

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra geografie

Maria Youssefová

**Klimatická změna a její projevy v Krkonoších: příklad
dynamiky sněhové pokrývky**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Martin Erlebach Ph.D.
Olomouc 2024

Bibliografický záznam

- Autor:** Maria Youssefová
- Studijní obor:** Environmentální rizika a klimatická změna
- Název práce:** Klimatické změny a její projevy v Krkonoších: příklad dynamiky sněhové pokrývky
- Title of thesis:** Climate change and its manifestations in the giant Mountains: an example of snow cover dynamics.
- Vedoucí práce:** Mgr. Martin Erlebach, Ph.D.
- Rozsah práce:** 53 stran
- Abstrakt:** Předkládaná bakalářská práce se zabývá klimatickou změnou a jejími projevy v Krkonoších a změnou jeho sněhové pokrývky. Literární část popisuje dopad klimatické změny v celém světě a postupně dopad těchto změn na sněhové pokrývky, vliv meteorologické veličiny, zejména teplota vzduchu a úhrn srážek na výšku sněhové pokrývky a též se zabývá negativními vlivy laviny na horské ekosystémy v této oblasti. A zároveň této změny ukazuje dopady na lesní ekosystémy a kolísání horní hranice lesa ve výchozím území. Praktická část se zaměřuje na srovnání dynamiky sněhové pokrývky a meteorologických veličiny ve vybraných stanicích hydrometeorologického ústavu. Dále se věnuje dynamice lavinové aktivity v posledních dekádách, dynamice sněhové pokrývky v hřebenových partiích a vývoji sněhu na sněhovém poli Mapy republiky.
- Klíčova slova:** Klimatická změna, dopady na ekosystémy, změn lavinové aktivity, dynamika sněhová pokrývka.
- Abstract:** The present bachelor thesis deals with climate change and its manifestations in the Giant Mountains and the change of its snow cover. The literature section describes the impact of climate change worldwide and the gradual impact of these changes on the snow cover, the effect of meteorological variables, especially air temperature and precipitation on the snow cover and also discusses the negative effect of avalanches on mountain ecosystems in this area. And at the same time this change shows the impacts on forest ecosystems and the fluctuations of the upper limit of the forest in the initial area. The practical part focuses on the comparison of the dynamics of snow cover and meteorological variables in selected stations of the Hydrometeorological Institute, Comparison of the change in the dynamics of avalanche activity in recent decades, Dynamics of snow cover in the ridge parts and the evolution of the snow on the snow field Map of the Republic.

Keywords:

Climate change, impacts on ecosystems, changes in avalanche activity, snowpack dynamics.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Martin Erlebach, Ph.D., a veškeré použité zdroje jsem uvedla v seznamu literatury.

Olomouc, 5. května 2024

.....
Maria Youssefová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat panu Mgr. Martin Erlebach Ph.D. vedoucímu mé práce za podporu, cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce. Také bych chtěla poděkovat své nejlepší kamarádce s pevnými nervy a své rodině.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Maria YOUSSEFOVÁ**
Osobní číslo: **R210362**
Studijní program: **B0532A330035 Environmentální rizika a klimatická změna**
Téma práce: **Klimatická změna a její projevy v Krkonoších: příklad dynamiky sněhové pokrývky**
Zadávající katedra: **Katedra geografie**

Zásady pro vypracování

Práce se bude zabývat dynamikou sněhové pokrývky v Krkonoších včetně souvisejících jevů, jako je lavinová aktivita, a to v kontextu probíhající klimatické změny. Dynamika sněhové pokrývky bude analyzována na základě dostupných dat z klimatických stanic ČHMÚ (sněhové polštáře). Vyhodnocena budou rovněž terénní data Správy KRNAP zahrnující vývoj sněhové pokrývky i lavinovou aktivitu. Výsledky budou diskutovány v kontextu estatických klimatických proměnných.

Rozsah pracovní zprávy: **5 000 – 8 000 slov**
Rozsah grafických prací: **Podle potřeb zadání**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Semtam doporučené literatury:

Floušek, J., Hartmanová, O., Štursa, J., Potocký, J. (eds) (2007): *Krkonoše. Příroda, historie, život*. Baset, Praha.
Jeník, J. (1967): *Alpínská vegetace Krkonoš, Králického Sněžníku a Hrabého Jeseníku: teorie a nebo orografických systémů*. Nakladatelství ČSW, Praha.
Laybourn-Parry, J., Tranter, M., Hodson, J. (2012): *The Ecology of Snow and Ice Environments*. Oxford University Press Inc., New York.
Marek, M. (ed) (2022): *klimatická změna – příčiny, dopady a adaptace*. Academia, Praha.
Mutt, R., Vonnet, V., Grünewald, T. (2018): *The Seasonal Snow Cover Dynamics: Review on Wind-Driven Coupling Processes*. *Frost. Earth Sci.*, 6, 197.
Spusta, V., Spusta, V. J., and Kocianová, M. (2019): *Lavinový katastr a zimní situace v české části Krkonoš*. *Opera Carcantica*, 56, 21-110.
Trenč, V., Panocná, T., King, G. & Büntgen, U. (2015): *A new tree-ring-based summer temperature reconstruction over the last three centuries for east-central Europe*. *International Journal of Climatology* 35: 3160-3171.
Trenč, V., Dobihal, M., Kupková, L., Lysák, J., Potůčková, M. (2020): *Horní hranice lesa v Krkonoších - jaké faktory podmiňují její změny v čase?* *Opera Carcantica* 57, 5-18.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Martin Erlebach, Ph.D.**
Katedra geografie

Datum zadání bakalářské práce: 30. března 2023
Termín odevzdání bakalářské práce: 30. dubna 2024

LS

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan

doc. Mgr. Pavel Klápka, Ph.D.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 30. března 2023

Obsah

Úvod a cíle	9
1 Základní pojmy a dopady klimatické změny	11
1.1 Dopady klimatické změny ve světě	11
1.1.1 Tání ledovců	12
1.1.2 Zvyšování mořské hladiny	12
1.1.3 Změna směru či zastavení mořského proudění	13
1.1.4 Ztráta biodiverzity.....	13
1.1.5 Desertifikace	14
2 Klimatická změna a horské ekosystémy	14
2.1 Hlavní problémy	14
3 Dynamika sněhové pokrývky	15
3.1 Vliv klimatu na dynamiku sněhové pokrývky	16
3.2 Dynamika sezonní sněhové pokrývky	17
4 Klimatická změna v Krkonoších.....	18
4.1 Orografické charakteristiky území Krkonoše	19
4.1.1 Neživá příroda v Krkonoších.....	20
4.2 Dynamika horní hranice lesa	21
4.3 Vliv na alpské bezlesí.....	23
5 Dynamika sněhové pokrývky v Krkonoších.....	23
6 Vlastní metodika práce	27
6.1 Vymezení území	27
7 Výsledky a Diskuse.....	28
7.1 Srovnání dynamiky sněhové pokrývky ve stanicích ČHMÚ.....	28
7.2 Srovnání teploty vzduchu ve stanicích ČHMÚ.....	32
7.3 Srovnání úhrnu množství srážek ve stanicích ČHMÚ	35
7.4 Dynamika sněhové pokrývky v hřebenových partiích.....	38
7.5 Porovnání změny dynamiky lavinové aktivity v posledních dekádách.....	40
7.6 Srovnání velikostních parametrů lavin dle dekád	42
7.7 Vývoj sněhu na sněhovém poli Mapy republiky	45
8 Závěr.....	47
9 Summary.....	49
10 Seznam použité literatury	49
11 Seznam příloh.....	53

Úvod a cíle

Globální klimatické změny ovlivňují Krkonoše, které jsou klíčovým pohořím České republiky. Touto změnou jsou do značné míry ovlivněny klimatické podmínky regionu, což má dopad i na sněhové podmínky. Přítomnost sněhu v Krkonoších je nanejvýš důležitá jak pro ekosystém, tak pro místní ekonomiku. Jedinečné podnebí krkonošského regionu, charakteristické vysokou nadmořskou výškou a vzdáleností od moře, je silně ovlivněno kontinentálními faktory, což má za následek mrazivé zimy a vydatné množství sněhu. Postupné účinky změny klimatu, zejména oteplování klimatu, však tuto dynamiku postupně mění.

Podnebí v regionu Krkonoš je ovlivňováno řadou faktorů. Klima regionu je do značné míry ovlivněno jeho geografickou polohou a vysokou nadmořskou výškou Krkonoš. Kvůli této nadmořské výšce je oblast náchylnější k výkyvům teplot, což ji činí zranitelnější vůči dopadům změny klimatu. Účinky globálního oteplování tuto zranitelnost jen umocnily, což má za následek posuny v teplotních i srážkových vzorcích v celém regionu. Lidské aktivity, jako je odlesňování, rozvoj cestovního ruchu a intenzivní zemědělství navíc dále změnily místní klima a přispěly k celkové změně klimatu v regionu Krkonoš (Flousek 2019). Krkonoše již nyní pocítují dopady klimatických změn. Změny teplot a srážek způsobují posuny ve vegetačních zónách, což má za následek pokles biologické rozmanitosti a narušení ekosystémů. Region je také svědkem změn ve sněhové pokrývce a ústupu ledovců, což má dopad na dostupnost vody a hydrologické cykly. Navíc je patrný nárůst výskytu extrémních povětrnostních jevů, jako jsou bouře a povodně, které představují hrozbu jak pro přírodní prostředí, tak pro lidská společenství (Fanta, 1969).

Horní hranice krkonošských lesů je výrazně ovlivněna klimatickými změnami, což má významný dopad na místní ekosystémy, biodiverzitu a krajinu. S oteplováním se klimatem dochází k neustálému posunu horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek. Drsnější podmínky v těchto vyšších nadmořských výškách představují výzvy pro přežití a růst stromů (Tremel a kol. 2020), což vede k ústupu lesů do příznivějších lokalit. Jak teploty stoupají a nižší nadmořské výšky zažívají teplejší podmínky, lesní porost pomalu ustupuje do vyšších nadmořských výšek a zahrnuje horské louky, rašeliniště a alpské oblasti. V důsledku toho se rozloha lesních porostů v Krkonoších zmenšuje. Jak se pohybuje horní hranice lesa, mění se složení lesních společenstev. Biodiverzita a rozmanitost druhů v lesních ekosystémech se mění, poté, co se nové druhy dokáží aklimatizovat na měnící se klimatické podmínky a vytlačit původní druhy (Tremel a kol. 2020). Biodiverzita Krkonoš je výrazně ovlivněna posunem horní hranice lesa. Tento posun vystavuje určité druhy rostlin a živočichů, které se přizpůsobily chladnějšímu klimatu, riziku ohrožení. Na druhou stranu také vytváří příležitosti pro nové druhy obývat dosud neprobádané oblasti.

Sněhová pokrývka v Krkonoších zažívá v průběhu ročních období výrazné výkyvy. Jeho tvorba začíná během zimní sezóny, dosahuje své maximální tloušťky typicky v lednu a únoru a poté se postupně rozptýlí během jarních a letních měsíců. Tloušťka sněhu v Krkonoších se může velmi lišit v závislosti na faktorech, jako je nadmořská výška, orientace svahu a intenzita sněžení. Ve vyšších polohách se obvykle vyskytuje větší nahromadění sněhu, zatímco v nižších

polohách a oblastech vystavených větru jsou vrstvy sněhu tenčí. Kvůli klimatické změně se délka sněhové sezóny v Krkonoších zkracuje, což má za následek snížení průměrného počtu dnů, které jsou zasněžené. Tato změna má významné důsledky pro vegetaci, divokou zvěř a rekreační aktivity (Flousek a kol. 2007).

Dynamiku sněhové pokrývky výrazně ovlivňuje teplota. Zvýšené teploty urychlují proces tání sněhu, zatímco nižší teploty prodlužují jeho existenci. Množství a druh srážek má vliv jak na hloubku, tak na stav sněhové pokrývky. Významné nahromadění sněhu může být výsledkem intenzivního sněžení, zatímco déšť padající na stávající sních může urychlit jeho tání. Riziko lavin se zvyšuje kvůli dopadům změny klimatu. Oteplující se klima mění stav a pevnost sněhu, což má za následek častější a rychlejší tání. To zase vede k vytváření nestabilních vrstev ve sněhu, což v konečném důsledku zvyšuje pravděpodobnost lavin. Stav sněhové pokrývky se může stát více proměnlivými v důsledku posunů teplot a vzorců srážek. Tato nepředvídatelnost chování sněhu může mít za následek nestabilitu a zvýšené nebezpečí lavin. Posun lavinových cest je přímým důsledkem změn tloušťky sněhu a geografických podmínek.

Cílem bakalářské práce je prozkoumat dopady klimatických změn na Krkonoše pomocí analýzy historických a současných klimatických dat. Dále zkoumat dynamiku sněhové pokrývky v Krkonoších v posledních několika desetiletích. Tato analýza bude zahrnovat variace ve výšce a trvání souvislé sněhové pokrývky. Další cíl je určit primární faktory, které přispívají ke změnám sněhové pokrývky v Krkonoších. Tato analýza bude zahrnovat zkoumání kolísání teplot, posunů ve vzorcích srážek a také dalších proměnných, jako jsou geografické charakteristiky specifické pro daný region.

Bakalářská práce ve své teoretické části se zaměřuje na hodnocení vlivů na ekosystémy a zkoumá, jak změny sněhové pokrývky ovlivňují místní ekosystémy v Krkonoších. Studie zahrnuje analýzu různých ekologických faktorů, jako jsou posuny v rostlinném pokryvu, vzorce migrace zvířat a další relevantní aspekty.

1 Základní pojmy a dopady klimatické změny

Klimatický systém neovlivňují pouze jeho jednotlivé složky, ale také vnější faktory (Riedl 2010). Změna klimatu ovlivňuje jak klima, které se týká dlouhodobého stavu atmosféry (Linda 2010), tak počasí, které se týká bezprostředních atmosférických podmínek do určité nadmořské výšky (Metelka, Tolsaz 2009). Je důležité si uvědomit, že proměnlivost klimatu je méně výrazná ve srovnání s proměnlivostí počasí. Klimatologové analyzují klima pomocí údajů shromážděných meteorology, aby jej přesně charakterizovali. Zkoumáním dlouhodobých dat jsou klimatologové schopni poskytnout podrobné popisy klimatu. Navíc nyní mají dostatek dat pro srovnání klimatu v různých ročních obdobích (Linda 2012). Klima je ovlivňováno různými faktory, které lze kategorizovat do tří skupin: astronomické (mimozemské) faktory, jako je sluneční záření a změny v oběžné dráze Země, vlastnosti zemského povrchu včetně distribuce na pevnině a v oceánech, vulkanická činnost a vegetace, např. změny v rámci samotného klimatického systému, jako jsou změny chemického složení, biologie, využívání půdy a emise skleníkových plynů (Marek 2022).

Zpětná vazba hraje v klimatickém systému klíčovou roli. Tato spojení mohou buď zesílit (pozitivní zpětné vazby) nebo zeslabit (negativní zpětné vazby) anomálie způsobené počátečními poruchami (Metelka, Toslaz 2009). Jedním dobře známým příkladem pozitivní zpětné vazby je korelace mezi teplotou a rozsahem polárního zalednění. Při poklesu teplot se zvyšuje sněhová pokrývka, což má za následek vyšší albedo, které odráží více sluneční energie a dále ochlazuje systém (Marek 2022). Na druhou stranu lze pozorovat negativní zpětnou vazbu ve vztahu mezi teplotou a tvorbou kupovité oblačnosti během léta. Sluneční záření ohřívá povrch, způsobuje, že vzduch v blízkosti země stoupá a konvekcí vytváří kupovité mraky. Jakmile se vytvoří mraky, začnou odrážet část příchozího slunečního záření, což má za následek snížení slunečního záření dosahujícího povrchu. V důsledku toho klesá rychlost ohřevu spodních vrstev atmosféry, což vede k poklesu konvekce a následné tvorbě kupovité oblačnosti (Metelka, Toslaz 2009). Marek (2022) zdůrazňuje, že mechanismy zpětné vazby přispívají ke složité povaze klimatického systému a zahrnují prvky chaotického chování.

Podle (Ostrý a kol. 2015) je změna klimatu patrná v neustálém a pokračujícím zvyšování průměrné teploty klimatického systému Země. Hůrková (2022) to dále podporuje, když uvádí, že průměrná povrchová teplota se během 20. století zvýšila téměř o 2 stupně Celsia a od té doby zůstává relativně stabilní. Existuje několik faktorů, které přispívají ke globálnímu oteplování, včetně přirozeného cyklu glaciálních a meziledových období, stejně jako lidské činnosti, jako jsou emise z vozidel, průmyslové znečišťující látky a odlesňování. Mezi odborníky navíc probíhá diskuse o další možné příčině globálního oteplování. Teoreticky mají změny ve sluneční aktivitě potenciál vyvolat posuny klimatu tím, že ovlivní povrch Slunce. Podle Hůrkové (2022) se uvažuje i se změnami průměrné teploty Země.

1.1 Dopady klimatické změny ve světě

Změna klimatu přímo přispívá ke zhoršení již existujících environmentálních problémů, jako je sucho, degradace půdy a migrace. Tato celosvětová tíživá situace navíc také podněcuje vznik nových konfliktních situací, které zahrnují územní spory, konflikty o vodní a půdní zdroje

a rozsáhlou migraci. Neregulovaná změna klimatu má schopnost narušit klíčové globální systémy a ovlivnit různé ekosystémy (Stejskal 2010–2015). Podle Stejskalova výzkumu provedeného v letech 2010–2015 je zřejmé, že zvýšení teploty o 4 až 7 stupňů Celsia nevyhnutelně povede ke škodlivým změnám primárních ekosystémů Země. Hlavním důsledkem bude uvalení tepelného stresu na lidské i přírodní systémy, který bude mít dopad na různé druhy a povede k výskytu sucha a extrémních povětrnostních jevů, které naruší některé aspekty těchto systémů. Navíc v současnosti dochází k poklesu počtu druhů.

1.1.1 Tání ledovců

Obrovské ledové masy nalezené v Grónsku, Arktidě a Antarktidě, které slouží jako nejpodstatnější zásoby sladké vody na planetě, čelí bezprostřednímu nebezpečí, protože teploty stále rostou. Toto nebezpečí ohrožuje nejen samotné ledovce, ale představuje také významnou hrozbu pro původní divokou zvěř. Subývajícími ledovými plochami se odpovídajícím způsobem zmenšují i stanoviště a území ikonických tvorů, jako je lední medvěd a polární liška (Hůrková 2022).

Globální klima by bylo významně ovlivněno, pokud by došlo k tání největších suchozemských ledovců na světě, Grónska a Antarktidy, jak uvádějí Metelka a Toslaz (2009). Západoantarktický ledový příkrov, který se rozprostírá pod hladinou oceánu a plave na jeho okrajích, je méně stabilní ve srovnání s východoantarktickým ledovým příkrovem, který spočívá na pevném podloží. V důsledku toho by zvýšení teploty mořské vody v této oblasti vedlo k většímu tání ledu podél jejích okrajů. Již došlo k znatelnému tání západoantarktického ledovce, přičemž výzkum ukázal, že rychlost tání převyšuje tvorbu nového ledu přibližně o 60 %. V důsledku toho se objem ledovce postupně zmenšuje. Na druhou stranu, východoantarktický ledový příkrov zůstává relativně stabilní a v nadcházejících desetiletích se neočekává žádné výrazné snížení objemu. Ve skutečnosti měření naznačují mírný nárůst objemu ledu, zejména ve vyšších nadmořských výškách.

V nadcházejícím století bude tání Arktického a Grónského ledovce bez přerušení přetrvávat spolu s pokračujícím mizením horských ledovců, zejména na severní polokouli, jak uvádí Linda (2010). Podle Riedla (2010) bude oteplování jižní polokoule v důsledku rozsáhlého oceánského povrchu probíhat pomaleji. Jak uvádí Riedl (2010), v průběhu posledních čtyř desetiletí Evropa zažila průměrný roční pokles sněhové pokrývky o 1,3 %.

1.1.2 Zvyšování mořské hladiny

Přítomnost skleníkových plynů v atmosféře má přímou souvislost s nárůstem vody v oblastech s vyššími zeměpisnými šířkami a ve vlhkých tropech. Naopak dostupnost vody se zhorší v suchých oblastech středních zeměpisných šířek a suchých subtropích (Metelka, Toslaz 2009). Linda (2012) tvrdí, že vzestup hladiny moří je pokračující proces, který se jednoduše nezastaví. To je způsobeno pomalou změnou teploty vody, což má za následek pokračující oteplování obrovských vodních mas v hlubokých oceánech dlouho po stabilizaci atmosférické teploty Země. Navíc se tyto vodní masy budou i nadále rozšiřovat, což významně přispěje k celkovému vzestupu hladiny moří. Riedl (2010) poznamenává, že současný nárůst hladiny oceánů není způsoben pouze táním mořského ledu, jako je tomu v Arktidě, protože váha ledu již sama tlačí vodu vzhůru. Ke zvýšení hladiny moří přispívají spíše dva faktory. Za prvé, když se

voda ohřeje, její objem se zvětší. Za druhé, odtok z pevninských ledovců přispívá ke globálnímu objemu vody.

V nedávné studii Hůrkové (2022) bylo zjištěno, že hladina oceánů zažívá rychlý vzestup zejména ve východní Asii. Na opačné straně spektra však hladina oceánu podél západního pobřeží Severní Ameriky zaznamenala mírný pokles, pravděpodobně v důsledku dopadu oceánských proudů. Hůrková také vyzdvihla dva primární faktory přispívající ke zvýšení hladiny oceánů: tání zamrzlých povrchů ledovců a pokračující expanzi teplejší mořské vody.

1.1.3 Změna směru či zastavení mořského proudění

Oceánské proudy, konkrétně termohalinní cirkulace, mají jemný, ale hluboký dopad na globální klima, jak uvádí Lind (2012). Tento složitý mechanismus je řízen teplotními změnami a rozdíly ve slanosti v oceánské vodě (Metelka, Toslasz 2009). Významné oteplování oceánů by však mohlo potenciálně změnit směr, rychlost nebo dokonce zastavit tyto proudy. Zatímco druhý scénář je nepravděpodobný, nepochybně by vyústil v nejkatastrofičtější událost v historii lidstva. Metelka, Tolasz (2009) zdůraznili citlivost proudů na hustotu povrchových vrstev. Pokud voda zůstane nadměrně teplá nebo slaná, zůstane blízko povrchu, místo aby klesala hlouběji a potenciálně oslabila nebo přeměrovala celý systém oceánských proudů. To by zase mělo hluboký dopad na klima regionů závislých na Golfském proudu, zejména Evropy a východního pobřeží Severní Ameriky.

1.1.4 Ztráta biodiverzity

Ztráta biologické rozmanitosti druhů a ekosystémů je významným globálním problémem, který je paralelní s problémem změny klimatu. Přispívajícími faktory jsou narušování a devastace přírodního prostředí, jako je odlesňování tropických deštných pralesů a také šíření invazních druhů (Riedl 2010). Linda (2012) vysvětluje, že jak zvířata, tak rostliny se přizpůsobují novým teplotním vzorcům. Stromy například kvetou dříve a udrží si své podzimní barvy po delší dobu, zatímco ptáci začínají hnízdní sezónu dříve a prodlužují si pobyt na zimních stanovištích. V budoucnu budou teplomilné druhy nadále migrovat dále na sever, zatímco druhy žijící v současnosti v severních oblastech přijdou o svá stanoviště. Kvůli přemnožení se však mnoho druhů nebude moci přemístit do vhodnějšího klimatu. Ekosystémy, které se nejsou schopny rychle přizpůsobit těmto změnám, se stanou zranitelnější vůči chorobám a škůdcům. To představuje vážnou hrozbu pro lesy mírného pásma, jak uvádí Linda (2012).

Dopad globálního oteplování sahá mimo tvory žijící na pevnině i na mořský život. Rostoucí teploty oceánu a změněné proudy v důsledku jevu El Niño se staly hlavním problémem mnoha zvířat. Zvláště nápadný případ je vidět u východního pobřeží Austrálie, kde se nachází Velký bariérový útes. V posledních letech došlo k výraznému nárůstu úmrtnosti korálů v důsledku změn teploty vody. Podle Horákové (2022) je tento úbytek významný zejména proto, že korálové útesy mají biodiverzitu srovnatelnou s deštnými pralesy. Tyto choulostivé ekosystémy jsou vysoce citlivé i na sebemenší výkyvy teploty oceánů a mnohé z nich již utrpěly škody.

1.1.5 Desertifikace

Degradace fyzikálních a biologických vlastností v suchých a polosuchých oblastech způsobená změnou klimatu a nadměrným využíváním zemědělské půdy představuje významnou hrozbu: desertifikaci. Tento globální problém se týká více než 1,5 miliardy lidí převážně žijících v oblastech s nízkými příjmy. V extrémních případech jako jsou jižní Morava a jihovýchodní Čechy, dva z nejsušších regionů, by špatné hospodaření s krajinou mohlo vést ke vzniku pouští. Ve světle toho se stává nezbytností přehodnotit plodiny pěstované v těchto regionech a jejich zavlažovací systémy. V boji proti desertifikaci je zásadní přijmout udržitelné postupy, které podporují správné hospodaření s vodou a půdou, zabraňují nadměrné erozi a usnadňují zadržování vody v půdě (Havlík 2018).

Problematika desertifikace, jak uvádí Drápelová (2020), je vysoce zapeklitá záležitost, která slouží jako reflexe současného stavu naší planety. Zatímco primární příčinou eskalujícího sucha a desertifikace je globální oteplování Země, je důležité si uvědomit, že to není jediný faktor, který hraje roli. Mezi další přispívající faktory patří neudržitelné postupy hospodaření s půdou, jako je intenzivní zemědělství, odvodňování krajiny, odlesňování a další. Jak uvádí Riedl (2010), nedostatek srážek je často identifikován jako klíčová hybná síla sucha, zejména v oblastech nacházejících se v blízkosti rozlehlých pouští. Riziko postupné přeměny ve vyprahlé pouštiny je zvláště závažné v regionech od severní Afriky po Střední Asii, významnou část Austrálie, západní část Severní Ameriky a značnou část jihoamerických And. Alarmující situaci čelí zejména Afrika, kde téměř polovinu kontinentu tvoří suché oblasti (Riedl 2010). Suché podmínky způsobené zvýšenými teplotami vytvářejí příznivé prostředí pro vznik lesních požárů. Autor uvádí jako příklady případy z Kalifornie a Austrálie a zdůrazňuje významné riziko, které představuje vypalování lesů, včetně pralesů (Hůrková 2022).

2 Klimatická změna a horské ekosystémy

2.1 Hlavní problémy

Účinky změny klimatu mají dalekosáhlý dopad, který pocítí všechny části zeměkoule. Již nyní jsme svědky posunů ve vzorcích počasí v různých regionech, což vede ke změnám srážek, teploty vzduchu a četnosti extrémních jevů počasí, jako jsou povodně a sucha. Tyto transformace mají významné důsledky pro více sektorů, včetně potenciálních narušení načasování období výsadby a sklizně, což by mohlo představovat hrozbu pro potravinovou bezpečnost. Oblasti s omezeným vegetačním krytem navíc čelí zvýšenému riziku sesuvů půdy v důsledku vydatných srážek (Samal, Kunyal 2012).

Kryosféra bude výrazně ovlivněna klimatickými změnami, které následně povedou ke změnám v hydrologii, vegetaci a geomorfologii. Tyto změny zahrnují degradaci permafrostu, ústup ledovců a destabilizaci horských oblastí v důsledku masových pohybů, jako jsou řízení kamenů, sesuvy půdy a toky trosek. Změna klimatu neovlivní pouze hydrologické procesy, jako jsou srážky, evapotranspirace, vlhkost půdy, odtok, vypouštění, zatížení sedimenty a znečištění odtokem, ale také změny ve vegetaci způsobené využíváním půdy a změnou krajinného pokryvu (Samal, Kunyal 2012).

První známky změny klimatu jsou patrné z přítomnosti hor. Jak ledovce ustupují a sněhová pokrývka migruje do vyšších nadmořských výšek, je vysoce pravděpodobné, že dojde ke změnám průtoků řek a vodních vzorů. Dopad změny klimatu lze pozorovat v různých oblastech po celém světě, včetně Himálajských hor. Podle výzkumů procházejí Himaláje rychlejším tempem oteplování ve srovnání s celosvětovým průměrem. Konkrétně nárůst teploty během podzimu a zimy předčí nárůst teploty během léta a tento nárůst je výraznější ve vyšších nadmořských výškách (Samal, Kunyal 2012).

Horské ekosystémy jsou významně ovlivněny změnou klimatu a zažívají fyziologické i fyzické reakce. První typ odezvy zahrnuje zvýšené koncentrace CO₂, které přímo ovlivňují procesy, jako je fotosyntéza. Kromě toho, tyto ekosystémy ovlivňují také skutečné změny klimatu, včetně teploty, dostupnosti vody a slunečního záření. Při posuzování potenciálních dopadů změny klimatu je nezbytné zvážit optimální rozsah a prahové hodnoty klimatických parametrů pro každý druh. Je však také možné, aby druhy podstoupily fyziologické, behaviorální nebo genetické adaptace v reakci na měnící se klima (Price, Haslett 1995).

Vlivy změny klimatu postavily osud horských ekosystémů do nejisté situace. (Samal, Kunyal 2012) zdůrazňují nadcházející změny v druhovém složení, produktivitě a biologické rozmanitosti jako významný problém. Citlivost horských ekosystémů na změnu klimatu je evidentní a ovlivňuje nejen průměrné klimatické hodnoty, ale i extrémní jevy. Podle Löfflera a kol. (2012), změna klimatu a změny ve využívání půdy mají dopad na vegetaci a ovlivňují faktory, jako je teplota, sněhová pokrývka, vlhkost půdy a sukcese. Tyto procesy mají důsledky pro fyziologii, primární produktivitu, kvalitu potravin, rozklad, choroby, interakce rostlina-zvíře a druhové složení. Löffler et al. (2012) uvedli příklad posunu vysokohorských rostlin nahoru, což má za následek zvýšení druhové bohatosti ve vysoké alpínské vegetaci. Účinky na horské lesy budou složité a ovlivní produktivitu, škůdce, konkurenci, mráz, větrné otřesy a požáry. Očekává se, že v horských oblastech dojde k významným posunům fauny, především v důsledku podstatných změn životního prostředí, ke kterým dochází na krátké vzdálenosti, přítomnosti horského areálu pro četné druhy a množství malých endemických druhů (Löffler et al. 2012).

Rostoucí teploty, změny ve vegetačních vzorcích, rychlé odlesňování a nedostatek vody představují vážné ohrožení biotopů a propojení lesních koridorů, což může vést k vyhynutí mnoha druhů rostlin a živočichů. Klimatické změny také otevírají cestu pro přemnožení invazních druhů v lesích, které nepochybně naruší stávající ekosystém. Kromě toho se očekává, že frekvence lesních požárů se bude zvyšovat s tím, jak se cykly sucha zintenzivňují, což má za následek pronikání borových lesů do oblastí dubových lesů a pokles výnosů nedřevěných lesních produktů (Samal, Kunyal 2012). Když se teploty v důsledku změny klimatu zvýší, jednou z výsledných změn je zvýšení koncentrace přízemního ozonu. Tento konkrétní skleníkový plyn přispívá ke znečištění ovzduší a má škodlivé účinky na rostlinná pletiva, brání jejich růstu a produktivitě. Vliv ozonu na rostliny vyvolává biochemické změny, které v konečném důsledku snižují fotosyntézu (Samal, Kunya 2012).

3 Dynamika sněhové pokrývky

Ve výzkumu provedeném Dobřanským (2010) je důležité poukázat na význam chápání sněhu jako základní složky přírodního světa. Dobřanský (2010) navíc zavádí pojem kryosféra,

který zahrnuje všechny oblasti na Zemi, které jsou obaleny sněhem a ledem (Irannezhad et al. 2022). Sněhová pokrývka poskytuje fyzické prostředí pro život, působí jako zásobárna živin a je pláštěm pokrývajícím půdu. Je důležité poznamenat, že antropogenní činnost v zemědělství a průmyslu ovlivňuje jak chemické zatížení, tak biogeochemický cyklus ve sněhové pokrývce. Antropogenní činnost změnila faktory, jako je například zatížení sněhové pokrývky znečišťujícími látkami a pH a koncentrace biogenních sloučenin, které se vyměňují mezi sněhovou pokrývkou a atmosférou ((Laybourn-Parry et al. 2012).

Irannezhad et al. (2022) zmínil, že sníh hraje významnou roli v celkovém fungování klimatického systému Země a hydrologického cyklu. Interaguje v prostoru i čase s různými aspekty jako je energetická bilance povrchu země, dynamika atmosféry a teplotní podmínky půdy. Prostřednictvím svých zpětnovazebních mechanismů pomáhá udržovat rovnováhu povrchové teploty vzduchu, utváří cirkulační vzorce atmosféry a v konečném důsledku ovlivňuje celkové klimatické podmínky na naší planetě (Irannezhad et al. 2022).

Existují různé obory, které se věnují dynamice sněhové pokrývky a jeden z nich je obor hydrologie sněhu, který nabývá na významu. Zaměřuje se na studium vody ve vysokých zeměpisných šířkách a horských oblastech. V mnoha regionech jsou vodní zdroje využívány pro různé účely, jako jsou domácí, zavlažovací a průmyslové, závislé na tání sněhu.

3.1 Vliv klimatu na dynamiku sněhové pokrývky

Změna klimatu mění sněhové podmínky, vede k teplejším zimám a menšímu množství sněhu v posledních letech, což snižuje množství sněhové pokrývky. Jako příklad vlivu klimatické změny na dynamiku sněhové pokrývky nám poslouží horní povodí Gangy, na kterém tání sněhu je základním zdrojem vody. Aby prozkoumali dopad hydroklimatických proměnných na tuto oblast, provedli Thapa et al. (2021) studii, která zkoumá spojení mezi dynamikou sněhové pokrývky a těmito proměnnými. Ve své studii provedené v roce 2019 Adler et al. zaměřené na rozsáhlé povodí Gangy i na další povodí jako Amu a Darja, využili přímočarý model teplotního indexu tání, zahrnující dálkově snímaná data sněhové pokrývky ze spektrometru s mírným rozlišením (MODIS) a data z reanalýzy klimatu k prozkoumání změn v těchto oblastech. Další příklad, který uvedl Stehr & Aguayo (2017), je o Andském povodí, které je důležité pro akumulaci sněhových srážek. Stehr & Aguayo (2017) zmínil studie o dálkovém průzkumu Země, které poskytuje slibnou příležitost ke zlepšení hodnocení a monitorování prostorové a časové variability sněhových charakteristik, jako je oblast sněhové pokrývky a dynamika sněhové pokrývky.

Podle Flouska (2019) změna klimatu navíc mění sněhové podmínky, což vede k teplejším zimám a menšímu množství sněhu v posledních letech, což snižuje množství sněhové pokrývky. Další případ je vliv změny klimatu na tání skalních ledovcových vod podtrhuje Adler et al. (2019). Autoři také zdůraznili překážky při posuzování skladování a tání ledovcové vody, jako je velikost ledovce, objem, složení ledu a kapalná voda, vzorce denního a sezónního tání a rychlosti vypouštění. Degradace a změna permafrostu má navíc důsledky pro různá hospodářská odvětví, včetně narušení lyžařské infrastruktury ve francouzských Alpách, jak uvádějí Adler et al. (2019).

Přítomnost sněhu hraje významnou roli v celkovém fungování klimatického systému Země a hydrologického cyklu. Interaguje v prostoru i čase s různými aspekty, jako je energetická bilance povrchu země, dynamika atmosféry a teplotní podmínky půdy. Prostřednictvím svých zpětnovazebních mechanismů pomáhá udržovat rovnováhu povrchové teploty vzduchu, utváří cirkulační vzorce atmosféry a v konečném důsledku ovlivňuje celkové klimatické podmínky na naší planetě (Irannezhad et al. 2022).

Podle Irannezhad et al. (2022) dopad globálního oteplování je evidentní ve významných změnách povrchové teploty vzduchu a jejich účincích na zdroje sněhové pokrývky po celém světě. Podle studie, na kterou odkazují Červený a Balling (1992) je zřejmé, že globální oteplování povede ke snížení celkového rozsahu sněhové pokrývky. Studie navíc naznačuje, že tento jev bude mít za následek rozšíření rozsahu denních teplot v příštích letech. Jak teplota vzduchu stoupá, klesá počet dní s teplotou pod nulou a déšť je v zimě častější. Tyto změny spolu se sníženou kapacitou zadržování vody a menším množstvím sněhu brání opětovnému zamrznání vody v chladnějších měsících. V důsledku toho dochází k poklesu ekvivalentu vody ve sněhu a jarního tání sněhu, což vede k nedostatku vody na začátku léta v oblastech s chladným klimatem. Pokles ekvivalentu vody navíc vede k menší ploše a trvání sněhové pokrývky, což zase snižuje albedo a zesiluje globální oteplování.

Potenciální nárůst zimních srážek by mohl vyrovnat účinky změn v akumulaci sněhové pokrývky a procesech tání, což v konečném důsledku ovlivní globální klimatický systém a hydrologický cyklus. Budoucnost sněhové pokrývky, ať už bude klesat nebo přibývat v důsledku globálního oteplování, proto závisí na křehké rovnováze mezi přibýváním sněhu a zimním táním (Irannezhad et al. 2022). Změna klimatu má velký vliv na dynamiku sezonní sněhové pokrývky, o které se budu zmiňovat v další podkapitole.

3.2 Dynamika sezonní sněhové pokrývky

Zhang (2005) uváděl, že sezonní sněhové pokrývky jsou významné pro tepelné podmínky země a je široce uznáván. Podle Zhang (2005) vliv sezonní sněhové pokrývky na teplotní režim Země lze vysvětlit pomocí vzoru sezonních teplotních změn a podle toho sezonní sněhová pokrývka má tendenci vést k relativně vyšším průměrným ročním teplotám na Zemi, zejména ve vysokých zeměpisných šířkách.

V mnoha částech světa slouží sezonní sněhová pokrývka jako životně důležitý zdroj pitné vody. Kolísání tohoto sezonního vodního zdroje má významné důsledky pro hospodářství, fungování ekosystémů a riziko povodní (Mott et al. 2018). Proměnlivost počasí rok od roku a vliv klimatických změn značně ovlivňují rozsah tání sněhu. Kromě toho jsou zvýšené teploty významným faktorem při snižování jak množství sněhových srážek, tak délky doby, po kterou sněhová pokrývka zůstává, což způsobuje dřívější tání sněhu. Na začátku období tání vede nerovnoměrné rozložení hloubky sněhu k rozmanitějšímu vzoru tání, a to jak z hlediska načasování, tak i místa. To zase vede k rychlejší tvorbě odtoku během počátečních fází období tání, protože tání je zpožděno v oblastech s mělkými sněhovými pokrývkami. Kromě toho přítomnost hlubších sněhových oblastí vede k prodlouženému období tání během sezóny, protože proces tání je v těchto oblastech zpožděn (Mott et al. 2018). Změna charakteristik tání sněhu má významný dopad na rovnováhu ledovců a proudění v horských pánvích s ledovci. Roli větru nelze podceňovat při zvažování celkového rozložení hmoty a energie v rámci sněhové

pokrývky. Je zodpovědný za usnadnění výměny energie mezi sněhovou pokrývkou a atmosférou, zahrnující citelné a latentní teplo, stejně jako sublimaci sněhových částic unášených větrem. Mott et al. (2018) objasnili procesy vyvolané větrem, které diktují sezónní dynamiku sněhové pokrývky, zejména v horských oblastech, provedli komplexní analýzu současných znalostí v této oblasti. Primárním cílem tohoto přehledu je prozkoumat nedávný pokrok ve vědeckém výzkumu se zvláštním důrazem na studie provedené v posledním desetiletí.

Podle Mott et al. (2018) byla diskuse ke zkoumání pokroku dosaženého ve studiu procesů výměny tepla, které řídí vzorce tání sněhu. V návaznosti na to se pozornost přesouvá na procesy v hraniční vrstvě atmosféry, které hrají klíčovou roli při změně energetické bilance v pozdějších fázích, zejména v oblastech s nerovnoměrnou sněhovou pokrývkou.

4 Klimatická změna v Krkonoších

Podle Flouska (2019) Krkonoše jsou považovány za unikátní pohoří ve střední Evropě. Region je domovem rozmanitých ekosystémů a stanovišť, včetně vzácných a endemických druhů flóry a fauny. Mění se klima však začalo ovlivňovat krajinu a biologickou rozmanitost regionu. Krkonoše zažívají v posledních desetiletích výrazný nárůst teploty, který je jeden z důležitých fenoménů v Krkonoších. Studie provedená Flouskem (2019), odhalila, že k nejvýraznějšímu nárůstu teploty dochází v období rozmnožování zvířat, které se kryje s vegetačním obdobím. Za zmínku stojí, že teploty v horských oblastech klesají asi o 0,6 stupňů Celsia na 100 m nadmořské výšky. Zvýšení teploty o 3 stupně Celsia by tedy odpovídalo změně nadmořské výšky o přibližně 500 m. Tyto informace, které byly získány (Flousek 2019), naznačují různé potenciální důsledky, včetně rozšiřování hranic lesů směrem nahoru, migrace rostlinných a živočišných druhů do vyšších nadmořských výšek, změny v jejich fenologii, vymizení druhů specifických pro vyšší nadmořské výšky a zvýšené variability srážek a zhoršujících se sněhových podmínek během zimy (KRNAP 2024).

Arktoalpínská tundra, fenomén pozorovaný ve střední Evropě během chladných období pleistocénu a začátku holocénu (KRNAP 2024), se liší od prostředí tundry ve Skandinávii a Alpách (Vítková, Vítek a Mullerová J. 2012). Dle Vítkové a kol. (2012) tato jedinečná vegetace je vysoce citlivá a v současné době existuje v méně fragmentovaných oblastech. Tyto fragmenty se staly více izolované kvůli širším silnicím a zvýšenému provozu. Podle KRNAP (2024), Arktoalpínská tundra je rozdělena do různých pásem, včetně zóny lišejníků, která je ovlivněna mrazem a větrem, což vede k narušení vegetace a vytváření rostlinných společenstev, která nemohou odolat těžké a dlouhotrvající sněhové pokrývce. Klimatické změny také ohrožují další zóny, jako je zóna travnaté tundry a zóna květinové tundry, což způsobuje narušení jejich ekosystémů (KRNAP 2024).

Klimatické změny mají významný vliv i na vodní a půdní poměry v Krkonoších. Jak uvádí KRNAP (2024), imisní zátěž vodních toků vede v Krkonoších k výrazné acidifikaci vodních zdrojů i půdy. Jedinečná subarktická rašeliniště navíc zažívají dlouhodobý pokles hladiny podzemní vody, což má za následek snížený průtok vody v tocích a méně konzistentní distribuci v průběhu roku. V důsledku toho také dochází k vysychání mokřadních biotopů. Navzdory stabilním ročním srážkovým úhrnům se očekává, že budoucnost přinese více sucha a delší období sucha

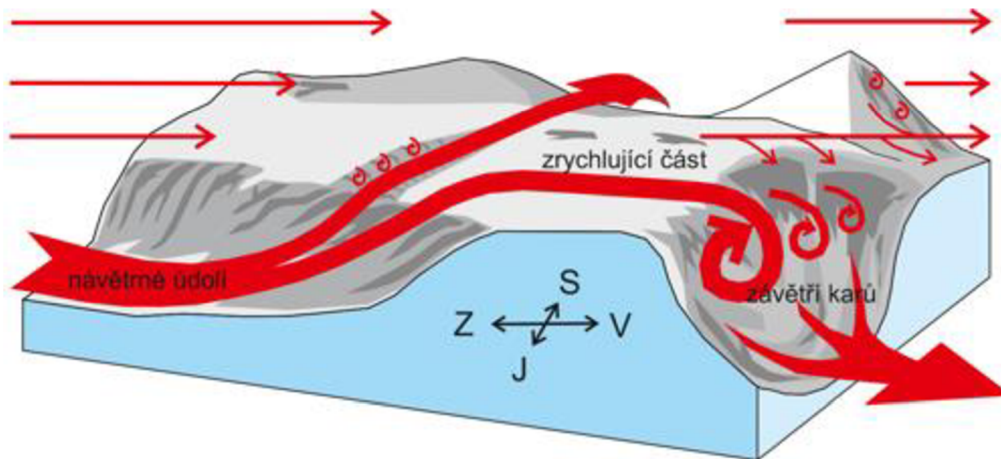
v důsledku rostoucích průměrných teplot a zvýšeného výparu. Tyto suché podmínky mohou přispět k přemnožení invazních druhů rostlin a dále poškodit stávající rostlinná společenstva (Flousek 2019).

4.1 Orografické charakteristiky území Krkonoše

Podle Flouska (2007), Krkonoše jsou nejvýznamnější a nejrozsáhlejší pohoří naší země. Tyto hory se však neomezují pouze na Českou republiku, zasahují i do sousedního Polska, Německa a Rakouska, čímž se stávají klíčovou součástí většího Českého masivu.

Krkonoše, jak uvádí Fanta (1969), překračují výškovou hranici typicky spojovanou se středními horskými pásmy v Evropě o sto metrů. Toto dodatečné převýšení dává vzniknout zřetelným klimatickým a hydrografickým charakteristikám, díky nimž, si Krkonoše ponechají větší množství zaledněných údolí a krasových prohlubní z ledovcových čtvrtohor. Nejvýše položené oblasti tohoto pohoří se nacházejí v Krkonoších, které dominují krajině. Tyto hory lze rozdělit do dvou paralelních pásem, které se táhnou od severozápadu k jihovýchodu. Vnější hlavní hřeben, známý svou značnou délkou, je domovem ikonických vrcholů jako Sněžka a Dívčí kameny. Vnitřní hřeben, mírně nižší nadmořské výšky, je rozdělen na dva úseky hlubokým údolím Labe u Špindlerova Mlýna, jak uvádí Sýkora (1983). Největší část pohoří tvoří Krkonošské rozsochy, charakterizované jak jednotlivými rozsáhlejšími skupinami vyvýšenin a vrcholů, tak protáhlými hřbety probíhajícími od severu k jihu. Tyto hřbety, oddělené následnými údolními tvořenými primárními toky, mají převážně epigenetický charakter, jak zdůrazňuje Flousek (2007). Orografická charakteristika Krkonoš je poznamenána účinky pleistocenního zalednění. Podle Fanta (1969) po sobě toto zalednění zanechalo důkazy jako uzavřená údolí, prohloubená údolí a nánosy morénových sedimentů. Pleistocenní zalednění, jak uvádí Smolíková (2009), se významně podílelo na utváření současného reliéfu Krkonoš a zanechalo výrazný otisk v podobě glaciálních a periglaciálních rysů. Fanta (1969) dále vysvětlil, že vysoká nadmořská výška spolu s výraznými diskontinuitami reliéfu a rozsáhlými deflačními plošinami nad pramennými pánvemi přispěly k rozvoji rozsáhlejšího zalednění.

Zalednění Krkonoš je ovlivněno anemo-orografickým systémem, pozoruhodnou souhrou přírodních sil včetně větru, sněhu, lavin a dávných ledovců. Jelínek (1961) poskytl modelový snímek znázorňující rozšíření tohoto systému, který charakterizuje jeho fungování v Krkonoších. Tento jev je umocněn převládajícím západním prouděním vzduchu z Atlantského oceánu v kombinaci se západovýchodním uspořádáním hlavních hřebenů a údolí Krkonoš. Jak vítr proudí návětrnými údolímí Mumlavý a Bílého Labe, jeho rychlost se vlivem zužujících se profilů těchto údolí zvyšuje, a to i když dosáhne náhorní plošiny (obr. 1). Následně se na závětrné straně ledovcových karů snese silný vítr, jehož výsledkem jsou turbulentní poryvy (obr. 1). Tyto místní větry sledují stejné cesty po tisíce let a významně ovlivňují rozložení srážek, sněžení a výskyt sněhových lavin. Kvůli tomuto jevu prošly svahy laviny trvalým odlesněním, ale nyní se těší dostatku slunečního záření, ochraně před větrem a dostatku vláhy z rozsáhlých sněhových polí. Nicméně vítr také přenáší různé prvky – včetně rostlinných semen, malých tvorů a částic půdy – z blízkých i vzdálených míst, a nakonec je ukládá na závětrné straně (Jelínek 1961).



Obrázek 1: Model A–O systému v údolí Bílého Labe
 Pramen: KRMAP, upraveno dle Jeník 1961

4.1.1 Neživá příroda v Krkonoších

České Krkonoše jsou známé svou geobiodiverzitou, jak zdůrazňuje KRMAP (2010). Flousek a kol. (2007) zdůrazňují roli geologických jevů při utváření krajiny, přičemž podpůrnou roli hrají nebiotické faktory a živé organismy. Avšak základní aspekty krajiny, jako je umístění kopců a údolí, jsou primárně určeny dvěma vlivnými geologickými silami. Fanta (1969) označuje Krkonoše a Jizerské hory za součást krkonošsko-jizerského krystalinika, geologického komplexu složeného z prvohorních krystalických břidlic, včetně svor, fylitů a ortoruly, jak uvádí KRMAP (2010). Kromě toho další horniny jako krystalický vápenec, křemenec a čedič hrají zásadní roli ve formování reliéfu a vegetace, jak uvádějí Flousek a kol. (2007).

Krkonoše, ač jsou geologicky staré, prošly v období třetihor a čtvrtohor výraznými geomorfologickými změnami. Studie provedená Králíkem a Sekyrou v roce 1969 porovnávala krajinu Krkonoš a Sněžky a zjistila, že kromě hlubokých údolí v Krkonoších jsou celkové obrysy podobné. Tento výzkum naznačil spojení obou oblastí tvořících zvlněný povrch v Českém masivu. Vyzdvižení pohoří v důsledku třetihorního vrásnění vyvolalo rozsáhlou říční erozi. V důsledku toho se vodní toky začaly zpětnou erozí prohlubovat a vytvořily výrazné krkonošské masivy a členitou síť hlubokých říčních údolí, kterou vidíme dnes. Vznik strmých údolních svahů se skalními stěnami si však vyžádal více než jen vyzdvižení a zvýšenou erozní aktivitu vodních toků. V průběhu rozsáhlých geologických období došlo k významným změnám klimatu, které vedly k využití mechanického zvětrávání a ledovcové činnosti jako činitelů destrukce. Podle KRMAP (2010) zůstaly nejvyšší vrcholy Krkonoš nedotčeny ledovci, spojené síly mrazu, ledu, sněhu a větru však vedly k vytvoření výrazné řady terénních tvarů, které nelze nalézt v žádném jiném středoevropském pohoří. Kryoplanační terasy, zmrzlé půdy, skalní stěny, periglaciální suťoviny a soliflukční valy ukazují pozoruhodnou geodiverzitu, kterou jsou Krkonoše proslulé v celém regionu.

Krkonoše jsou jedním z nejvýznamnějších center geobiodiverzity České republiky (KRMAP 2010). Flousek a kol. (2007) ve své studii tvrdí, že geologické výskyty slouží jako základní rámec pro každou krajinu, zatímco jemnější aspekty jsou formovány jak neživými faktory, tak přítomností živých organismů. Utváření význačných prvků, jako jsou kopce a údolí, je převážně ovlivněno dvěma dominantními soubory geologických sil: těmi, které budují, a

těmi, které se rozeberou, což nakonec poskytuje materiál nezbytný pro budoucí formace. Fanta (1969) uvedl, že Krkonoše spolu s Jizerskými horami tvoří geologický komplex nazývaný krystalinikum krkonošsko – jizerské, který podle (KRNAP 2010) bylo budované starohorními a prvohorními krystalickými břidlicemi, zejména svory, fylity a ortorulami. Existují také další horniny, jakou krystalické vápence, křemence a čedič, které mají velký význam pro utváření reliéfu a vegetace (Flousek a kol. 2007).

Krkonoše vykazují další pozoruhodnou charakteristiku, kterou je přítomnost sněhové pokrývky. Tato sněhová pokrývka je definována jako vrstva ledu a sněhu, která se tvoří pevnými srážkami, ať už přímo nebo nepřímo (Klivanová 2013). Po celou zimní sezónu je sníh unášen větrem ze svahů obrácených proti větru a vrcholových plošin do údolí a prohlubní terénu. V důsledku toho se výška a kvalita sněhové pokrývky na hřebenech Krkonoš značně liší (KRNAP 2010). Podle Fanta (1969) na tvorbu sněhové pokrývky nemají vliv pouze srážky a teplotní podmínky, ale také vítr. Vítr transportuje a ukládá sníh v oblastech, kde se jeho rychlost snižuje a jeho nosnost se zmenšuje, což má za následek tvorbu závějí nebo vrstev navátého sněhu. Jak uvádí Janásková (2006), vrcholové oblasti Krkonoš pociťují průměrnou sněhovou pokrývku více než 180 dní v roce. V tomto konkrétním období je převládajícím prvkem sníh, který hraje významnou roli v místních variacích půdní vlhkosti v důsledku jeho akumulace a tání. Navíc izolační vlastnosti sněhu ovlivňují regulaci teploty v půdě. V důsledku toho může mít přítomnost sněhu výrazné účinky na vegetaci, zvěř, tvorbu půdy a vznik periglaciálních útvarů, což jsou výrazné jevy vyskytující se v krkonošské Arktalpínské tundře.

Významným aspektem horských oblastí s alpským vývojem a vydatným sněhem je tvorba sněhových lavin, jev, který je zvláště výrazný v oblasti Krkonoš v České republice a Polsku (Flousek a kol. 2007). Flousek a kol. (2007) definuje sněhovou lavinu jako sestupný pohyb sněhu po svahu o délce nejméně 50 m, zatímco kratší pohyby jsou označovány jako sněhové splazy. Rychlý pohyb sněhu způsobuje stlačování a pohlcování okolního vzduchu, což má za následek vznik tlakových vln, které zesilují dopad lavin (Flousek a kol. 2007). Je pozoruhodné, že sněhové laviny jsou typicky spojovány s vysokými horskými pásmi, a proto je překvapivé, že Krkonoše, které jsou výškově řazeny do středních hor, jsou zasaženy častými lavinami (Sýkora 1983). I přes svou relativně malou rozlohu a nadmořskou výšku vykazují Krkonoše vysokou úroveň lavinové aktivity.

Podnebí v Krkonoších je ve srovnání s Tatrami nebo Šumavou výrazně vlhčí, chladnější a drsnější, a projevuje se výrazně přímořským charakterem. Nejen, že je zde patrný přechod mezi ročními obdobími, ale počasí v tomto pohoří se také vyznačuje rychlými a drastickými výkyvy, jako jsou teplota, srážky, oblačnost a sluneční svit, sníh a laviny, větrné proudění v krátkých časových intervalech (KRNAP 2010). Krkonoše slouží jako přirozená bariéra proti neúprosným vlhkým západním větrům pocházejícím z Atlantiku. Výsledkem je, že region zažívá vydatné množství srážek a sněžení spolu s mrazivými teplotami.

4.2 Dynamika horní hranice lesa

Zákravská (2011) definuje pojem hranice lesa jako bod, kde dochází k přechodu z lesa do bezlesí v důsledku změn faktorů prostředí, jako jsou teplota, srážky a dostupnost živin. Ze studie Treml et al. (2020) existují různé faktory, které vedly k vzniku horní hranice lesa. Primárním faktorem, který určuje horní hranici růstu lesa, je přítomnost nízkých teplot, protože

stromům se v takových podmínkách nedaří. Dle Tremla et al. (2020) prostřednictvím různých experimentů a měření bylo zjištěno, že stromy při nízkých teplotách vytvářejí dostatek cukrů a přijímají živiny, což jim brání přidělovat zdroje pro vývoj a expanzi nových dřevěných buněk.

Podle Koláře (2014) dynamiku horní hranice lesa kontrolují 3 hlavní mechanismy: omezení růstu (schopnost vytvářet novou biomasu), odumírání (ztráta biomasy nezpůsobující úmrtí) a mortalita semenáčků. Treml et al. (2020) zmínil, že kvalita semen produkovaných ve vyšších oblastech je obvykle horší ve srovnání se semeny v nižších oblastech. Kromě toho je úmrtnost sazenic zvýšená kvůli suchu nebo chladu. Tyto mechanismy jsou výsledkem různých typů fyziologických stresů nebo poškození, které jsou označovány jako mechanismy druhé úrovně např. růst může být ovlivněn nedostatečnou uhlíkovou bilancí nebo přímo nízkými teplotami omezující tvorbu pletiv; úmrtnost semenáčků může plynout ze sněžných hub, poškozením mrazem nebo letním suchem; odumírání může vyplývat z mrazového poškození, větrné abraze a poškození sněhem (Kolář 2014).

Horní hranice lesa v daném regionu je ovlivňována různými faktory, včetně selhání obnovy a lavinových aktivit. Tyto faktory, jak uvádí Treml et al. (2020), hrají zásadní roli při určování polohy horní hranice lesa. Kociánová a Spusta (2000) provedli studii pomocí záznamů 780 lavin k posouzení vlivu lavin na kolísání horní hranice lesa. U každé lavinové cesty určili nadmořskou výšku horní hranice lesa porovnáním fotografických důkazů a vrstev GIS. Z hodnocení jednoznačně vyplývá, že kolísání horní hranice lesa na lavinových cestách v české části Krkonoš je významným přírodním jevem. Podle Koláře (2014) se na určení polohy horní hranice lesa významně podílí tvar reliéfu, stejně jako další zásadní faktory. Strmé skalní stěny, suťové svahy, sutě a lavinové cesty mohou bránit postupu lesa v nižších nadmořských výškách, zatímco příznivé polohy mohou umožnit výskyt osamělých stromů v mnohem vyšších nadmořských výškách.

Studie provedená Tremlem et al. (2020) se zaměřila na sledování kolísání horní hranice lesa. Ke sběru dat o dynamice lesa na této hranici byly použity různé metody. Jeden přístup zahrnoval sledování změn v nadzemní biomase, populaci stromů a vitalitě. Kromě toho byly k posouzení změn v korunách stromů použity letecké snímky a satelitní snímky. Autoři také využili dendrochronologické techniky k určení stáří stromů, přičemž se opírali o specifické standardy stanovené v dané lokalitě. Kromě toho byly použity paleoekologické metody ke sledování přítomnosti stromů po dlouhá období, trvající stovky až tisíce let. Tyto metody zahrnovaly identifikaci zbytků stromů, jako jsou pylová zrna, listí, dřevo nebo borové šišky, ve vhodných prostředích, jako jsou bažiny, jezerní sedimenty nebo vzorky půdy (uhlík). Využitím těchto metodologií lze efektivně obnovit a určit minulé hranice zalesněných oblastí (Treml et al. 2020).

Krkonoše slouží jako demarkační čára pro lesy ve střední Evropě, což naznačuje chladnější klima. Zatímco nejvyšší oblasti ekotonu jsou primárně ovlivněny teplotou, ve srovnání s ekotonem v Alpách nebo Vysokých Tatrách stále zažívají mírně teplejší podmínky (Treml et al. 2020). Omezení v Krkonoších jsou však pravděpodobně ovlivněna jinými faktory, jako jsou silné větrné proudy a zimní ztráty biomasy, jak uvádí studie Tremla et al. (2020). Tato studie porovnávala modelované rychlosti větru s radiálním a výškovým růstem v ekotonu horní hranice lesa a zjistila, že oblasti s vyšší rychlostí větru zaznamenaly snížený růst výšky. Z toho vyplývá, že pokud by se Krkonoše dostaly do vyšších nadmořských výšek, horní hranice lesního

ekotonu by se rozšířila za svou současnou polohu. Je však důležité si uvědomit, že současná horní hranice lesa nemusí být v rovnováze s převládajícím klimatem (Tremel et al. 2020).

4.3 Vliv na alpské bezlesí

Alpské bezlesí, někdy označované také jako primární bezlesí, je specifický biot, který se rozkládá nad alpskou hranicí lesa. Jedinečnost alpského bezlesí tkví zejména v mozaice nestromové vegetace, kde se daří světlomilným druhům rostlin, a výskytu glaciálních reliktních nebo endemických (Hejda, Kupková 2021). Červinka (2011) zmínil, že oblasti alpské tundry nacházející se nad hranicí lesa jsou však zvláště citlivé na dopady globálních změn životního prostředí. Podle Ráčková (2009), tyto změny mohou být buď klimatické, především globální oteplování neboli vlivem antropogenní znečištění ovzduší, které jsou příčinou kyselých dešťů, vyšší koncentrace CO₂ ve vzduchu a srážek s vyšším obsahem dusíku.

Rozsáhlé experimenty prováděné v oblastech alpské tundry, které prokázaly, že klimatická změna vede k poklesu druhové diverzity a vzhledem k tomu, že teploty ve vysokohorském prostředí stále rostou, alpské druhy se v reakci na tyto probíhající klimatické změny postupně přesouvají do vyšších nadmořských výšek, jak to zmínil Červinka (2011). Podle Březiny a kol. (2023) klíčové procesy, které udržují primární alpské bezlesí, jako jsou laviny či mury, jsou vázány na ledovcově modelované karové stěny, a proto zásadním fenoménem jsou anemo – orografické systémy, které vysvětlují vliv reliéfu a klimatu na přemísťování sněhu a biologického materiálu větrem. Tento fenomén hraje v současnosti důležitou roli, ale méně než v minulosti, a to především jako významný disturbanční činitel při udržení alpského bezlesí.

5 Dynamika sněhové pokrývky v Krkonoších

Sněhovou pokrývkou, která je tvořena pevnými srážkami, lze definovat jako vrstvu ledu a sněhu. Vývoj sněhu probíhá ve třech fázích: hromadění sněhu, dozrávání sněhu a tání sněhu. Tyto procesy jsou ovlivňovány fyzicko-geografickými faktory, které lze kategorizovat do tří skupin: geomorfologické faktory, meteorologické faktory a vegetace (Klivanová 2013). V této oblasti je primárním faktorem sníh, jeho usazování a tání výrazně ovlivňuje místní zásobování vodou a regulaci teploty půdy. Izolační vlastnosti sněhu mají dále rozmanitý vliv na růst rostlin, živočichů, půdu a přítomnost periglaciálních útvarů, které jsou charakteristickým znakem krkonošské Arktoalpské tundry. Množství sněhu na povrchu Krkonoš je ovlivňováno tvarem terénu a zejména charakterem větru. Je důležité si uvědomit, že sněhové srážky se během deponice nerozdělují rovnoměrně (Ráček, Blahůt 2016). Když sníh padá na studený povrch země bez tání, prochází procesem známým jako akumulace. Během této doby nastává další proces, nazývaný dozrávání sněhu, kdy se mění krystalická struktura sněhu a mění se velikost a tvar ledových krystalů. Tyto krystaly jsou vysoce nestabilní kvůli poměru povrchu k objemu a rychle se přeměňují na ledová zrna. Finální proces, známý jako tání sněhu, zahrnuje přeměnu ledu na kapalnou vodu (Klivanová 2013).

Nadmořská výška Krkonoš velmi ovlivňuje charakteristiku sněhové pokrývky, jak uvádí Sýkora (1983). V hřebenových oblastech jsou hodnoty sněhu v porovnání se zbytkem ČR mimořádně vysoké. Navíc tvar a orientace svahu spolu s pohybem proudění vzduchu přispívají

k redistribuci sněhu z návětrných do závětrných poloh. Stojí za zmínku, že přítomnost a trvání sněhu významně ovlivňuje vznik a chování periglaciálních jevů, jak uvádí Smolíková (2009).

Potenciálním dopadem globální změny klimatu na vzorce sněžení se zabývá Zeidler (2016). Předpokládá se, že v určitých oblastech může dojít ke zvýšení zimních srážek ve formě sněhu, což povede k vyšší sněhové pokrývce. Tyto změny jsou zvláště pravděpodobné v arktických oblastech a horských oblastech. Navíc se očekává, že průměrná teplota vzroste, což povede k rychlejšímu tání. I když se předpokládá, že vyšší sněhová pokrývka by měla roztát rychleji při vyšších teplotách, doba tání může zůstat nezměněna. Je však důležité si uvědomit, že zimní období není důsledně teplotně vyrovnané. Občasné výkyvy nad bod mrazu, a to i v zimních měsících, mohou způsobit zkrácení zimního období. Jedním z důsledků těchto předpokládaných klimatických změn je zvýšení frekvence lavin způsobených kombinací vodou nasyceného sněhu a volné vody. Slushflow neboli hromadný pohyb vody a sněhu je řazen mezi suťové proudy. Je běžně pozorován v arktických a subarktických oblastech, stejně jako v oblastech s permafrostem nebo horskou tundrou (Spusta a Kociánová 1998). Ve studii, kterou provedl Flousek (2019), analýza dat z let 1961–2016 odhalila trend teplejších zim se sníženým množstvím sněhu. V tomto období se také zkrátila doba trvání sněhové pokrývky. Zajímavé je, že vyšší nadmořské výšky mívají konzistentnější sněhovou pokrývku ve srovnání s nižšími nadmořskými výškami. Severní polská strana pohoří navíc zažívá horší sněhové podmínky ve srovnání s jižními svahy. Tuto nerovnováhu lze přičíst orientaci a geomorfologii Krkonoš a také místní konfiguraci terénu. K tomuto nepoměru dále přispívá oteplovací efekt foukaných větrů, který je výraznější během zimy na severní straně hor.

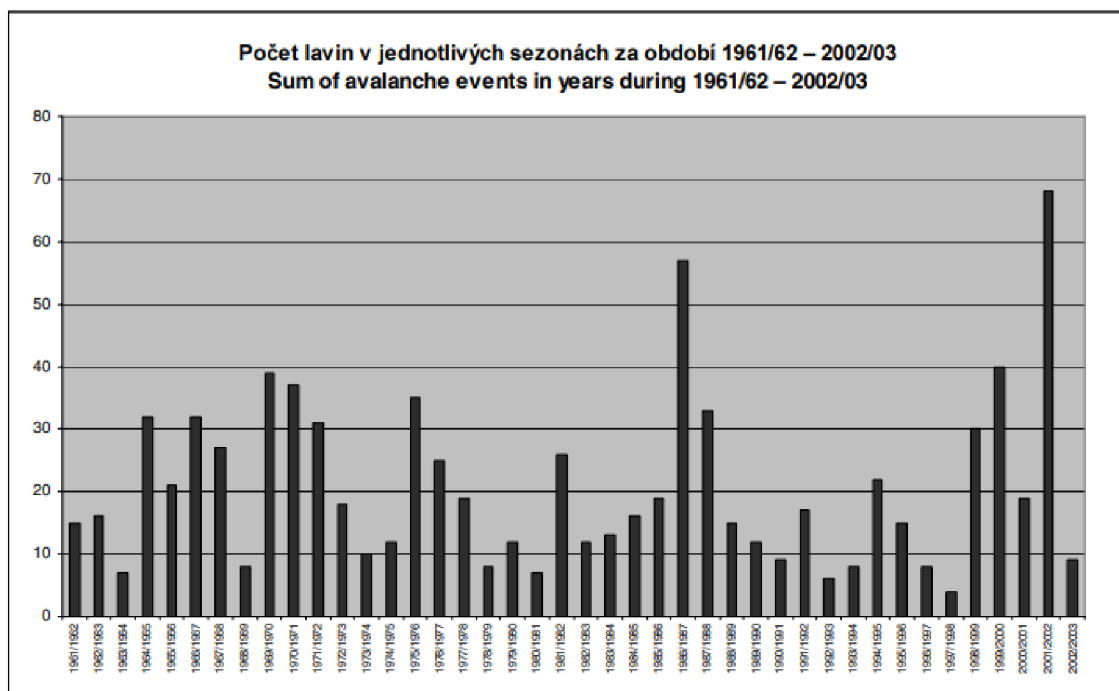
Janásková (2006), prezentuje výsledky dvouletého měření sněhové pokrývky na čtyřech lokalitách v Krkonoších. Na většině lokalit bylo zjištěno pravidelné rozložení sněhu, které bylo díky výraznému efektu orografického usměrnění větru jen minimálně ovlivněno změnami směru větru. Z provedených měření dále vyplynulo, že zatímco maximální dosažené mocnosti sněhu byly jasně závislé na celkových sněhových poměrech na náhorní plošině (normálu) a byly tím větší, čím je sněhu obecně více, u minimálních naměřených mocností je tento vztah patrný značně méně. V místech větrně velmi exponovaných (vrcholová část Studniční hory a části lokality Modré sedlo) je výška sněhu v podstatě nezávislá na celkových sněhových poměrech a bez ohledu na mocnosti sněhu dosažené v jiných částech náhorní plošiny nepřesahuje po celou zimu 5–20 cm.

V budoucnu, jak teplota vzduchu stoupá, zimní období zaznamená nárůst kapalných srážek. Tento posun v poměru sněhu k úhrnu srážek bude mít za následek snížení hloubky sněhové pokrývky (Kožíšek 2020). Výška sněhové pokrývky závisí na různých faktorech, jako je množství a charakter zimních srážek a také teplota vzduchu. Podstatnou roli při ovlivnění výšky sněhové pokrývky však hraje nadmořská výška konkrétní lokality. Na výšku sněhové pokrývky mají vliv i další faktory, jako je exponovanost terénu a přítomnost vegetace (Zuzáková 2019). V horských oblastech závisí rozložení a hloubka sněhové pokrývky především na tvaru země a proudění větru. V důsledku toho se sněhové srážky hromadí nerovnoměrně, přičemž většina z nich se usadí v chráněných polohách. Větší význam z hlediska množství má však druhotné snášení sněhu z hřebenů a náhorních plošin do závětrných oblastí. Tyto změny v poměru sněhu ke srážkám nakonec povedou ke snížení hloubky sněhové pokrývky (Klivanová 2013).

V rámci pravidelných každodenních meteorologických měření je každoročně v různých lokalitách pečlivě sledována výška sněhové pokrývky v Krkonoších (Spusta a Kociánová 2003). Patří mezi ně centra Špindlerův Mlýn, Pec pod Sněžkou a Benecko a také meteorologické stanice na hřebeni hor, jako je Labská bouda a Luční bouda. Po celou zimní sezónu jsou sněhové srážky v těchto oblastech rozmístěny rovnoměrně. Vlivem proudění vzduchu a turbulencí v určitých směrech však existují specifická místa, kde se sníh hromadí ve více vrstvách, někdy dosahujících tloušťky několika metrů.

Během zimního období se výška sněhové pokrývky v horských oblastech výrazně liší, jak uvádí Fanta (1969). V určitých oblastech je sníh často odhrnován, což vede k tomu, že jeho nadmořská výška přesahuje nadmořskou výšku podloží. Naopak v závětrných oblastech Krkonoš sněhová pokrývky běžně přesahuje výšku 4 m. Klivanová (2013) vysvětluje, že k měření sněhové pokrývky se používají různé metody, jako jsou staniční, terénní a dálkové techniky využívající nástroje dálkového průzkumu. Mezi základní parametry, které se měří, patří výška sněhu a vodní hodnota sněhu.

Laviny jsou v souvislosti se sněhovou pokrývkou často diskutovaným tématem. Badatelé rozsáhle studovali dlouhodobé vzorce vývoje sněhové pokrývky a lavinové aktivity v Krkonoších (Vrba, Spusta 1991; Spusta, Kociánová 1998, 2003). Od 60. let 20. století jsou v lavinovém katastru shromažďovány údaje o sněhových lavinách, výsledkem čehož je vytvoření komplexní databáze, která obsahuje důležité podrobnosti o lavinových událostech (Vrba, Spusta 1991; Spusta, Kociánová 1998, 2003). Spusta a Kociánová (2003) ve svém výzkumu prezentovali historické údaje o počtu lavin v různých ročních obdobích od roku 1962 do roku 2003. Zejména rok 1998 byl svědkem nejnižšího počtu lavin v Krkonoších, naopak v roce 2003 bylo zaznamenáno nejvyšší číslo (obr. 2).



Obrázek 2: Počet lavin v jednotlivých sezonách 1961/62-2002/03

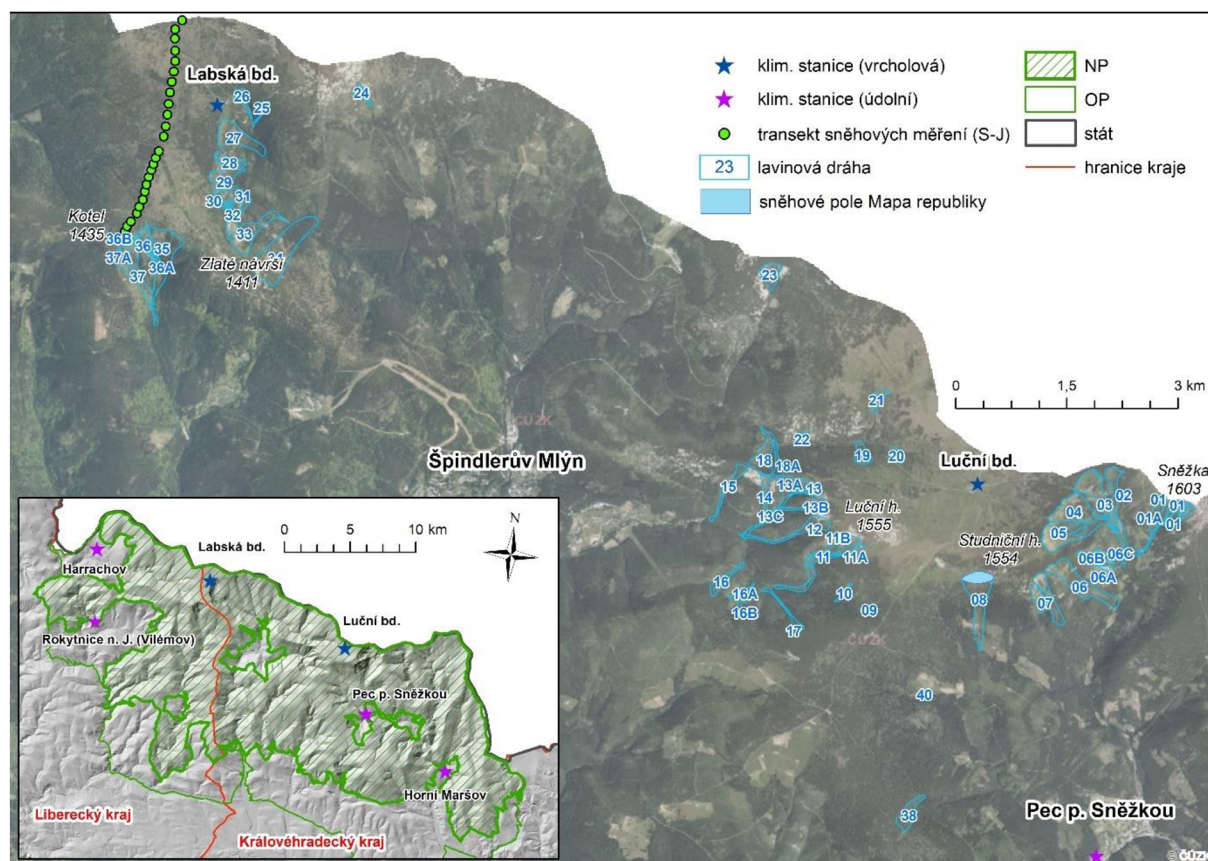
Pramen: Spusta, Kociánová (2003): Lavinový katastr a zimní situace na hřebenu české části Krkonoš v období 1998/99–2002/03

Komplexní dokumentace lavin a jejich mapování na pohoří je primárním cílem lavinového katastru. Tento katastr má přispět k lepšímu pochopení vzorců opakování lavin. Lavinové stopy se nacházejí převážně v údolích a roklích. Od roku 1961–62 do roku 1999–2000 bylo na české straně zaznamenáno celkem 780 lavin. Z nich 152 končilo na alpské úrovni, 191 na horní hranici lesa a 437 v lese. To znamená, že 628 lavin, což představuje 80,5 % z celkového počtu, se stalo v zalesněných oblastech, včetně ekotonu horní hranice lesa. Nadmořská výška, ve které laviny pronikají lesem, se pohybuje od 1 300 m do 850 m (Kociánová, Spusta 2000). Za zmínku stojí, že zájmová oblast leží za horní hranicí zóny sběru dat týkajících se lavin. Na svahu od Modrého sedla k Luční hoře a v okolí Luční boudy (Spusta 1998) sněhový profil odhalil přítomnost zvodnělých vrstev, naznačujících počáteční fáze tvorby rozbředlých lavin v těchto specifických lokalitách. Spusta (2008) předpokládá, že rašeliniště na straně Stříbrného hřbetu spolu s mísovitými prohlubněmi na severním svahu Studničních a Lučních hor by mohly potenciálně sloužit jako další lokality pro výskyt 24 bahenních proudů.

Problematika lavinových událostí v Krkonoších je v posledních letech středem zájmu Racka a Blahůta (2016). Jejich studie nezkoumá pouze frekvenci a charakteristiky lavin, ale také zvažuje vliv klimatických proměnných. Z jejich zjištění vyplývá, že současný lavinový model modelu RAMMS je vhodný pro modelování deskových lavin ve specifických podmínkách Krkonoš. Parametry tření doporučené v příručce RAMMS platí i pro Krkonoše, ale vyžadují pečlivé zvážení, zejména ve vztahu k době opakování lavin. Při použití vhodných parametrů tření poskytuje RAMMS vysoce přesné výsledky pro rozsah lavin. Je však důležité si uvědomit možné nadhodnocení akumulací plochy, které může přinést větší nepřesnosti ve srovnání s odborným stanovením parametrů. Dále je třeba poznamenat, že model s vyšším rozlišením poskytuje lepší výsledky pouze při použití vysoce kvalitních vstupních dat a přesně zvolených koeficientů tření. Zvýšení rozlišení modelu však výrazně prodlužuje dobu výpočtu, aniž by se výrazně zlepšila přesnost výstupů, která obvykle zůstává v rozmezí několika procent.

6 Vlastní metodika práce

6.1 Vymezení území



Obrázek 3: Přehledová mapa Krkonoš

Pramen: Dataze KRMAP, vlastní zpracování 2024

Jak bylo zmíněno v teoretické části, Krkonoše jsou nejvýznamnější pohoří z hlediska geobiodiverzity, jelikož zasahují do několika vegetačních stupňů a zároveň jsou v České republice největší plochou v tzv. subalpínském stupni. Významné jsou tedy zejména díky primárnímu bezlesí, taktéž význam spočívá v geologických, geomorfologických a biologických fenoménech. Tyto hory se však neomezují pouze na Českou republiku; zasahují i do sousedního Polska, čímž se stávají klíčovou součástí většího Českého masivu. Flousek a kol. (2007) do své práce zahrnuli vizuální zobrazení, které srovnává orografické, administrativní a zájmové hranice regionu. Region je domovem rozmanitých ekosystémů a stanovišť, včetně vzácných a endemických druhů flóry a fauny. Mění se klima však začalo ovlivňovat krajinu a biologickou rozmanitost regionu.

V rámci praktické části, byly použité různé metodiky. Velmi poučitelná webová stránka Český hydrometeorologický ústav k stažení měsíčních dat, které se zabývají různými klimatologickými charakteristiky, zejména: maximální teplota vzduchu, maximální výška sněhu a úhrn srážek, které jsou naměřené na stanicích za období 1961–2023.

Praktická část je rozdělena podle srovnání teplot vzduchu, dynamiky sněhové pokrývky a úhrnu srážek na hřebenové a údolní stanici. Mezi hřebenové stanice patří Labská Bouda, která se nachází v nadmořské výšce přibližně 1 340 m nad mořem ve východní části Krkonoš.

Luční Bouda, která je umístěna v nadmořské výšce kolem 1 410 m nad mořem, je umístěna v západní části Krkonoš. K údolním stanicím patří Harrachov, který se nachází v západní části Krkonoš o nadmořské výšce kolem 700 metrů, Rokytnice nad Jizerou se nachází v západní části Krkonoš o výšce přibližně 470 m nad mořem. Pec pod Sněžkou se nachází ve východní část, podle polohy nadmořské výšky, tato stanice leží přibližně o výšce 769 m nad mořem. Poslední údolní stanice je Horní Maršov, která se nachází ve východní části Krkonoš o výšce 620 m nad mořem. V mé práci jsem se zaměřila na data v letech 2000–2023, tyto data představují maximální měsíční výšky sněhu, maximální teploty vzduchu a maximální úhrny srážek. Pro každou stanici je grafické znázornění tyto klimatologických charakteristik pro měsíce leden, únor a březen v letech 2000–2023, pouze stanice Luční bouda měla naměřená data od roku 2009–2023. Další část byla zaměřena na dynamiku sněhové pokrývky ohledně měření výšky sněhu v transektu J-S, tyto data jsou z Krkonošského národního parku, jsou graficky znázorněny a porovnávají dynamiku lavinové aktivity a její změnu, provedená data jsou v západní i východní části.

Podle starších dat, Spusta a Kociánová (2003) uvedli, že během zimních sezón 1998-99, 1999-2000 a 2001-2002 došlo k výraznému nárůstu lavinové aktivity. V letech 1998-99 bylo zaznamenáno celkem 30 lavin, v letech 1999-2000 následovalo 40 lavin a v letech 2001-2002 proběhlo až ohromujících 68 lavin. Tyto zimy byly také svědky neobvykle vysoké četnosti základových lavin, které opakovaně způsobovaly přesun značného množství zeminy a kamení. Mezi významné události patří laviny Velké Studniční jámy v letech 1999 a 2002, laviny Úpské Rokle v letech 1999 a 2002 (s nahromaděním sněhu do 9. září) a lavina Velké Kotelní jámy v roce 2002. Navíc došlo ke zvýšenému výskytu prašných lavin, přičemž největší se odehrála v Navorské jámě v lednu 2002. zde docházelo k výskytu slushflow v dubnu v roce 2000 po intenzivních srážkách. Rozsáhlé kácení odumírajících smrkových porostů mělo za následek rozšíření lavinového katastru o malé laviny na severním svahu Železného vrchu. V průběhu měsíců dubna a května roku 2002 zde byly dlouhé trhliny, které se postupně rozšiřovaly a dosahovaly až 5 metrů na šířku a 4 metry do hloubky. Navíc souvislá sněhová pokrývky na hřebeni skončila dříve než obvykle v konkrétních datech: 5. května 2000, 5. května 2001 a 30. dubna 2003.

Poslední metodika je vývoj sněhu na sněhovém poli Mapy republiky, naměřená data jsou taktéž získané ze správy Krkonošského národního parku, která popisuje výšky sněhu od roku 2000-2023. K vytvoření přehledové mapy Krkonoš, které je znázorňuje meteorologických a srážkoměrných stanic, vyobrazení transektu pravidelných měření sněhu, lokací sněhového pole mapy republiky a lavinových drah, u kterých je sledována četnost pádů lavin, byla použita důležitá metodika, která se nazývá ArcGIS Pro. Tato metodika je definována jako geografický informační systém (GIS). Jedná se o softwarovou platformu pro práci s geografickými informacemi. ArcGIS Pro poskytuje mnoho nástrojů a funkcí, včetně práce s geografickými daty, jejich analýzou a následnou interpretací a vizualizací v podobě map.

7 Výsledky a Diskuse

7.1 Srovnání dynamiky sněhové pokrývky ve stanicích ČHMÚ

Dynamika sněhové pokrývky v horských oblastech hraje klíčovou roli v různých ekologických a hydrologických procesech ovlivňujících ekosystémy, vodní zdroje a lidské

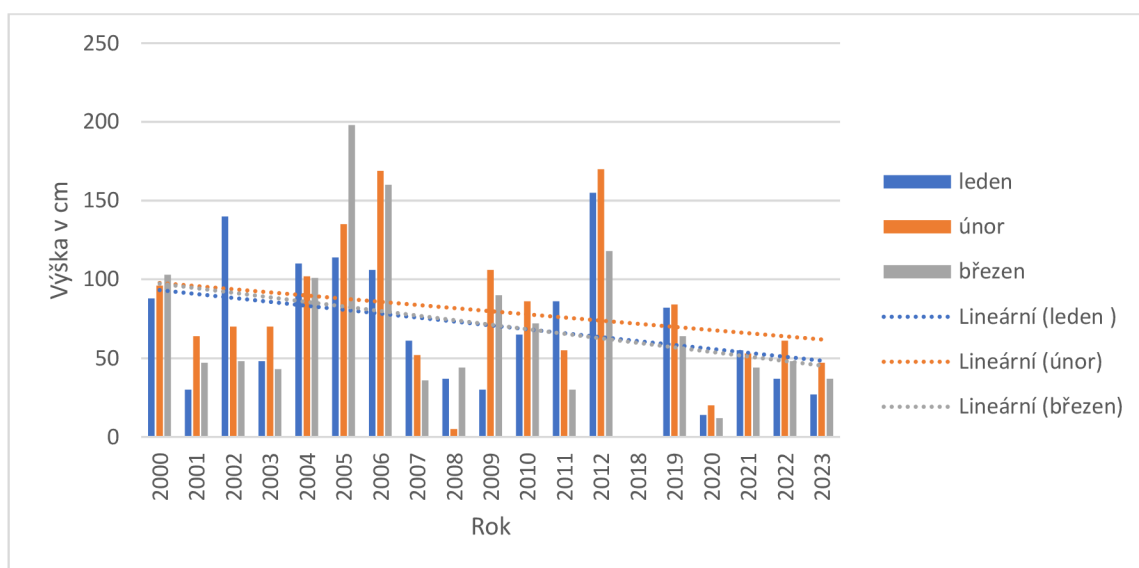
aktivity. Ve studii Flousek (2019) proběhla analýza dat z let 1961–2016 a odhalila trend teplejších zim se sníženým množstvím sněhu a sníženou dobou trvání sněhové pokrývky. Je zřejmé, že vyšší nadmořské výšky mívají konzistentnější sněhovou pokrývku ve srovnání s nižšími nadmořskými výškami. Severní polská strana pohoří navíc zažívá horší sněhové podmínky ve srovnání s jižními svahy. Tuto nerovnováhu lze přičíst orientaci a geomorfologii Krkonoš a také místní konfiguraci terénu. K tomuto nepoměru dále přispívá oteplovací efekt foukaných větrů, který je výraznější během zimy na severní straně hor. Fanta (1969), došel k závěru, že během zimního období se výška sněhové pokrývky v horských oblastech výrazně liší. V určitých oblastech je sníh často odhrnován, což vede k tomu, že jeho nadmořská výška přesahuje nadmořskou výšku podloží. Naopak v závětrných oblastech Krkonoš sněhová pokrývka běžně přesahuje výšku 4 m.

Moji praktickou část věnuji komparativní analýze staničních dat, zejména maximální výšce sněhové pokrývky ve vybraných stanicích, která jsou vypočítaná z měsíčních dat měsíců leden, únor a březen, ve kterých se vyskytuje nejvíce sněhu. Výška sněhové pokrývky je sledována v období roku 2000–2023.

Údolní sledované stanice:

Harrachov

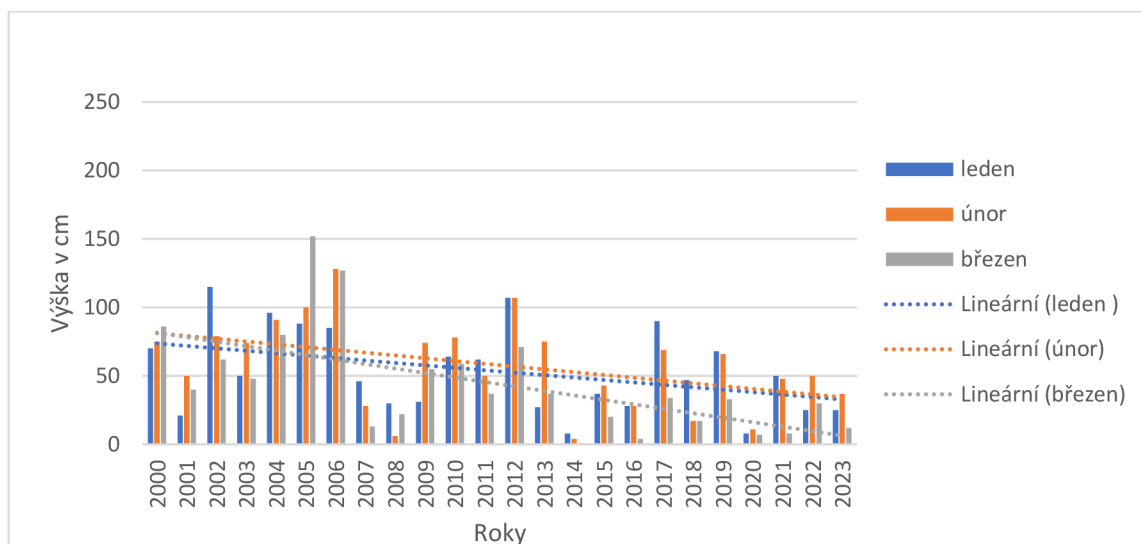
Údolní meteorologická stanice, která se nachází v západní části Krkonoš, je dlouhodobě klíčovým místem pro sledování dynamiky sněhové pokrývky a poskytuje cenné poznatky o dopadech klimatických změn na zimní krajinu. V minulé dekádě v roce 2005 maximální výška sněhu byla v březnu, a to kolem 198 cm. Nejnižší naměřená hodnota byla v roce 2008 v únoru kolem 5 cm. Podle lineární osy v průběhu let docházelo k prudkému poklesu celkové výšky sněhové pokrývky. Dle Kožíška (2020), v budoucnu při vzestupné teplotě vzduchu v zimním období zaznamenáme nárůst kapalných srážek. Tento posun v poměru sněhu k úhrnu srážek bude mít za následek snížení hloubky sněhové pokrývky.



Obrázek 4: Maximální výška sněhu na stanici Harrachov
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Rokytnice nad Jizerou

Údolní stanice Rokytnice nad Jizerou, která se nachází v západní části Krkonoš. Nejvyšší maximální naměřená hodnota je v březnu v roce 2005, a to kolem 152 cm a nejnižší hodnota byla naměřená kolem 1 cm (obr. 5). Podle lineární osy údolní stanice Rokytnice nad Jizerou, dochází k velmi výraznému poklesu výšky sněhové pokrývky (obr. 6), kvůli vyšším hodnotám teplotu vzduchu (obr.5).

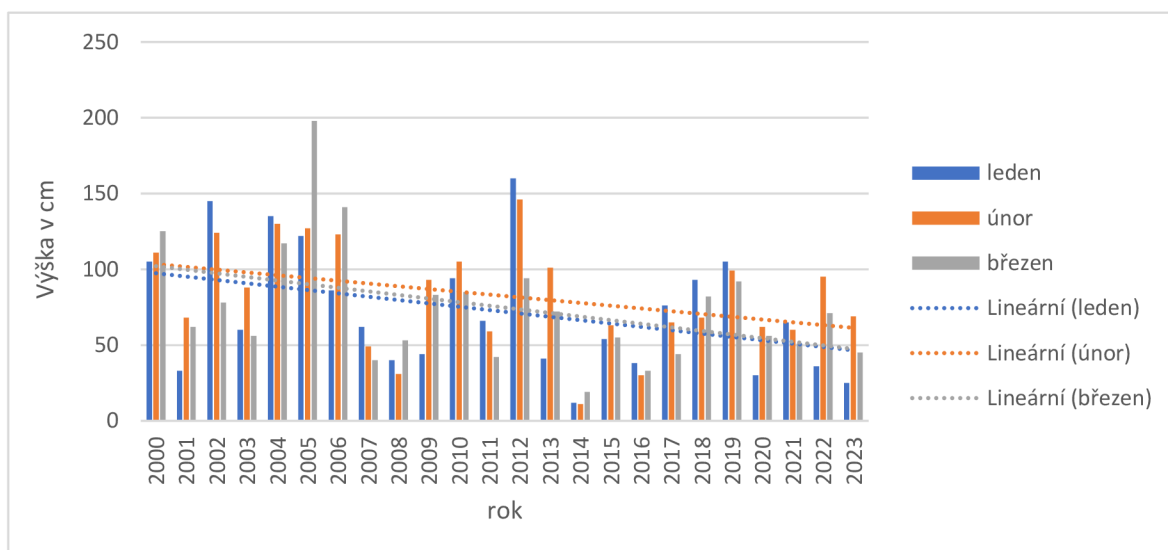


Obrázek 5: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Rokytnice nad Jizerou

Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Pec pod Sněžkou

Údolní stanice, která se nachází ve východní části Krkonoš. Obr. 6 znázorňuje, že nejvyšší maximální naměřená hodnota výšky sněhu byla v březnu v roce 2004, a to kolem 198 cm a nejnižší naměřená hodnota v únoru v roce 2014, a to kolem 11 cm a dochází k poklesu výšky sněhu.

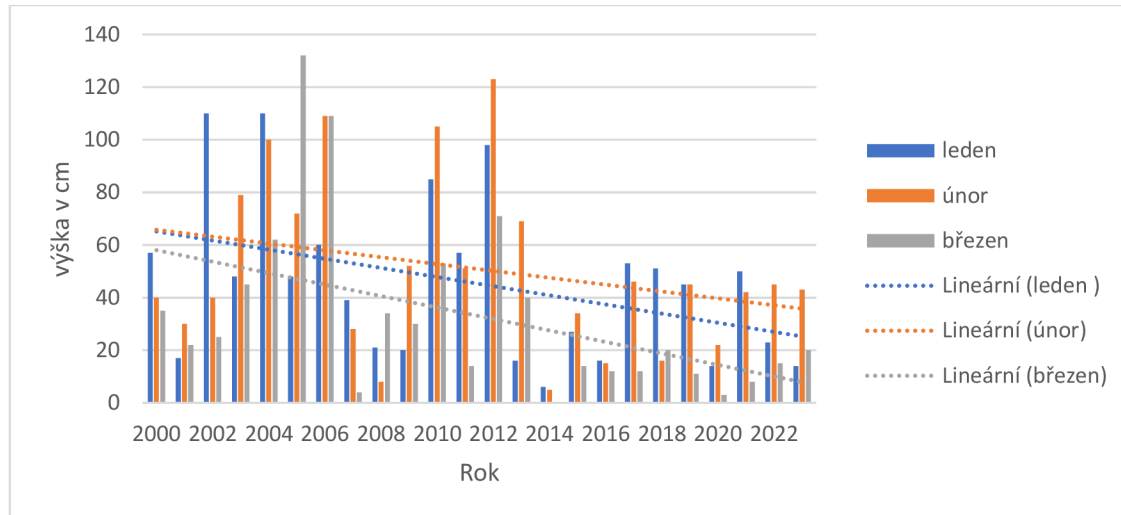


Obrázek 6: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Pec pod Sněžkou

Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Horní Maršov

Údolní stanice nacházející ve východní části Krkonoš. nejvyšší naměřená hodnota byla v březnu v roce 2005, činila 132 cm a nejnižší hodnota byla v březnu v roce 2014, kde nebyla naměřená žádná maximální výška sněhu (obr. 7).

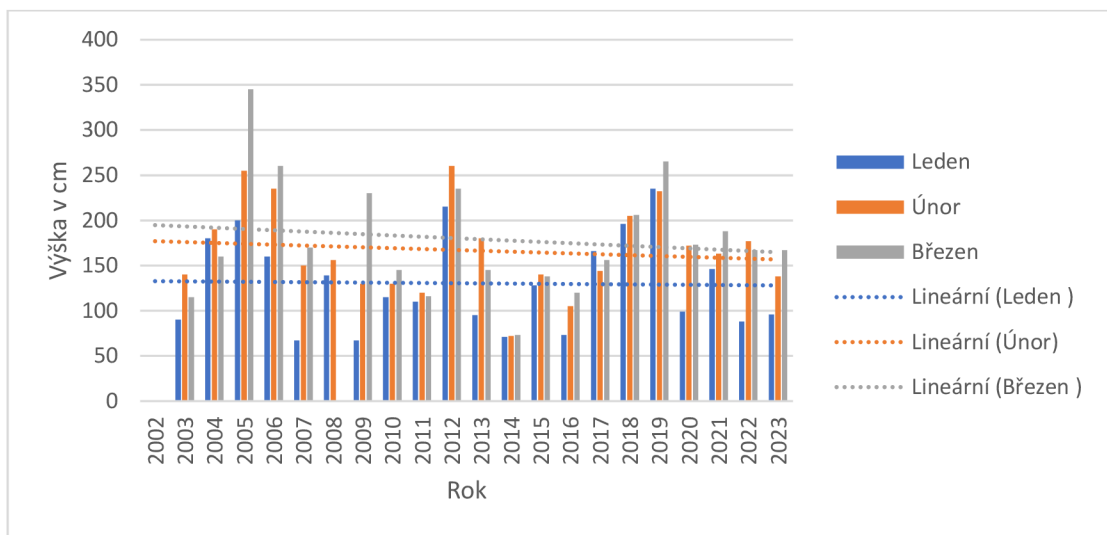


Obrázek 7: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Horní Maršov
Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Hřebenové sledované stanice:

Labská Bouda

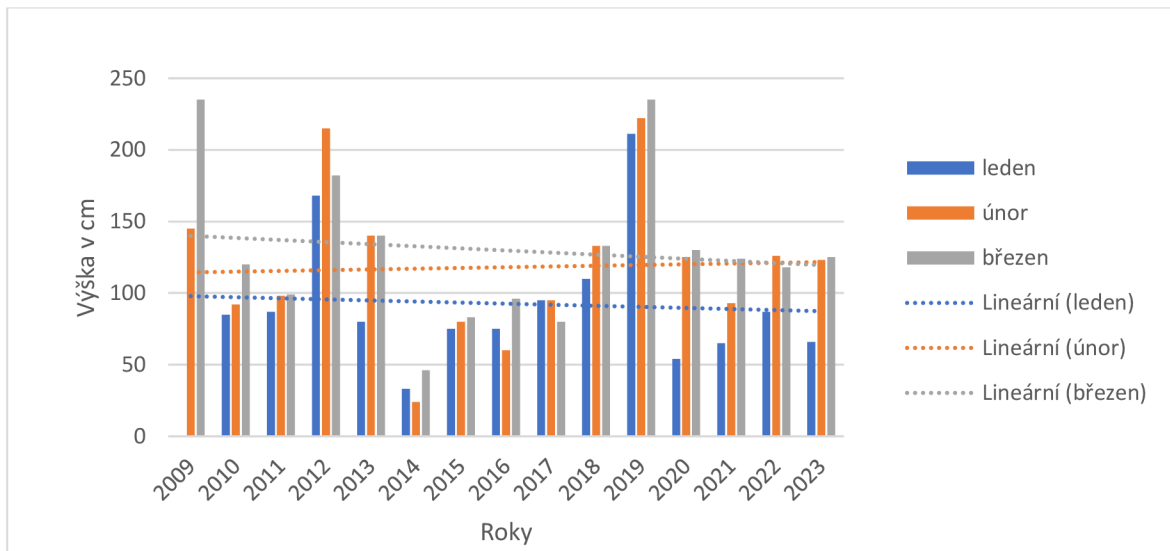
Hřebenová stanice Labské Boudy, která se nachází ve východní části Krkonoš, malebným Krkonoším slouží jako klíčové místo pro sledování dynamiky sněhové pokrývky v regionu. Tato deskriptivní studie si klade za cíl analyzovat změny výšky sněhové pokrývky na hřebenové stanici Labské Boudy v letech 2000–2023. Údaje o sněhové pokrývce z let 2000–2023 v hřebenové stanici Labské Boudy poskytují cenné poznatky o trendech maximální výšky sněhové pokrývky. Za sledované období jsou patrné výkyvy v maximální výšce sněhové pokrývky odrážející proměnlivost zimních podmínek v Krkonoších. Vliv změny klimatu na dynamiku sněhové pokrývky v oblasti je také kritickým faktorem, který je třeba vzít v úvahu, protože změny klimatu mohou vést ke změnám v načasování a trvání sněhové pokrývky na hřebenové stanici Labské Boudy.



Obrázek 8: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Labská Bouda
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Luční Bouda

Tato analýza se zaměřuje taktéž na hřebenovou meteorologickou stanici nacházející v západní části Krkonoš. Maximální naměřená výška sněhu v březnu roku 2009 a 2019 o velikosti 235 (obr. 9). Nejnižší naměřená hodnota z období 2009–2023 byla v únoru v roce 2014, a to kolem 46 cm (obr. 9).



Obrázek 9: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Luční Bouda
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

7.2 Srovnání teploty vzduchu ve stanicích ČHMÚ

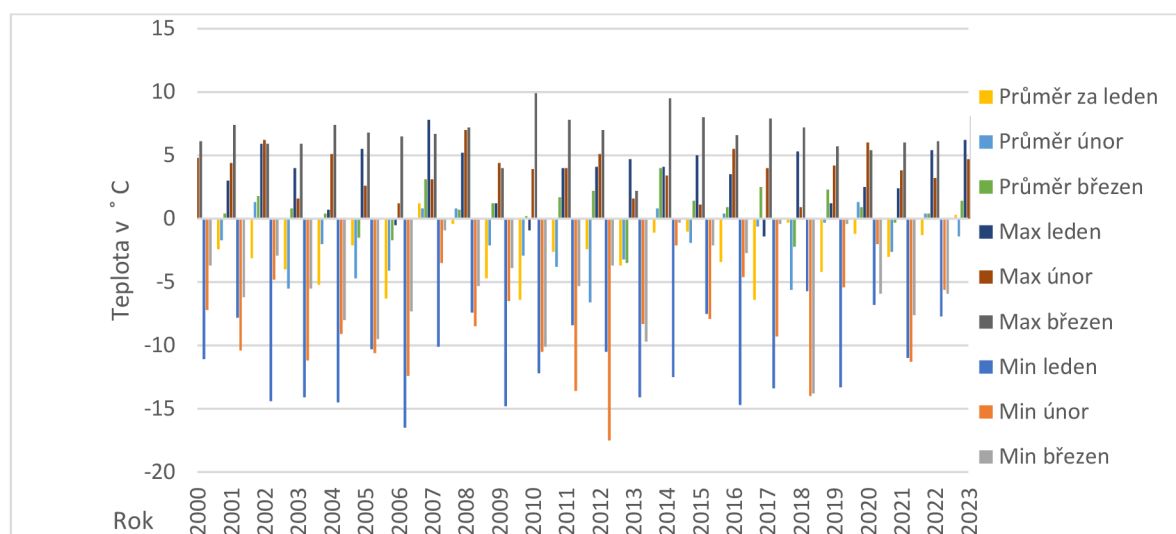
Teplota hraje klíčovou roli při určování výšky sněhové pokrývky, což má zase významné důsledky pro různé aspekty životního prostředí. V této části budu analyzovat a porovnávat

změny teplot na západočeských stanicích Labská Bouda a Harrachov a východních stanicích Luční Bouda a Pec pod Sněžkou.

Údolní sledované stanice:

Harrachov

Na stanici Harrachov dochází k poklesu teploty v zimní sezoně, kde nejnižší teplota byla zaznamenána v lednu v roce 2006, kde činila -16,5 stupni Celsia (obr. 10). Maximální naměřená hodnota byla v březnu v roce 2010, a to kolem 9,9 stupňů Celsia (obr. 10).

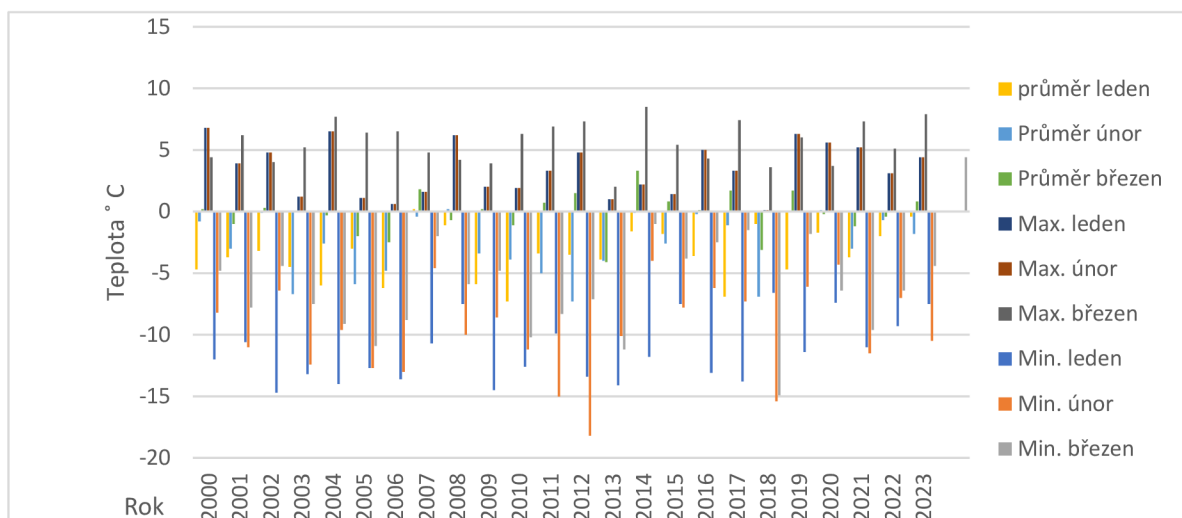


Obrázek 10: Měsíční teplota vzduchu na stanici Harrachov

Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Pec pod Sněžkou

Údolní stanici Pec pod Sněžkou, která se nachází ve východní části Krkonoš. Minimální teplotní hodnota byla nejnižší v únoru v roce 2012, a to kolem -18,2 stupňů Celsia a maximální teplotní hodnota z období 2002–2023 v březnu v roce 2014 činila 8,5 stupňů celsia (obr. 11).

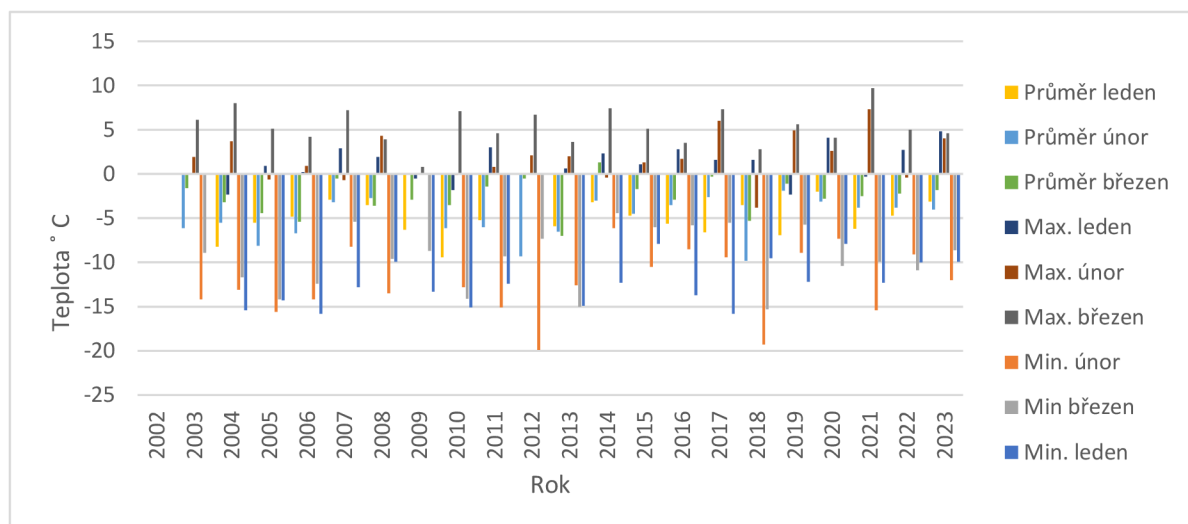


Obrázek 11: Měsíční teplota vzduchu na stanici Pec pod Sněžkou
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Hřebenové sledované stanice:

Labská Bouda

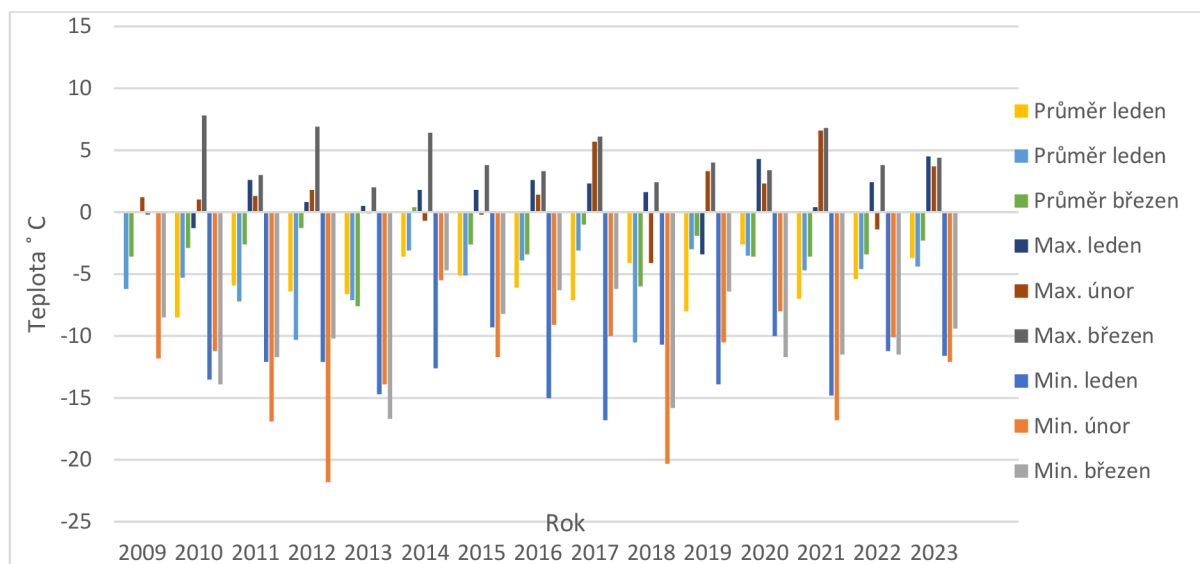
Na hřebenové stanici Labská bouda, která se nachází ve východní části Krkonoš, dochází ve vybraných měsících k změně v maximální a minimální hodnotě teploty vzduchu, která je sledována v letech 2002–2023. Minimální hodnoty jsou každý rok jiné, například nejnižší teplota byla naměřena v únoru v roce 2012, a to kolem -19,9 stupňů Celsia. Nejvyšší maximální hodnota podle těchto tří měsíců byla naměřena v březnu v roce 2021 kolem 9,7 stupňů Celsia (obr. 12).



Obrázek 12: Měsíční teplota vzduchu na stanici Labská Bouda
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Luční Bouda

Na hřebenové stanici Luční Bouda, která se nachází v západní části Krkonoš, byla naměřena nejnižší hodnota z období 2009–2023, která byla v únoru v roce 2012 kolem -21,8 stupňů Celsia (obr. 13). Postupně dochází k nárůstu teploty, nejvyšší maximální teplotní hodnota byla v březnu v roce 2010 7,8 stupňů celsia (obr. 13).



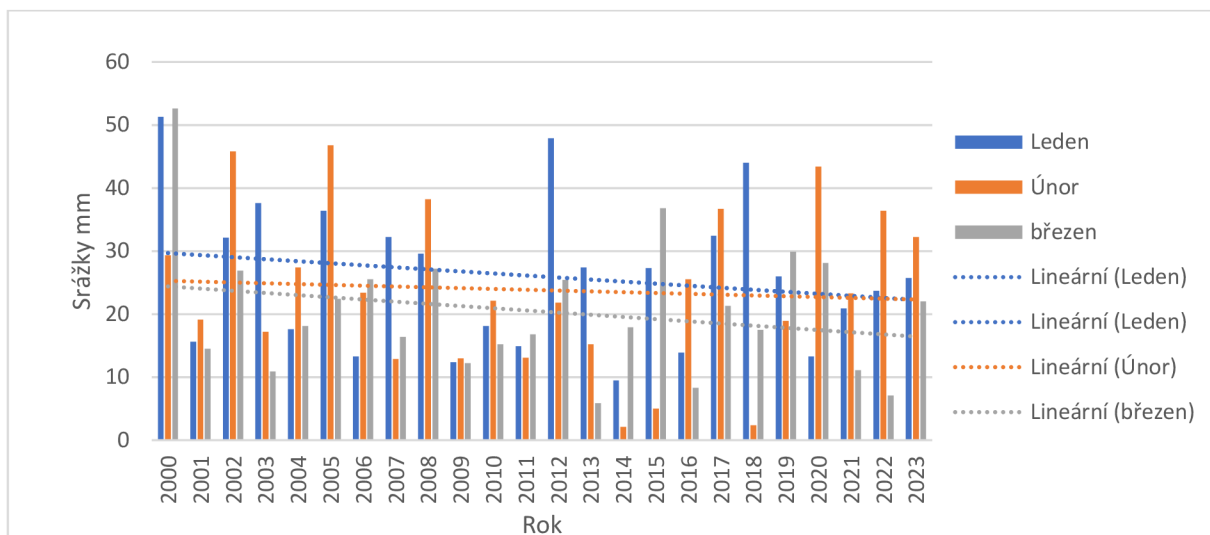
Obrázek 13: Měsíční teplota vzduchu na stanici Luční Bouda
Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

7.3 Srovnání úhrnu množství srážek ve stanicích ČHMÚ

Charakteristika srážkového úhrnu je výška vodního sloupce srážek za určitý časový úsek. Úhrn srážek má významný vliv na výšku sněhové pokrývky. Údolní sledované stanice:

Harrachov

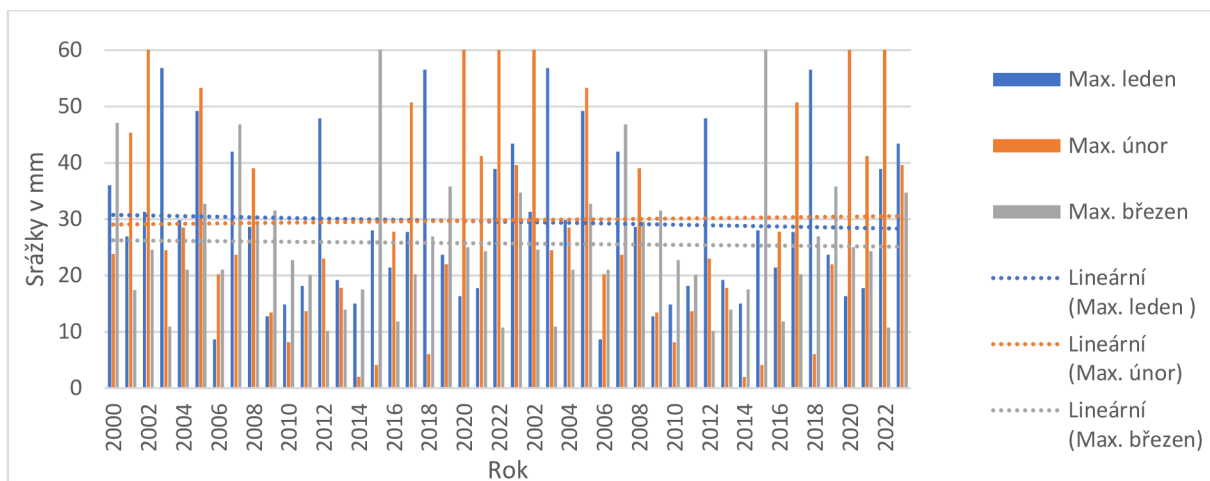
Na obrázku je znázorněn měsíční úhrn srážek v údolní stanici Harrachov, která se nachází v západní části Krkonoš. Největší maximální úhrn srážek byl naměřen v březnu v roce 2000, a to kolem 52,6 mm. Nejnižší maximální úhrn srážek byl naměřen v únoru v 2014 o velikosti 17,9 mm. Podle lineární osy v těchto měsících dochází ke snížení maximální naměřené hodnoty úhrnu srážek (obr. 14).



Obrázek 14: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Harrachov
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Pec pod Sněžkou

Tato údolní meteorologická stanice nacházející ve východní části Krkonoš, hraje zásadní roli při sledování a zaznamenávání měsíčních úhrnů srážek. Meteorologická stanice Pec pod Sněžkou je strategicky umístěna v regionu známém svými rozmanitými klimatickými podmínkami, od chladných zasněžených zim až po mírná vlhká léta. Maximální měsíční úhrn srážek v Peci pod Sněžkou je největší v únoru v roce 2002, a to kolem 66,9 mm a nejnižší naměřená hodnota v únoru v roce 2014, kolem 2 mm (obr. 15). Podle lineární osy v lednu dochází k mírnému poklesu úhrnu srážek.

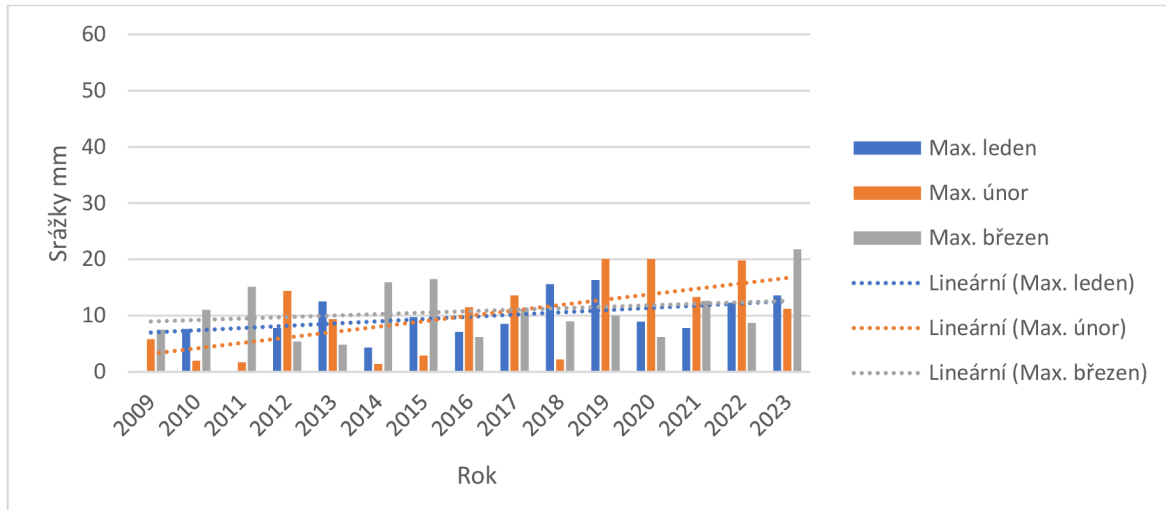


Obrázek 15: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Pec pod Sněžkou
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Hřebenové sledované stanice:

Luční bouda

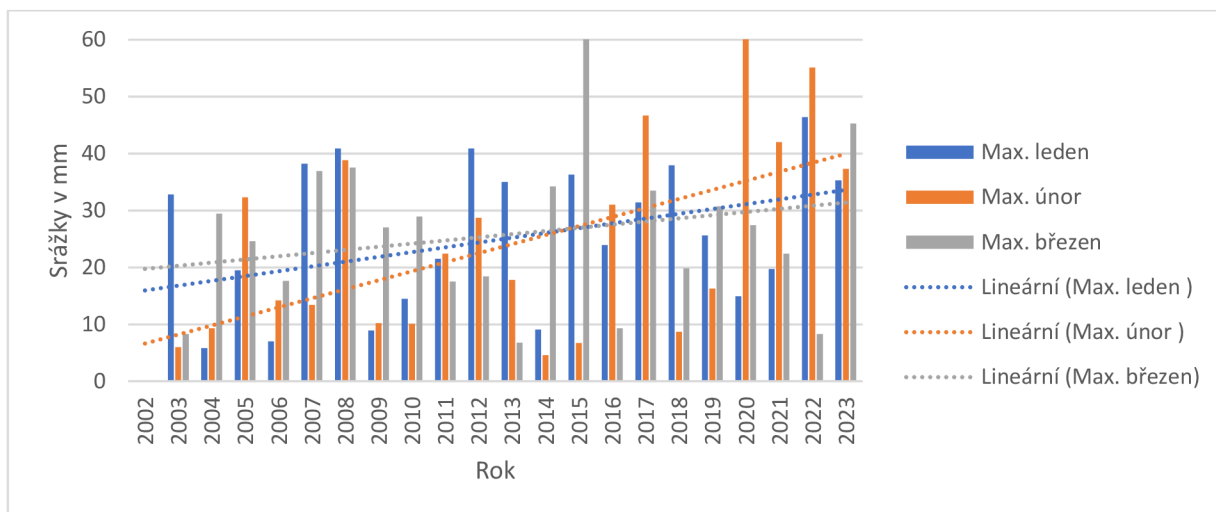
Hřebenová meteorologická stanice, která se nachází ve východní části Krkonoš. Množství srážek v Luční boudě a její změny jsou zásadními faktory, které mohou mít významný dopad na různé aspekty životního prostředí. Data jsou měřena v této stanici od roku 2009–2023. V roce 2023 v březnu byla naměřena největší maximální hodnota úhrnu srážek, a to kolem 21,8 mm. Nejnižší naměřená maximální hodnota srážek byla v roce 2014, kolem 1,4 mm (obr. 16). Podle lineární osy dochází v těchto třech měsících k nárůstu maximální naměřené hodnoty (obr. 16).



Obrázek 16: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Luční Bouda
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

Labská bouda

Meteorologická stanice, která se nachází v regionu známém svým rozmanitým počasím, které v průběhu let podléhá výkyvům úhrnů srážek. Stanice se nachází v západní hřebenových partiích, a proto má tendenci přijímat vyšší úrovně srážek. Jak se globální teploty zvyšují, změny ve vzorcích atmosférické cirkulace mohou vést ke změnám v distribuci srážek. Podle dat Českého hydrometeorologického ústavu byl naměřen celkový měsíční úhrn srážek ve dvou dekádách, první dekáda 2002–2010 a druhá dekáda 2011–2023. Tato naměřená data ve srovnání s daty ze stanice Harrachov jsou odlišná, maximální naměřená hodnota úhrnu srážek byla v roce 2015, kolem 78,7 mm. Nejnižší maximální úhrn srážek byl v únoru v roce 2014, kolem 4,6 mm (obr. 17). Podle lineární osy všech těchto měsíců dochází k nárůstu maximální naměřené hodnoty úhrnu srážek (Obr.17).



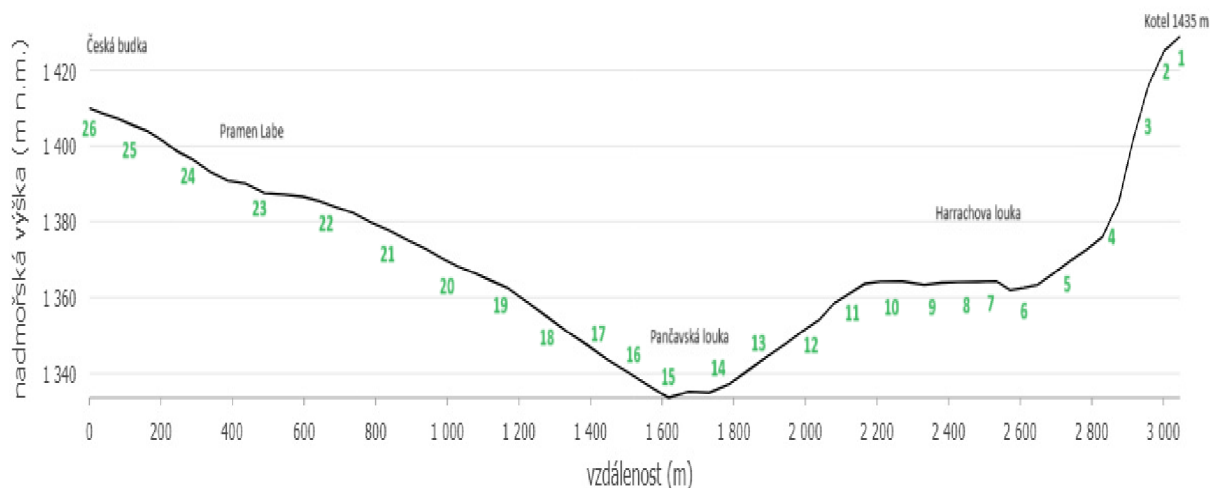
Obrázek 17: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Labská Bouda
 Pramen: Databáze ČHMÚ, vlastní zpracování 2024

7.4 Dynamika sněhové pokrývky v hřebenových partiích

Dynamika sněhové pokrývky v hřebenových oblastech Krkonoš je podmanivá a významná. Má dopad na životní prostředí, rekreační využití i bezpečnost v této horské oblasti. Při úvahách o sněhové pokrývce v Krkonoších je významný její neustále se měnící charakter. Výška a trvání sněhu nejen kolísá mezi ročními obdobími, ale také se liší v různých lokalitách. Hřebenové úseky představují zvláště náročné podmínky se sněhovou pokrývkou, které se můžou lišit od sněhové pokrývky v údolních částech.

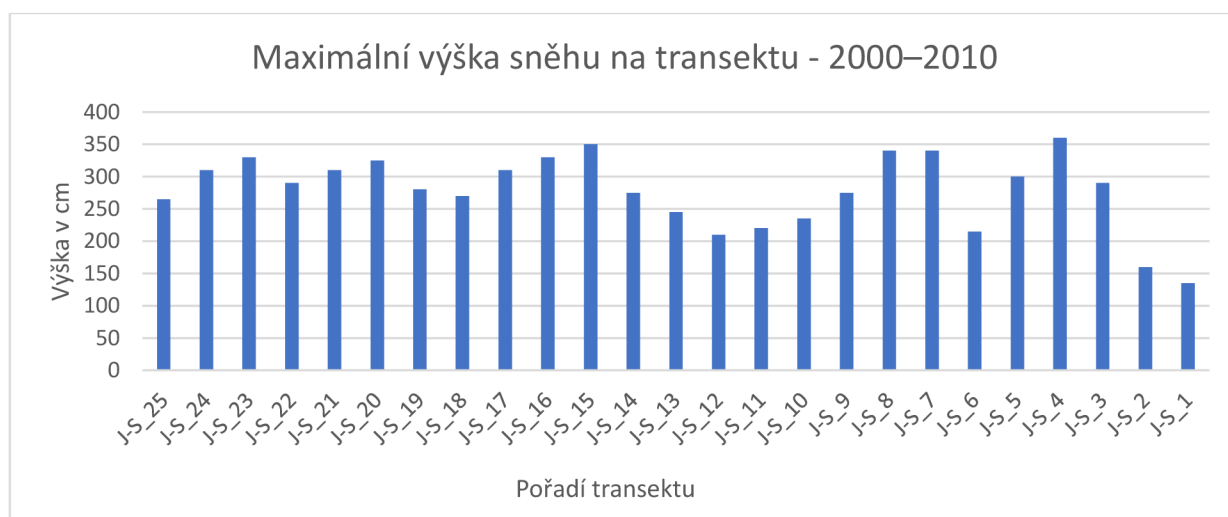
Transekt J-S je metoda, která zahrnuje provedení komplexního průzkumu regionu, počínaje jižními svahy (J) až po severní svahy (S). Transekt sleduje jihozápadní až severovýchodní orientaci, což umožňuje posouzení odchylek v nadmořské výšce, vegetaci, geologii a další atributy životního prostředí.

Na hřebenové stanici v tomto pohoří hraje nadmořská výška zásadní roli při utváření životního prostředí. Nadmořská výška navíc ovlivňuje vzorce srážek, přičemž ve vyšších nadmořských výškách spadá více sněhu ve srovnání s nižšími nadmořskými výškami (obr. 19). S rostoucí nadmořskou výškou je patrný pokles teploty, což vede k teplotním výkyvům v různých nadmořských výškách. Ve vyšších nadmořských výškách jsou teploty nižší, zatímco v nižších polohách jsou relativně vyšší. Toto kolísání teplot vytváří v pohoří jedinečné mikroklima.



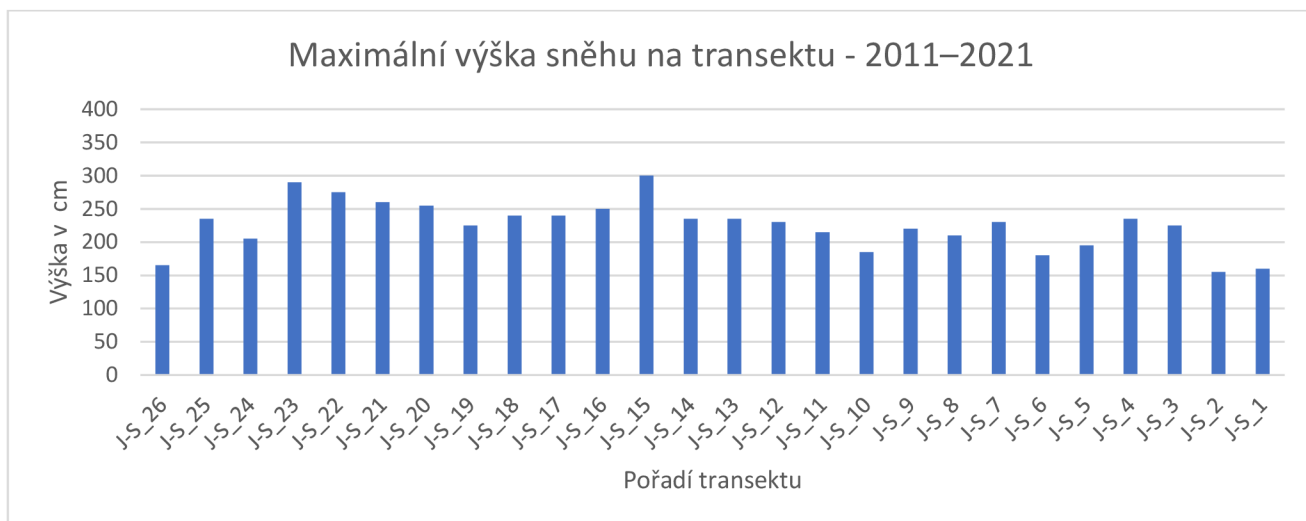
Obrázek 18: Výškový profil ploch na transektu
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

Transekt J-S v Krkonoších představuje důležitý nástroj pro zkoumání biodiverzity ekologických procesů a klimatických změn v této horské oblasti. Tento Transekt sleduje území od západu k východu pokrývající rozsáhlé oblasti od Jizerských hor na západě až po Sněžku na východě. Jeho výzkum přináší důležité poznatky o proměnlivosti přírodního prostředí Krkonoš. Východní část transektu zahrnuje nejvyšší hřebeny Krkonoš, včetně Sněžky, nejvyššího vrcholu v České republice. Zde tloušťka sněhové pokrývky a délka sněhového období bývá výrazně vyšší. Tento region je mnohem více exponován větru a extrémnějším podmínkám, což má vliv na distribuci rostlin a živočichů. Na obr. 21 je naměřen nejvyšší transekt, který je nazýván J-S 6, a to 360 cm. Nejnižší naměřená hodnota v J-S 1 je kolem 135 cm. Podle lineární osy dochází v období 2000–2010 ke snížení naměřené hodnoty maximální výšky sněhu.

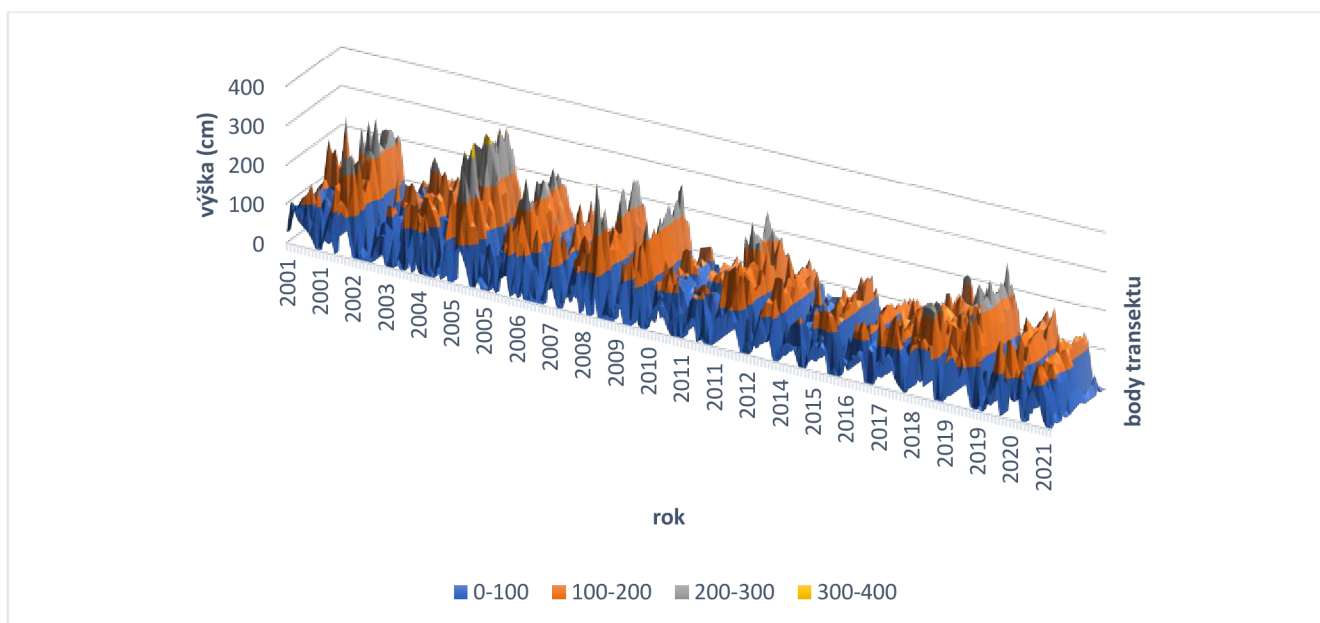


Obrázek 19: Maximální výška sněhu 2001–2010
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování, 2024

Dle analýzy maximální výšky sněhové pokrývky z druhé dekády (2011–2023) a její srovnání z období od roku 2001–2010, nejvyšší naměřená hodnota je v J-S15, a to kolem 300 cm a nejnižší hodnota z období 2011–2023 je v J-S2, kolem 155 cm. Podle lineární osy dochází stejně jako v první dekádě ke snížení maximální naměřené hodnoty výšky sněhové pokrývky.



Obrázek 20: Maximální výška sněhové pokrývky 2011–2021
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024



Obrázek 21: Naměřená data na transektu S-J
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

Obr. 22 představuje primární naměřená data na transektu S-J v 26 bodech. V některých letech docházelo k měření vícekrát. Výška sněhové pokrývky je nejvyšší v roce 2005, kde dosáhla 250–300 cm (obr. 22), k prudkém poklesu došlo v roce 2010. Je výrazně vidět změny výšky sněhové pokrývky z let 2010–2021 ve srovnání s lety 2001–2009, jak je to znázorněné na obr. 22.

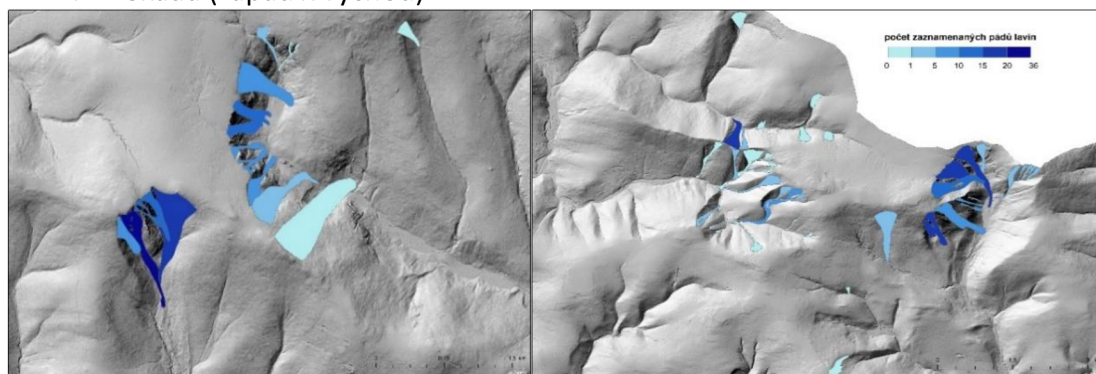
7.5 Porovnání změny dynamiky lavinové aktivity v posledních dekadách

Laviny jsou přírodní jevy vyskytující se v horských oblastech a představující významný problém již dlouhou dobu. Nedávné změny v západních lavinových drahách však lze připsat znatelnému dopadu změny klimatu. V historickém kontextu byly laviny kdysi v Krkonoších běžným jevem a hrály zásadní roli v přirozené rovnováze ekosystému. Tyto laviny byly vyvolány především nahromaděním sněhu a povětrnostními podmínkami. V posledních letech však byly

pozorovány změny ve vzorcích a intenzitě lavinové aktivity. Krkonoše jsou výrazně ovlivněny klimatickými změnami, konkrétně rostoucími teplotami a změnami ve srážkovém režimu. Tyto změny prostředí mají významný vliv na výskyt lavin v regionu. Jak se krajina stává stále nestabilnější, frekvence a závažnost lavin se zvyšuje, což představuje větší riziko pro bezpečnost.

K srovnání četnosti lavin dle lavinových drah byla využita data z dvou dekád, první dekáda 2001–2010 a druhá dekáda 2011–2021.

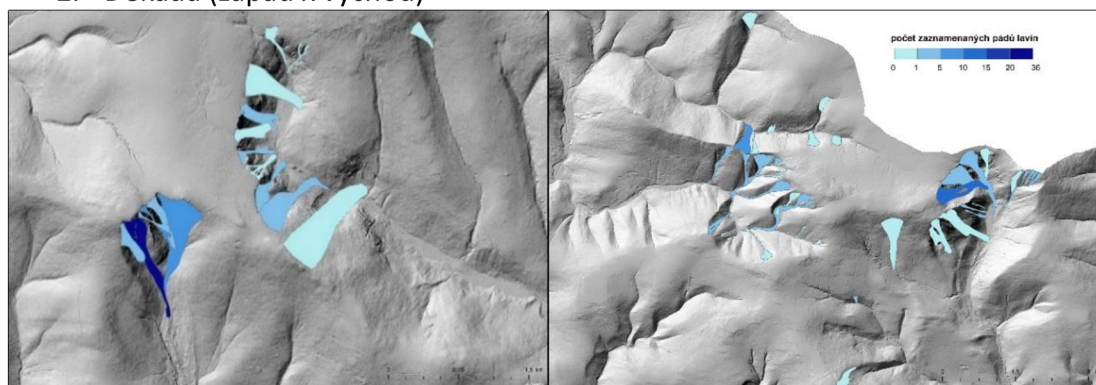
1. Dekáda (západ x východ)



Obrázek 22: Laviny (2001-2009)

Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

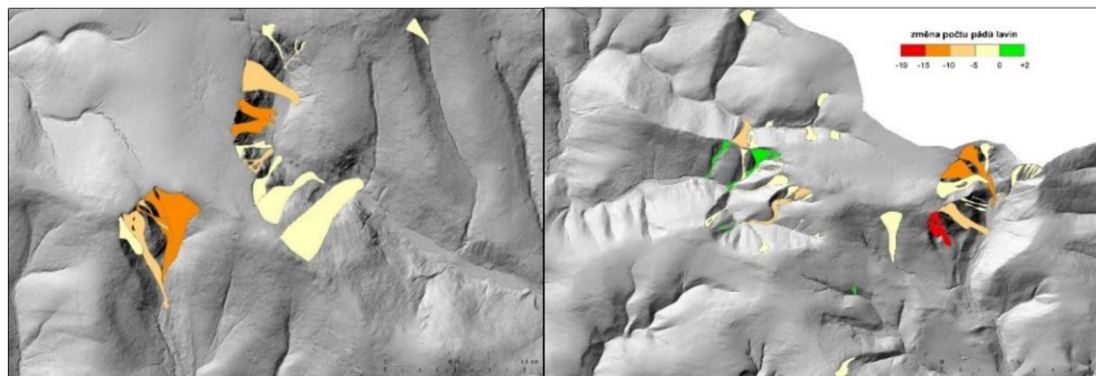
2. Dekáda (západ x východ)



Obrázek 23: Laviny (2011-2021)

Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

Změna



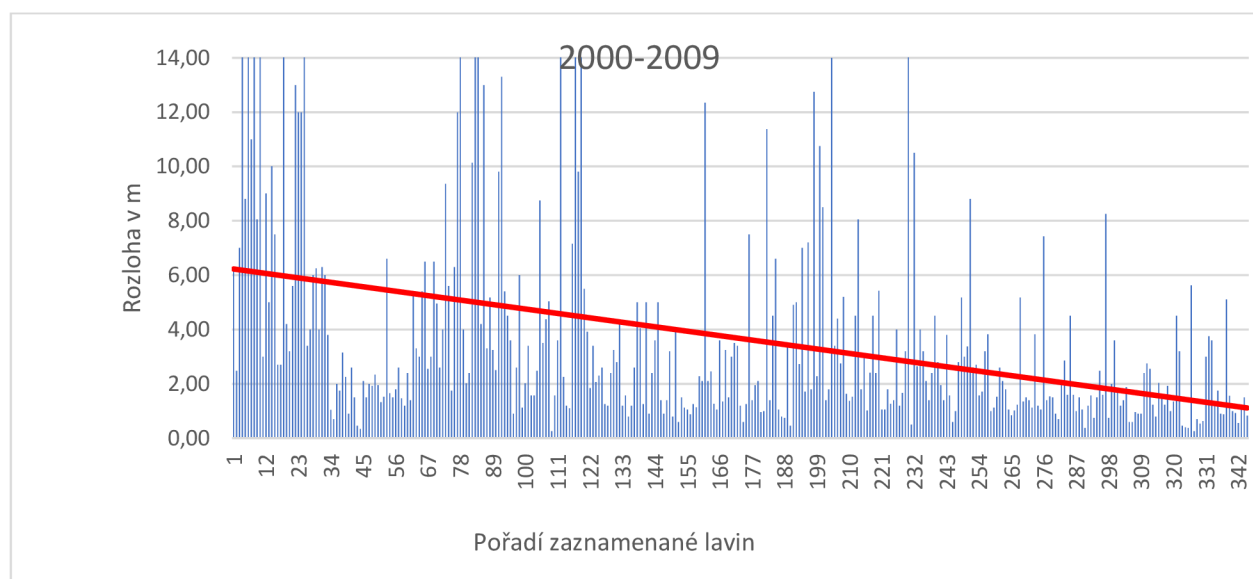
Obrázek 24: Změna v četnosti

Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

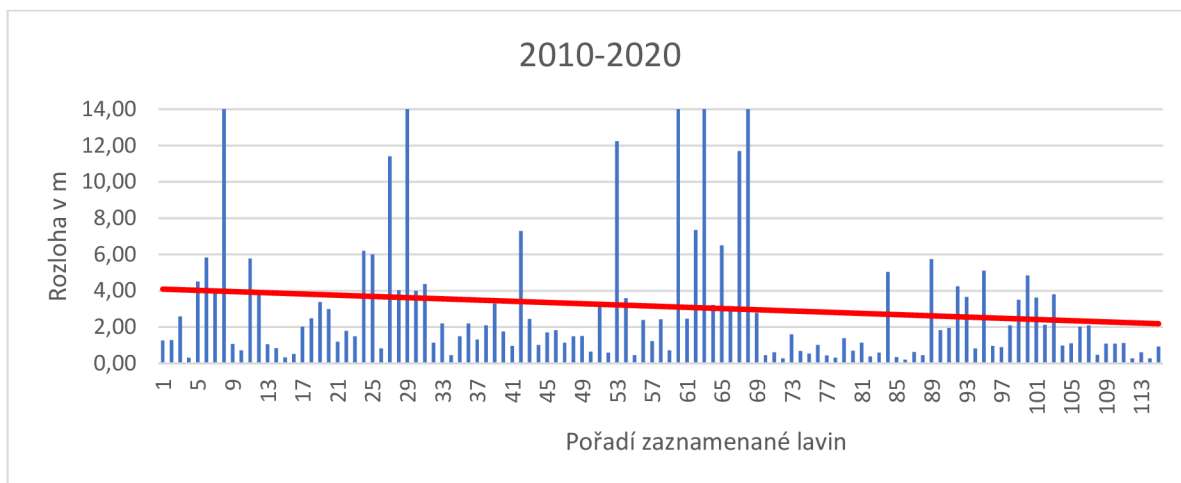
Dle (obr. 24) lze poukázat na to, že na západě došlo k průměrnému úbytku, a to -5,24 pádu na jednu dráhu a na východě k -2,26 pádu na jednu dráhu (obr. 24). Podle starších dat od Spusta a Kociánové (2000), od roku 1961–62 do roku 1999–2000 bylo na české straně zaznamenáno celkem 780 lavin. Z nich 152 končilo na alpské úrovni, 191 na horní hranici lesa a 437 v lese. To znamená, že 628 lavin, což představuje 80,5 % z celkového počtu, se stalo v zalesněných oblastech včetně ekotonu horní hranice lesa. Nadmořská výška, ve které laviny pronikají lesem, se pohybuje od 1300 m do 850 m. Nejnovější studie provedená na lavinové cestě Modrý důl, od Racka a Blahůta (2016), došla k závěru, že stávající lavinový modul RAMMS je vhodný pro simulaci deskových lavin v Krkonoších. Aplikace RAMMS v Krkonoších je relevantní, ale nelze ji přímo aplikovat, zejména s ohledem na četnost lavin. Přesné určení koeficientů tření hraje klíčovou roli při přesné klasifikaci tvaru a nadmořské výšky odtržení lavinové dráhy. Model RAMMS trvale poskytuje vysoce přesné výsledky.

7.6 Srovnání velikostních parametrů lavin dle dekád

Mezi běžně používané velikostní parametry v lavinovém výzkumu patří rozloha. V období 2000–2009, podle spojnice trendu, lze znázornit pokles rozlohy lavin (obr. 28). Ke změně lavinové oblasti v Krkonoších přispělo více faktorů. Za prvé nelze přehlédnout dopad změny klimatu na stabilitu sněhové pokrývky. Vyšší teploty a změněné srážky vedly ke změnám sněhových podmínek, čímž se zvýšila pravděpodobnost lavin. Dle (obr. 26) rozloha lavin v období 2010–2020 je menší než rozloha v první dekádě, následně docházelo postupně k prudkému snížení (obr. 25).



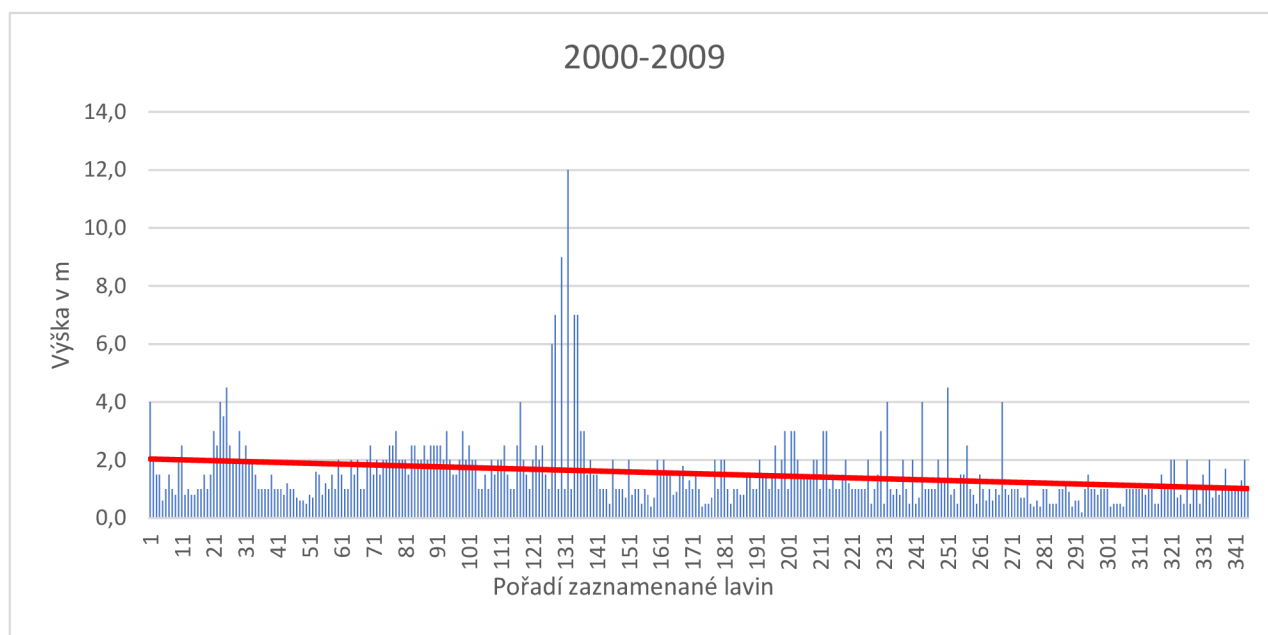
Obrázek 25. Rozloha lavin z období (2000-2009)
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování, 2024



Obrázek 26: Rozloha lavin z období (2010-2020)

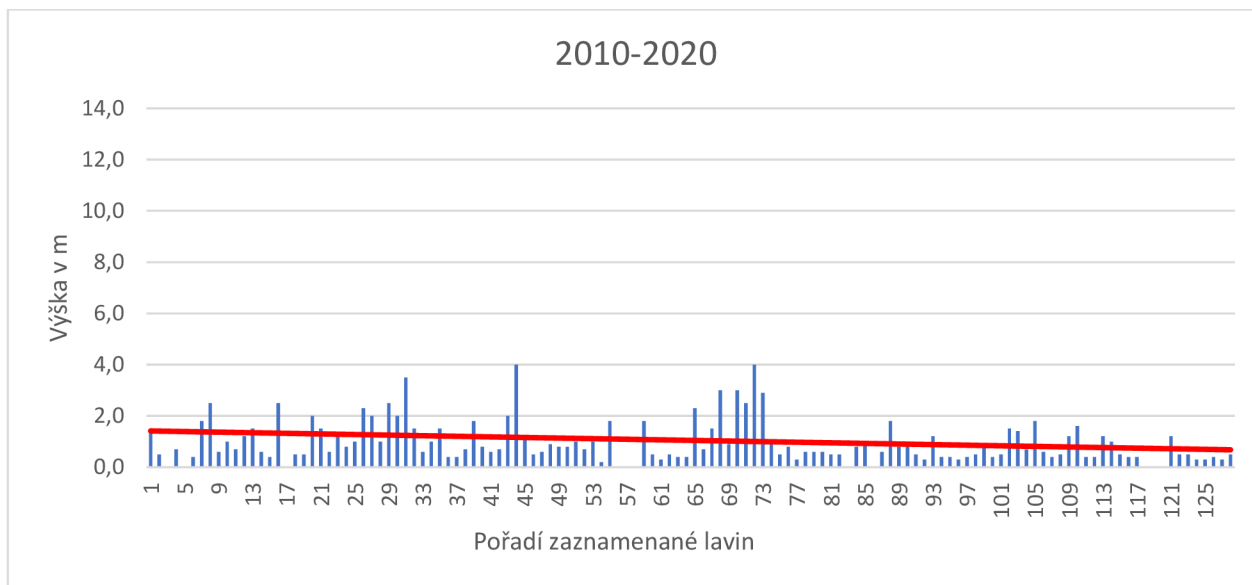
Pramen: Databáze KR NAP, vlastní zpracování, 2024

Další zásadní charakteristika je výška lavinového odtržení. V období 2000–2009 lavinová odtržení jsou skoro ve stejné výšce, ale v bodu 132 dochází k největšímu lavinovému odtržení, kde hodnota dosáhla 12 m (obr. 27). V období 2010–2020, lineární osa ukazuje pokles ve výšce lavinového odtrhu. Nejvyšší hodnota ohledně výšky byla kolem 4 m (obr. 28).



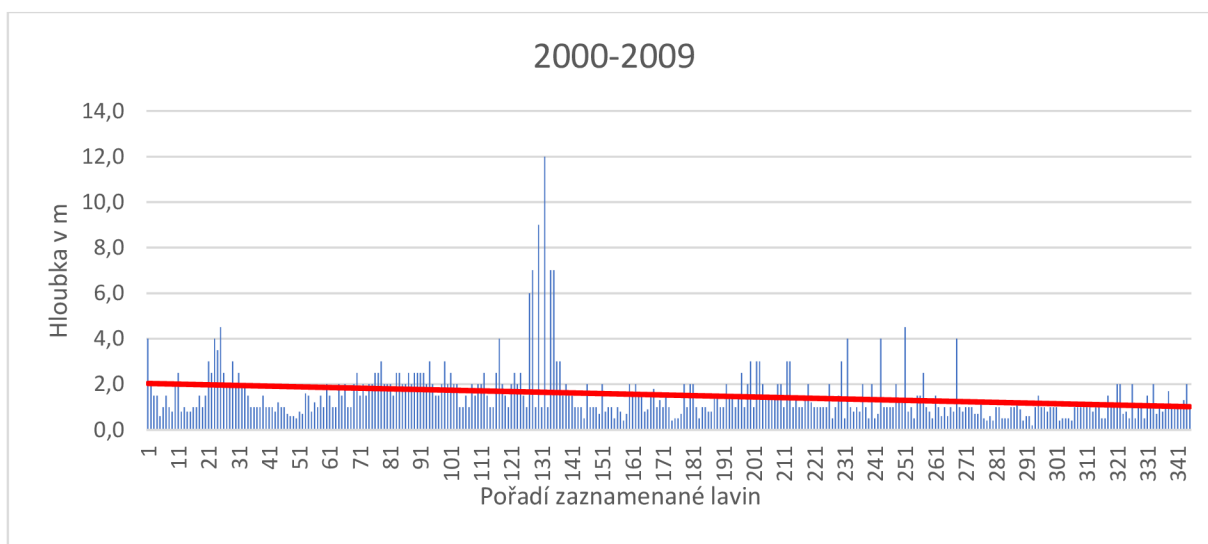
Obrázek 27: Výška lavinového odtrhu 2000-2009

Pramen: Databáze KR NAP, vlastní zpracování 2024

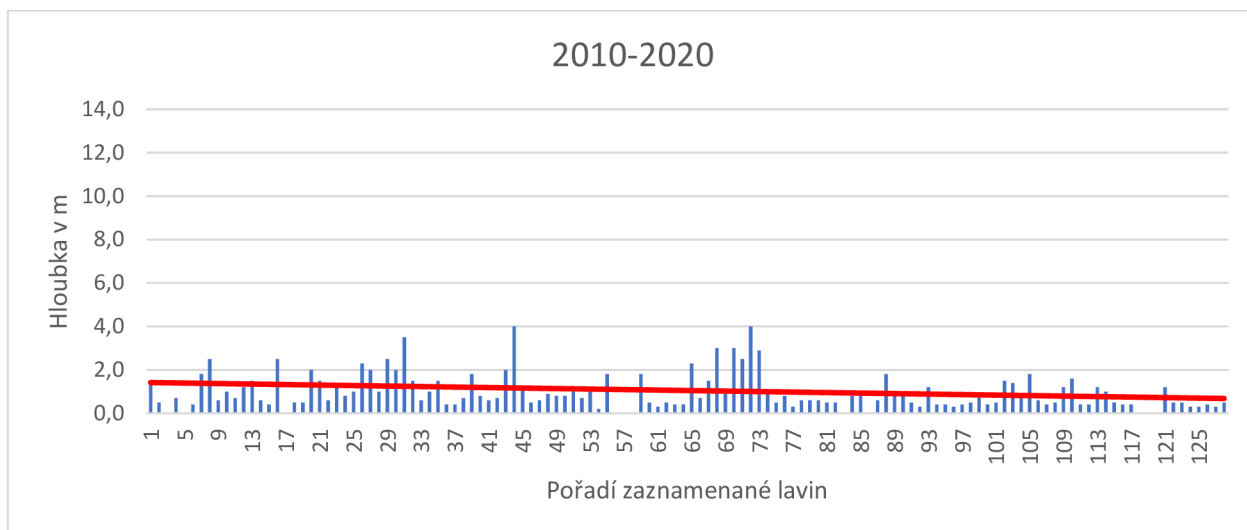


Obrázek 28: Výška lavinového odtrhu 2010-2020
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

Poslední charakteristika je hloubka lavinového nánosu, která hraje zásadní roli při určování závažnosti ničivých následků lavin. Hloubku lavinových nánosů v Krkonoších ovlivňuje několik faktorů, například strmé svahy a úzká údolí, které zvyšují pravděpodobnost větších, ničivějších lavin. Navíc sněhové podmínky v době laviny, včetně faktorů jako je stabilita sněhové pokrývky a obsah vlhkosti, mohou ovlivnit hloubku nánosu. Měřená data z Krkonošského národního parku popisují hloubku lavinových nánosů za období 2000–2009 a 2010–2020. Nejvyšší lavinový nános v 2000–2009 měl hloubku kolem 12 m (obr. 29). V druhé dekádě dosáhla nejvyšší hloubka 4 m a podle lineární osy docházelo k prudkému poklesu lavinového nánosu (obr. 30).



Obrázek 29: Hloubka lavinového odtrhu 2000-2009
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

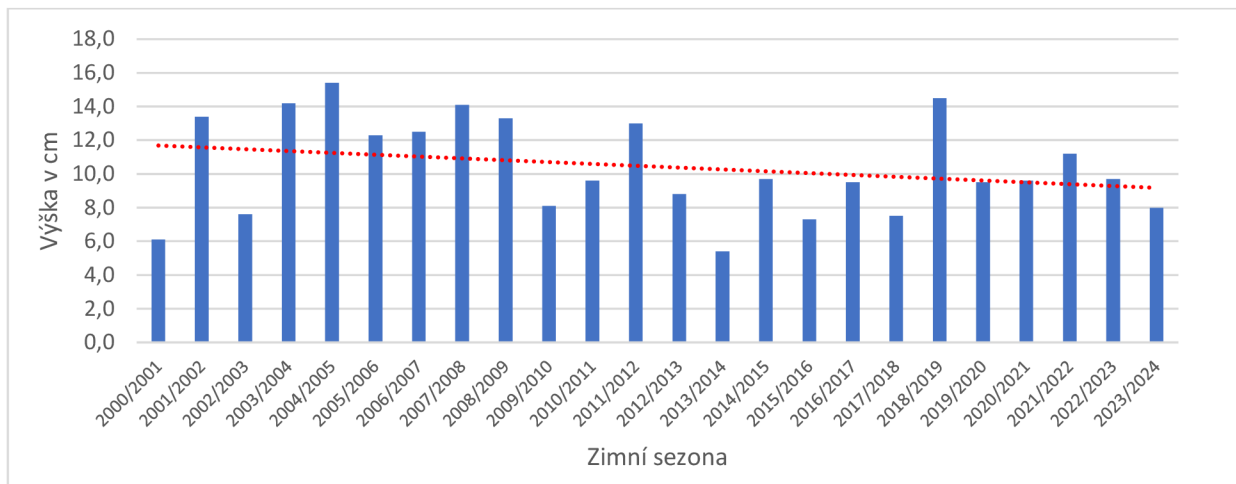


Obrázek 30: Hloubka lavinového nánosu z období 2010-2020
 Pramen: Databáze KRNP, vlastní zpracování 2024

7.7 Vývoj sněhu na sněhovém poli Mapy republiky

Změny sněhové pokrývky v Krkonoších mají velký vliv na ekosystémy regionu a lidské aktivity. Sněhová pokrývka v Krkonoších hrála historicky zásadní roli při udržování křehké rovnováhy zdejšího životního prostředí. V posledních letech však došlo v regionu k výraznému poklesu trvání a rozsahu sněhové pokrývky. Tento trend lze přičíst dopadu změny klimatu, která vedla ke zvyšování teplot a změně srážkových vzorců. V důsledku toho ubývá tradičních sněhových polí v Krkonoších.

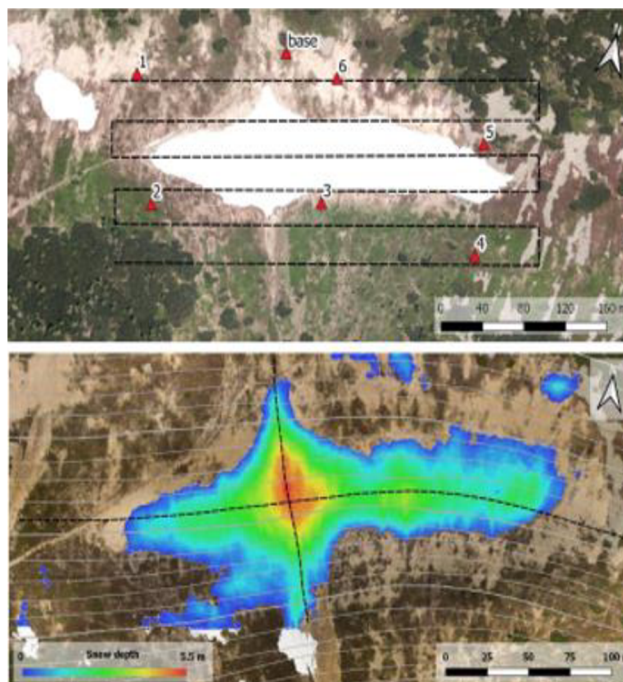
Sněhové pole zvané Mapa republiky na svazích Studniční hory v Krkonoších zažilo v letošní sezóně jedno z nejnižších zaznamenaných sněhových maxim za posledních dvacet let. Podle správy Krkonošského národního parku bylo naměřeno v zimní sezóně pouhých 8 m sněhu (Drahný 2024). Pokud jde o sněhové srážky, letošní zima byla výjimečně nevýrazná s vrstvou sněhu pouhých 8 m silnou, což z ní činí jednu z nejméně sněhových období za posledních 25 let zaznamenaných údajů. Letošní zima však přinesla vydatné deště a vyšší teploty. Oproti minulým zimám zaznamenaly Krkonoše znatelný pokles celkových sněhových srážek. I přes slibný začátek prosince se následné sněžení projevilo rychlým táním sněhu, ke kterému došlo mnohem dříve než v předchozích letech. Správa KRNP každý rok pravidelně měří výšku sněhu na Studniční hoře kvůli objasnění vývoje sněhové pokrývky na Mapě republiky.



Obrázek 31: Vývoj sněhové pokrývky v Studničním hoře
 Pramen: Databáze KRMAP, vlastní zpracování 2024

Podle naměřených dat nejvyšší množství sněhu byl naměřeno v roce 2004–2005, a to kolem 15,4 cm. V letech 2013–2014, bylo naměřené množství sněhu nejnižší kvůli výraznému zvyšování vlivu klimatických změn. V roce 2015 výška sněhu na Mapě republiky byla výrazně ovlivněna odtržení laviny velkého rozsahu. Od roku 2021–22 dochází ke snížení výšky sněhu, jak je znázorněné na obr. (31). V letech 2023–2024 dochází taktéž ke snížení výšky sněhu, a to kvůli vlivu El Niño, který má významný podíl na dynamiku sněhové pokrývky v Krkonoších prostřednictvím svého vlivu na srážky. Během událostí El Niño vedou změny ve vzorcích atmosférické cirkulace ke změně transportu vlhkosti, což má za následek změny v množství srážek v oblasti.

K mapování sněhových polí a sledování změn se používá A–O systém. Tento systém rozděluje sněhové pole na různé části, z nichž každá je označena jinými symboly označujícími rozsah sněhové pokrývky. Klíčové prvky na mapě, jako jsou různé odstíny modré představující různé hloubky sněhu, poskytují vizuální znázornění změn, ke kterým dochází ve sněhovém poli. Například tmavší odstíny modré mohou naznačovat silnější sněhovou pokrývku, zatímco světlejší odstíny naznačují oblasti řídnoucího sněhu, dle znázornění na obr. (32).



Obrázek 32: Ukázka výsledek měření výšky sněhu na sněhovém poli Mapa republiky

Pramen: GABRLÍK, P.; JANATA, P.; ŽALUD, L.; HARARIK, J., 2019: Towards Automatic UAS – based Snow – Field Monitoring for Microclimate Research. SENSORS 19 (8), P. 1-23, doi: 10. 3390 / s 19081945.

8 Závěr

Bakalářská práce se zabývá tématem klimatických změn a jejich projevů v Krkonoších se zaměřením na sněhovou pokrývku. Krkonoše a horské ekosystémy jako celek jsou velmi ovlivněny změnou klimatu. Průměrná teplota v Krkonoších stoupá a je doprovázena změnami ve srážkovém režimu, které způsobují pokles sněhové pokrývky hrající zásadní roli v horském ekosystému. Také vegetace v Krkonoších je výrazně ovlivněna klimatickými změnami s dalekosáhlými důsledky jako jsou posouvání vegetačních pásem, ohrožení endemické flóry a fauny a postupné eroze biodiverzity.

Krkonoše jako ikonické pohoří střední Evropy procházejí v současnosti výraznými proměnami. Mezi nejnápadnější znaky těchto změn patří zřetelný posun ve sněhové pokrývce. Transformace probíhající ve sněhové pokrývce jsou velmi významné. Historické záznamy i vědecké výzkumy jednoznačně dokazují, že sněhová pokrývka v Krkonoších prochází rychlými změnami. V delším období je patrný trend ke zkrácení trvání přetrvávající sněhové pokrývky a snížení celkového rozsahu akumulace sněhu. Dopad těchto změn na ekosystém je značný, neboť snižování sněhové pokrývky nepříznivě ovlivňuje život rostlin a živočichů i celkovou biodiverzitu Krkonoš. Některé druhy flóry a fauny jsou ohroženy a může dojít k poklesu jejich počtu nebo dokonce hrozbě vyhynutí.

Změny, které jsou prokazatelné v dynamice sněhové pokrývky, mají velký vliv na změnu polohy horní hranice lesa, důsledkem úbytku délky trvání a množství sněhu. Změna v horní hranici lesa má přímý dopad na složení rostlinného života v horských oblastech. To má za následek proliferaci nížinných a boreálních druhů, zatímco některé vysokohorské rostliny mohou být nuceny migrovat do ještě větších výšek. Pohyb horní hranice lesa směrem k vyšším

nadmořským výškám v horách vede ke zvýšenému riziku eroze a degradace půdy. Absence ochranné vrstvy v důsledku absence sněhu může zintenzivnit erozní procesy. Dle výsledků obsažených v praktické části, je zřejmé, že rostoucí teploty a změněné vzorce srážek vedly ke změnám stability sněhové pokrývky, čímž se zvýšila pravděpodobnost lavin v těchto oblastech.

Praktická část mé bakalářské práce byla věnována srovnání maximální sněhové pokrývky na hřebenových a údolních stanicích. Rozdíly v akumulaci sněhu jsou patrné napříč různými oblastmi Krkonoš. Údaje odhalují značné rozdíly v maximální výšce sněhu v různých oblastech. Je pozoruhodné, že vyšší nadmořské výšky podél horského hřebene obvykle vykazují větší hloubky sněhu ve srovnání s nižšími nadmořskými výškami. V průběhu zimní sezóny dochází ke kolísání maximální výšky sněhu. Sníh má tendenci tát rychleji v oblastech s nižší nadmořskou výškou, zatímco ve vyšších polohách může sněhová pokrývky přetrvávat delší dobu.

Analýza změn teplot a srážek mezi hřebenovými a údolními stanicemi v Krkonoších poskytuje cenné poznatky o klimatických podmínkách a jejich vlivu na dynamiku sněhové pokrývky v této horské oblasti. Teplotní rozdíly jsou patrné mezi hřebenovými stanicemi a údolními stanicemi, přičemž hřebenové stanice obvykle vykazují nižší průměrné teploty. Tento rozpor lze přičíst především vlivu nadmořské výšky a orientace svahu. Mezi hřebenovými a údolními stanicemi je rozdíl ve srážkách. Hřebenové stanice mají tendenci zaznamenat vyšší srážky zejména ve formě sněhu, zatímco údolní stanice mohou být vystaveny většímu množství srážek. V Krkonoších vlivem zvýšení průměrných teplot dochází k rychlejšímu tání sněhu, prodloužení vegetačního období a změnám ročních období. Důležité jsou také změny srážkových vzorců, například zvýšení srážek v některých regionech, které se vyznačují intenzivními lijáky, zatímco sněžení může být méně časté.

Analýza dynamiky lavinové aktivity v Krkonoších za poslední dvě desetiletí poskytuje důležité poznatky o vývoji tohoto extrémního jevu v horské oblasti. Četnost lavinových událostí v Krkonoších se za poslední dvě desetiletí změnila. Existuje trend častějších lavin, což může být důsledkem kombinace klimatických faktorů. Byla také pozorována zvýšená variabilita lavinových událostí. To znamená, že frekvence, intenzita a velikost lavin se může mezi sezónami značně lišit. Změny teplot a srážkové události jsou důležitými faktory ovlivňujícími lavinovou aktivitu. Například několik dní teplot nad bodem mrazu po sněžení může způsobit vytvoření nestabilní vrstvy v půdě a zvýšit riziko lavin. Sněhové pole zvané Mapa republiky na svazích Studniční hory v Krkonoších zažilo v letošní sezóně jedno z nejnižších zaznamenaných sněhových maxim za posledních dvacet let. Podle správy Krkonošského národního parku bylo v zimní sezóně naměřeno jen osm metrů sněhu. K mapování sněhových polí a sledování změn a pokrytí se používá A-O systém. Tento systém rozděluje sněhové pole na různé části, z nichž každá je označena jinými symboly označujícími rozsah sněhové pokrývky. Klíčové prvky na mapě, jako jsou různé odstíny modré, představující různé hloubky sněhu, poskytují vizuální znázornění změn, ke kterým dochází ve sněhovém poli. Tmavší odstíny modré mohou například indikovat silnější sněhovou pokrývky, zatímco světlejší odstíny označují oblasti řídnoucího sněhu.

9 Summary

My bachelor 's thesis mainly describes the basic concepts and impacts of climate change in the Krkonoše Mountains, where there is an increase in the average temperature and changes in the precipitation regime. These changes resulted in the reduction of snow cover, which plays a vital role in the mountain ecosystem. Vegetation in the Krkonoše Mountains is significantly affected by climate change, which leads to potentially large-scale consequences. The consequence of these changes is the shifting of vegetation zones, the threat of endemic flora and fauna, and the gradual erosion of biodiversity.

Snow cover in the Krkonoše Mountains plays a vital role in various aspects of this mountain region. The snow cover in the Krkonoše Mountains experiences significant fluctuations during the seasons. It begins its creation during the autumn months, peaks in intensity in winter and gradually recedes with the arrival of spring and summer. The condition of the snow cover is greatly influenced by the temperature. Higher temperatures accelerate the melting process, while lower temperatures prolong it.

The amount and type of precipitation affects the quality and quantity of snow accumulation. A significant amount of snow contributes to its depth, while rain falling on existing snow accelerates the melting process. Snow erosion can occur due to strong winds, resulting in uneven distribution and formation of snowdrifts. In recent years, there has been an increase in the occurrence of avalanches in the Krkonoše Mountains. This change in frequency could potentially be attributed to the impact of climate change on snowpack stability. Not only are avalanches occurring more frequently, but there is also an increase in the variability of each individual event. As a result, their behavior becomes less predictable and may vary depending on specific conditions. The occurrence of avalanches can be attributed to a number of factors. Persistent snow conditions can occur as a result of climate fluctuations, including rising temperatures and changes in precipitation.

10 Seznam použité literatury

ADLER, C., HUGGEL, C., ORLOVE, B., & NOLIN, A. (2019): *Climate change in the mountain cryosphere: Impacts and responses. Regional Environmental Change 19. Springer Link [online]. pages 1225–1228. [cit. 2024-04-30]. URL: <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6>*

BŘEZINA, S., HRÁZSKÝ, Z., KRAUSE, D., MATERNA, J., ČEJKOVÁ, A., JOSEFOVIČKOVÁ, A., MIKSLOVÁ, K., HARČARIKOVÁ, L., HORÁKOVÁ, V., & ZAVADIL, V. (2023): *Alpínské bezlesí Krkonoš, české rodinné stříbro. Ochrana přírody [online]. [cit. 2024-05-04]. URL: <https://www.casopis.ochranaprirody.cz/z-nasi-prirody/alpinske-bezlesi-krkonos-ceske-rodinne-stribro/>*

ČERVINKA, J. (2011): *Druhové změny vegetace alpínských vřesovišť pod vlivem globálních změn prostředí. Bakalářská práce, Katedra ekologie a životního prostředí, Univerzita Palackého v Olomouci.*

DOBŘANSKÝ, M. (2010): *Mapování rozsahu sněhové pokrývky z dat MODIS. Bakalářská práce, Geografický ústav, Masarykova univerzita.*

DRAHNÝ, R. (2024): *Mapa republiky v Krkonoších má kolem osmi metrů sněhu. Novinky.cz [online]. [cit. 2024-05-03]. URL: <https://www.novinky.cz/clanek/domaci-mapa-republiky-v-krkonosich-ma-kolem-osmi-metru-snehu-40465493>*

DRÁPELOVÁ, K. (2020): *Sucho a jak proti němu bojovat. Asociace pro mezinárodní otázky (AMO) pro potřeby XXVI. ročníku Pražského studentského summitu [online]. [cit. 2024-05-03]. URL: <https://www.studentsummit.cz/wp-content/uploads/2020/11/Sucho.pdf>*

FANTA, J. a kol. (1969): *Příroda Krkonošského národního parku. Lesnictví a myslivost. Nakl. SZN, Praha.*

FLOUSEK, J. (2019): *Krkonoše a klimatická změna. Ochrana přírody [online]. [cit. 2024-05-03]. URL: <https://www.casopis.forumochranyprirody.cz/uploaded/magazine/pdf/21-krkonose-a-klimaticka-zmena.pdf>*

FLOUSEK, J. a kol. (2007): *Krkonoše. Příroda, historie, život. Nakl. Miloš Uhlíř – Baset, Praha. ISBN 978-80-7340-104-7*

HAVLÍK, R. (2018): *Právní prostředky k zamezení vysychání krajiny. Diplomová práce, Katedra práva životního prostředí a pozemkového práva, Masarykova univerzita.*

HŮRKOVÁ, L. (2022): *Srovnání reakcí Evropské unie a vybraných zemí východní Asie na problematiku globálního oteplování. Bakalářská práce, Katedra Politologie a mezinárodních vztahů, Vysoká škola CEVRO Institut.*

IRANNEZHAD, M., RONKANEN, A. K., & MALEKIAN, A. (2022): *Climate impacts on snowpack dynamics. Frontiers in Earth Science [online]. [cit. 2024-04-30]. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2022.970981/full>*

JANÁSKOVÁ, B. (2006): *Ukládání a odbourávání sněhu ve vrcholové oblasti východních Krkonoš. Opera Corcontica 43: str. 57–80.*

JENÍK, J. (1961): *Alpínská vegetace [Vysokých Sudet]: teorie anemo-orografických systémů. – Nákladem ČSAV, Praha.* KLIVANOVÁ, L. (2013): *Prostorové rozložení sněhové pokrývky v alpínském bezlesí na příkladu vrcholové oblasti východních Krkonoš. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze.*

KOCIÁNOVÁ, M., & STURSOVÁ, H. (2008): *Jevy spojené s odtáváním sněhové pokrývky v tundrové zóny Krkonoš. Opera Corcontica 45: str. 13.*

KOCIÁNOVÁ, M., SPUSTA, V. (2000): *Vliv lavinové aktivity na kolísání horní hranice lesa v Krkonoších. Opera Corcontica 37: str. 473–480.*

KOLÁŘ, V. (2014): *Vzestup horní hranice lesa jako důsledek růstu teplot a změn využití půdy. Bakalářská práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Univerzita Karlova v Praze.*

KOŽÍŠEK, M. (2020): Dlouhodobé změny výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu na vybraných horských stanicích v Česku. Bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze.

KRNAP (2010): Přírodní poměry – Geologie. Správa Krkonošského národního parku [online]. [cit. 2024-05-05]. URL: <https://old.krnep.cz/geologie/>

KRNAP (2024): Arkto-alpínská tundra. Správa Krkonošského národního parku [online]. [cit. 2024-05-05]. URL: <https://www.krnep.cz/priroda/fenomeny/arkto-alpinska-tundra/>

LAYBOURN-PARRY, J., TRANTER, M., & HODSON, A. J. (2012): *The ecology of snow and ice environments*. Oxford University Press, Oxford.

LINDA, T. (2012): Klimatické změny ve světě: příčiny, dopady a evropské přístupy. Diplomová práce, Katedra ekonomických a sociálních věd, Bankovní institut vysoká škola Praha.

LÖFFLER, J., PAPE, R. (2012): *Climate change, land use conflicts, predation and ecological degradation as challenges for Reindeer Husbandry in Northern Europe: What do We Really Know After Half a Century of Research?* AMBIO 41: pages 421–434

MAREK, M. V. a kol. (2022): *Klimatická změna – příčiny, dopady a adaptace*. Nakl. Academia, Praha. ISBN 978-80-200-3362-8.

METELKA, L., TOLASZ, R. (2019): *Klimatické změny: fakta bez mýtů*. Vyd. Univerzita Karlova v Praze, Centrum pro otázky životního prostředí, Praha. ISBN 978-80-87076-13-2

MOTT, R., VIONNET, V., GRÜNEWALD, T. (2018): *The Seasonal Snow Cover Dynamics: Review on Wind-Driven Coupling Processes*. *Frontiers in Earth Science* [online]. [cit. 2024-04-30]. URL: https://www.researchgate.net/publication/329370177_The_Seasonal_Snow_Cover_Dynamics_Review_on_Wind-Driven_Coupling_Processes

NEGI, G. C. S., SAMAL, P. K., KUNYAL, J. C., KOTHYARI, B. P., SHARMA, R. K., & DHYANI, P. P. (2012): *Impact of climate change on the western Himalayan mountain ecosystems: an overview*. *Tropical ecology*, 53(3), pages 345–356.

OSTRÝ, V., JEFREMOVA, M., RUPRICH, J. (2015): *Globální oteplování, změna klimatu a bezpečnost potravin*. *Hygiena a technologie potravin XLV. Lenfeldovy a Höklovy dny. Veterinární a farmaceutická univerzita Brno*.

PRICE, M. F., & HASLETT, J. R. (1995): *Climate change and mountain ecosystems. Mountains at Risk: Current Issues in Environmental Studies*. Manohar, New Delhi, pages 73–97.

RACEK, O., BLAHŮT, J. (2016): *Lavina v Modrém dole v Krkonoších z února 2015 rekonstruovaná pomocí numerického modelu RAMMS*. *Opera Corcontica* 53: str. 95–108.

RÁČKOVÁ, M. (2009): *Vliv globálních změn prostředí na minerální složení rostlinné biomasy v alpínských vřesovištích*. Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci.

RIEDL, V. (2010): *Možné dopady klimatických změn na Evropu*. Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci

SMOLÍKOVÁ, J. (2009): *Kamenná moře v Krkonoších*. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze.

- SPUSTA V. & KOCIÁNOVÁ M. (1998): Lavinový katastr české části Krkonoš v období 1961/62–1997/98. *Opera Corcontica* 35: str. 202.
- SPUSTA V. & KOCIÁNOVÁ M. (2003): Ukládání sněhu na závětrných svazích české strany Krkonoš (tundrová zóna). *Opera Corcontica* 40: str. 87–104.
- STEHR, A., & AGUAYO, M. (2017): Snow cover dynamics in Andean watersheds of Chile (32.0–39.5° S) during the years 2000–2016. *Hydrology and Earth System Sciences: pages* 5111–5126.
- STEJSKAL, L. (2012): Změna klimatu a její dopady: hlavní hrozba 21. století. Trendy, rizika a scénáře bezpečnostního vývoje ve světě, Evropě a ČR–dopady na bezpečnostní politiku a bezpečnostní systém ČR. *Klimatickakoalice.cz* [online]. [cit. 2024-05-03]. URL:https://klimatickakoalice.cz/images/dokumenty/sbp_zmena_klimatu_a_jeji_dopady.pdf
- SÝKORA, B. a kol. (1983): *Krkonošský národní park*. Nakl. SZN, Praha.
- THAPA, S., ZHANG, F., ZHANG, H., ZENG, C., WANG, L., C.-Y., THAPA, A., & NEPAL, S. (2021): Assessing the snow cover dynamics and its relationship with different hydro-climatic characteristics in Upper Ganges river basin and its sub-basins. *Science of the Total Environment: pages* 462–463
- TREML, V., DOBÍHAL, M., KUPKOVÁ, L., LYSÁK, J., & POTŮČKOVÁ, M. (2020): Horní hranice lesa v Krkonoších-jaké faktory podmiňují její změny v čase? *Opera Corcontica* 57: str. 5–18.
- VÍTKOVÁ, M., VÍTEK, O., & MÜLLEROVÁ, J. (2012): Antropogenní změny vegetace nad horní hranicí lesa v Krkonošském národním parku s důrazem na vliv turistiky. *Opera Corcontica* 49: str. 5–30.
- VRBA, M. & SPUSTA, V. (1991): Lavinový katastr Krkonoš. *Opera Corcontica* 28: str. 47-58.
- ZÁKRAVSKÁ, Š. (2011): *Prostorový pattern stromů v ekotonu horní hranice lesa*. Bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze.
- ZEIDLER, M. (2016): Climatic Shifts of Snow Cover Parameters and their Effect on Alpine Vegetation. *Životné prostredie* 50, 2: pages 87–89.
- ZHANG, T. (2005): Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics* 43.
- ZUZÁKOVÁ, E. (2019): Změny sněhové pokrývky na českých horách v posledních 50 letech. Bakalářská práce, Ústav pro životní prostředí, Univerzita Karlova v Praze

11 Seznam příloh

Obrázek 1: Model A–O systému v údolí Bílého Labe	20
Obrázek 2: Počet lavin v jednotlivých sezonách 1961/62-2002/03.....	25
Obrázek 3: Přehledová mapa Krkonoš.....	27
Obrázek 4: Maximální výška sněhu na stanici Harrachov.....	29
Obrázek 5: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Rokytnice nad Jizerou	30
Obrázek 6: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Pec pod Sněžkou	30
Obrázek 7: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Horní Maršov	31
Obrázek 8: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Labská Bouda.....	32
Obrázek 9: Maximální výška sněhové pokrývky na stanici Luční Bouda	32
Obrázek 10: Měsíční teplota vzduchu na stanici Harrachov.....	33
Obrázek 11: Měsíční teplota vzduchu na stanici Pec pod Sněžkou	34
Obrázek 12: Měsíční teplota vzduchu na stanici Labská Bouda	34
Obrázek 13: Měsíční teplota vzduchu na stanici Luční Bouda.....	35
Obrázek 14: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Harrachov	36
Obrázek 15: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Pec pod Sněžkou	36
Obrázek 16: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Luční Bouda	37
Obrázek 17: Maximální měsíční úhrn srážek na stanici Labská Bouda.....	38
Obrázek 18: Výškový profil ploch na transektu	39
Obrázek 19: Maximální výška sněhu 2001–2010	39
Obrázek 20: Maximální výška sněhové pokrývky 2011–2021	40
Obrázek 21: Naměřená data na transektu S-J	40
Obrázek 22: Laviny (2001-2009)	41
Obrázek 23: Laviny (2011-2021)	41
Obrázek 24: Změna v četnosti	41
Obrázek 25: Rozloha lavin z období (2000-2009)	42
Obrázek 26: Rozloha lavin z období (2010-2020)	43
Obrázek 27: Výška lavinového odtrhu 2000-2009.....	43
Obrázek 28: Výška lavinového odtrhu 2010-2020.....	44
Obrázek 29: Hloubka lavinového odtrhu 2000-2009.....	44
Obrázek 30: Hloubka lavinového nánosů z období 2010-2020	45
Obrázek 31: Vývoj sněhové pokrývky v Studničním hoře.....	46
Obrázek 32: Ukázka výsledků měření výšky sněhu na sněhovém poli Mapa republiky	47