokrývky v jednotlivých oblastech, hodnoty zobrazují den v roce, černě průměrné hodnoty na počátku pozorování, červeně průměrné hodnoty na konci pozorování.....	59

---

## 10 Seznam literatury

- [1] BALÁŽ, E. (2010). *Tatry: příroda*. Praha: Baset.
- [2] BLÖSCHL, G., & KIRNBAUER, R. (1992). An analysis of snow cover patterns in a small alpine catchment. *Hydrological Processes*, 6(1), 99-109.
- [3] DEWALLE, D. R., & RANGO, A. (2008). Snowpack energy exchange: Topographic and forest effects. In *Principles of Snow Hydrology* (pp. 182-210). Cambridge Univ. Press.
- [4] DURO, D. C., COOPS, N. C., WULDER, M. A., & Han, T. (2007). Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in physical geography*, 31(3), 235-260.
- [5] DUŠKOVÁ, K. (2021). *Geneze odtoku v alpinském povodí* (Bachelor's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.).
- [6] ELDER, K., DOZIER, J., & MICHAELSEN, J. (1991). Snow accumulation and distribution in an alpine watershed. *Water Resources Research*, 27(7), 1541-1552.
- [7] FUSSELL, J., RUNDQUIST, D., & HARRINGTON, J. A. (1986). On defining remote sensing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(9), 1507-1511.
- [8] GÓRNIK, M., HOLKO, L., POCIASK-KARTECZKA, J., & BIČÁROVÁ, S. (2017). Variability of precipitation and runoff in the entire High Tatra Mountains in the period 1961-2010. *Prace Geograficzne*, (151).
- [9] HALL, D. K., RIGGS, G. A., SALOMONSON, V. V., DIGIROLAMO, N. E., & BAYR, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 181-194.
- [10] HASA, M. (2010). *Metody modelování odtoku ze sněhové pokrývky: Případová studie pramenné oblasti ostrovské Bystřice*.
- [11] HOLKO, L., GORBACHOVA, L., & KOSTKA, Z. (2011). Snow hydrology in central Europe. *Geography Compass*, 5(4), 200-218.
- [12] HORNING, N., MCPHEARSON, P. T., & Wallace, O. C. (2009). *An Introduction to Remote Sensing*.
- [13] KRAJČÍ, P., HOLKO, L., & PARAJKA, J. (2016). Variability of snow line elevation, snow cover area and depletion in the main Slovak basins in winters 2001–2014. *J. Hydrol. Hydromech*, 64(1), 12-22.

- 
- [14] KŘEČEK, J., TUREK, J., LJUNGREN, E., STUHLÍK, E., & ŠPORKA, F. (2006). Hydrological processes in small catchments of mountain headwater lakes: The Tatra Mountains. *Biologia*, 61(18), S1-S10.
- [15] KUČERA, J. (2017). Aplikční možnosti metod DPZ pro plánování zimních rekreačních aktivit. Brno. Bakalářská práce. Masarykova univerzita.
- [16] KUNSKÝ, J. (1974). Československo fyzicky zeměpisně. SPN Praha, 251 s.
- [17] LACIKA, J., KOLLÁR, D., PACOLA, A., & BOHUŠ, I. (2007). Vysoké Tatry. Akcent.
- [18] LIBBRECHT, K. G. (2005). The physics of snow crystals. *Reports on progress in physics*, 68(4), 855.
- [19] LISTON, G. E., & ELDER, K. (2006). A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet). *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 217-234.
- [20] LOMPECH, M. (2018). Disenchantment in the Tatras. The Vulnerability of the "Pocket Alps"(Slovakia). *Journal of Alpine Research| Revue de géographie alpine*, (106-3).
- [21] ŁUPIKASZA, E., & SZYPUŁA, B. (2019). Vertical climatic belts in the Tatra Mountains in the light of current climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(1), 249-264.
- [22] MAJERČAKOVÁ, O., Škoda, P., & Danáčková, Z. (2007). Vývoj vybraných hydrologických a zrážkových charakteristik za obdobia 1961–2000 a 2001–2006 v oblasti Vysokých Tatier. *Meteorologický časopis*, 10(4), 205-210.
- [23] OSTROŽLÍK, M. TEPLITNO-VLHKOSTNÝ REŽIM VO VYSOKÝCH TATRÁCH.
- [24] PARAJKA, J., & BLÖSCHL, G. (2006). Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(5), 679-689.
- [25] POMEROY, J. W., & BRUN, E. (2001). Physical properties of snow. *Snow ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*, 45, 118.
- [26] PRIBULLOVÁ, A., CHMELÍK, M., & PECHO, J. (2013). Air temperature variability in the high tatra mountains. In *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability* (pp. 111-130). Springer, Berlin, Heidelberg.
-

- 
- [27] RIGGS, G. A., HALL, D. K., & ROMÁN, M. O. (2019). MODIS snow products collection 6.1 user guide. National Snow and Ice Data Center: Boulder, CO, USA, 66. Dostupné z: [https://nsidc.org/sites/default/files/c61\\_modis\\_snow\\_user\\_guide.pdf](https://nsidc.org/sites/default/files/c61_modis_snow_user_guide.pdf)
- [28] SEXSTONE, G. A., CLOW, D. W., FASSNACHT, S. R., LISTON, G. E., HIEMSTRA, C. A., KNOWLES, J. F., & PENN, C. A. (2018). Snow sublimation in mountain environments and its sensitivity to forest disturbance and climate warming. *Water Resources Research*, 54(2), 1191-1211.
- [29] SHAW, E. M., et al. (2011). *Hydrology in practice*. CRC press.
- [30] SLOVENSKÁ LESNÍCKÁ SPOLEČNOSTĚ (2012), Banská Bystrica. Klimatické pomery Vysokých Tatier: Odborná štúdia k projektu OPVV 26220220087 „Vývoj ekologických metód pre kontrolu populácií vybraných druhov lesných škodcov v zraniteľných vysokohorských oblastiach Slovenska. Tatranská Lomnica.
- [31] STRASSER, U., BERNHARDT, M., WEBER, M., LISTON, G. E., & MAUSER, W. (2008). Is snow sublimation important in the alpine water balance?. *The Cryosphere*, 2(1), 53-66.
- [32] 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*, 392(3-4), 219-233.
- [33] VÁVROVÁ, Z. (2019). Detekce změn vegetačního pokryvu lesních porostů pomocí dat DPZ velmi vysokého rozlišení.
- [34] VEVERKA, A., VELÁT, J. a OŠANEC, F. (1951). *Vysoké Tatry*. Praha: Nakladatelství Československé obce sokolské, Dostupné z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:f3204f8c0562736f98c5cf1d59cbb8de>
- [35] XIN, Q., WOODCOCK, C. E., LIU, J., TAN, B., MELLOH, R. A., & DAVIS, R. E. (2012). View angle effects on MODIS snow mapping in forests. *Remote Sensing of Environment*, 118, 50-59.

#### **Elektronické zdroje:**

- [36] NSIDC, ©2022. What is NDSI snow cover and how does it compare to FSC? [online]., National Snow and Ice Data Center [cit. 12.10.2022]. Dostupné

---

z: <https://nsidc.org/data/user-resources/help-center/what-ndsi-snow-cover-and-how-does-it-compare-fsc>

- [37] The COMET® Program, ©2011. Hydrologie sněhu [online]. [cit. 4.11.2022]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/snowmelt/navmenu.php.htm>
- [38] Česká Geologická služba, ©2022. Věda a výzkum, Dálkový průzkum země [online]. [cit. 15.11.2022]. Dostupné z: <https://www.geology.cz/extranet/vav/zemska-kura/dpz>
- [39] Česká meteorologická společnost, ©2017. Elektronický meteorologický slovník (eMS) [online]. [cit. 15.11.2022] Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

---

zvýšení odtoku v období duben-květen v důsledku dřívějšího začátku období tání sněhu a především v důsledku většího množství uloženého sněhu v důsledku zvýšených zimních srážek

Očekává se, že tání sněhu zůstane beze změny nebo se mírně zvýší v nadmořských výškách pod 3 000 m n. m. v důsledku větších zimních srážek (obr. 8). Důsledným výsledkem je nárůst tání sněhu přibližně o 100-200 mm.rok-1. nad 3000 m n. m. v důsledku teplejšího klimatu (obr. 8).

Catchments with the highest average elevation are expected to experience the most significant decrease in mean discharge, while catchments with the lowest average elevation show a tendency toward a small increase. Such a result is a combination of three effects, (i) the strong correlation of glacierized area with elevation and therefore reduction in the ice melt contribution; (ii) a larger increase of evapotranspiration at higher elevation due to reduced ice cover and duration of snow cover; (iii) the increase in precipitation in the north-west portion of the Rhone catchment where the lowest elevation catchments are also located.

Množství Tání stejné nebo rostoucí, nárůst srážek v únoru až dubnu, v důsledku vyšších teplot se také zvyšuje příspěvek tání z nadmořských výšek nad 3200 m n. m. Vliv evapotranspirace není ve vysokohorských prostředí tak významný

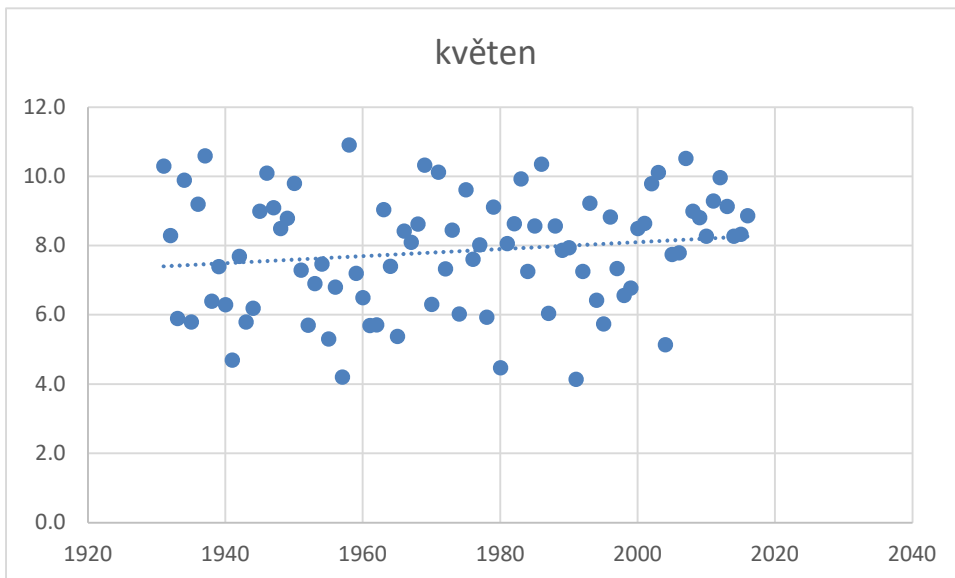
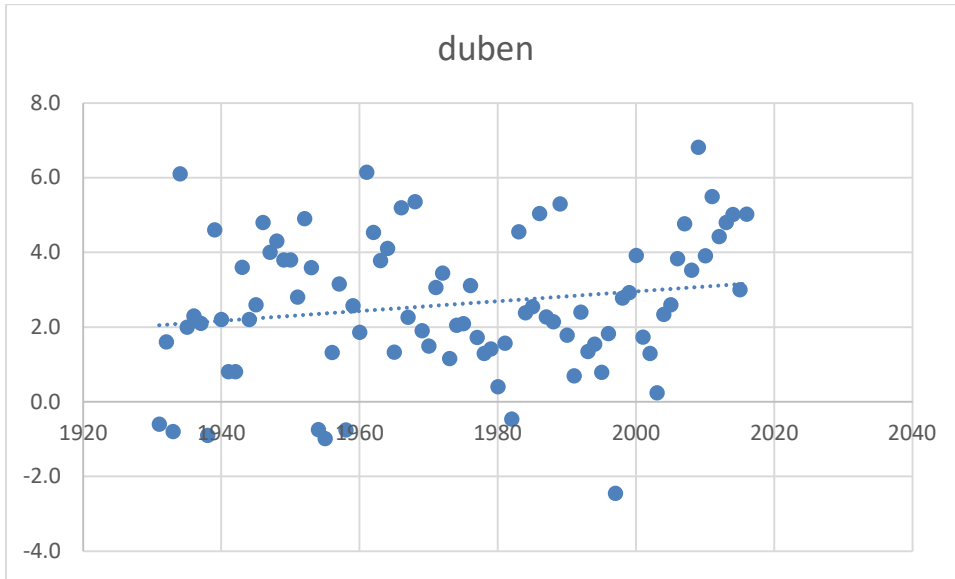
Klimatický změna nemá takový vliv na velká povodí bez ledovců, jako malá horská ledovcoá povodí. (Fatichi et al., 2013)

Kzávěru že pokrytí sněhovou pokrývkou se snižuje v nižších polohách a v horních naopak narůstá došel v Alpách Messerli (2004)

(should i write there about how outflow change?? As a result, spring peak discharges are becoming larger while the summer/autumn flows are experiencing severe declines (Varhola et al., 2010))

Průměrné měsíční teploty





Mean annual mountain contribution to total discharge of freshwater and proportion of mountain area (represented by a gauging station in the vicinity of about 1000 m a.s.l.) relative to the entire catchment for the selected river basin.

