

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie



Zuzana Eštoková

Snehové sucho a jeho vplyv na zimný a jarný odtok na Šumave

Snow drought and its influence on winter and spring runoff in the
Sumava Mts.

Bakalářská práce

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

Praha, 2025

Zadaní bakalářské práce

Téma práce

Sněhové sucho a jeho dopad na zimní a jarní odtok na Šumavě

Motivace

Zvýšení teploty vzduchu má mimo jiné za následek změny v zásobách vody ve sněhu v horských oblastech. Sníh přitom hraje důležitou úlohu v doplňování zásob podzemních vod a generování odtoku v teplé části roku. Nedostatek sněhových zásob bývá způsoben buď nedostatkem srážek v zimním půlroce nebo vysokými zimními teplotami vzduchu nebo kombinací obojího. Zároveň několik posledních let patřilo k těm sněhově chudým, což přispělo ke změnám odtoku jak během zimy a jara, tak do určité míry i v létě.

Cíle práce

- 1) Zhodnocení současného stavu výzkumu týkajícího se sněhového sucha a jeho vztahu k variabilitě klimatu
- 2) Analýza klimatologických a hydrologických dat z experimentálních povodí PřF UK na Šumavě s ohledem na meziroční variabilitu sněhové pokrývky a charakteristik klimatu

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

První část práce bude tvořena zhodnocením současného stavu výzkumu týkajícího se variability sněhové pokrývky, jejího nedostatku (sněhového sucha) a možný vliv na odtok z povodí. Druhá část práce bude tvořit analýza sněhových zásob na Šumavě na základě dat z měřicí sítě stanic katedry FGG PřF UK. Analyzovány budou meteorologické příčiny ovlivňující meziroční variabilitu sněhových zásob. Mezi hodnocené parametry mohou patřit maximální vodní hodnota sněhu (SWE), výška sněhu, doba trvání sněhové pokrývky, úhrn pevných srážek nebo teplota vzduchu.

Datum zadání: 28.11. 2024

Jméno studenta: Zuzana Eštoková

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: Michal Jeníček

Podpis vedoucího práce:

Prehlásenie:

Prehlasujem, že záverečnú prácu spracovala samostatne a uviedla všetky použité informačné zdroje a literatúru. Táto práca ani jej podstatné časti nebola predložená k získaniu iného alebo rovnakého akademického titulu.

V Prahe, 29.4. 2025

.....

Zuzana Eštoková

Pod'akovanie:

Rada by som pod'akovala vedúcemu práce RNDr. Michalu Jeníčkovi, Ph.D. za venovaný čas a rady pri písaní práce a mojej rodine za podporu.

Abstrakt

Snehové sucho je v súčasnosti veľmi aktuálne téma mnohých odborných štúdií, dalo by sa zjednodušene charakterizovať ako nezvyčajný úbytok snehovej pokrývky, ktorý má v chladných oblastiach značné hydrologické a socioekonomické dopady. Hlavným cieľom tejto práce bolo zhodnotenie súčasného stavu výskumu týkajúceho sa snehového sucha a jeho vzťahu k variabilite klímy a analýza chladných období zím 2016-2024. Využitie dát boli získaných zo staníc Katedry fyzickej geografie a geológie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Karlovej a Českého hydrometeorologického ústavu na Šumave s ohľadom na medziročnú variabilitu snehovej pokrývky a charakteristiky klímy. Bakalárska práca je rozdelená do dvoch častí. Prvá časť práce je tvorená rešeršou prevažne zahraničnej literatúry, ktorá skúma danú problematiku snehového sucha, jeho rôznych typov, vplyv na odtok a budúce zásoby vody. V druhej časti sú predstavené výsledky analýzy, ktoré vychádzajú z poskytnutých dát. V práci bola na zhodnotenie daných chladných období využitá klasifikácia snehového sucha podľa (Dierauer, Allen, a Whitfield 2019). Výsledky preukázali výskyt teplého snehového sucha v chladnom období 2019-2020 a 2022-2023. Na zhodnotenie miery sily vzťahu medzi pozorovanými charakteristikami bol využitý Spearmanov korelačný koeficient. Analýza vplyvu teploty vzduchu a úhrnu zrážok nepreukázali jednoznačnú dominantnú premennú vplývajúcu na snehové charakteristiky. Napriek tomu, tieto výsledky naznačujú všeobecný vzťah medzi pozorovanými charakteristikami, pričom teplota sa ukazuje byť dominantným faktorom ovplyvňujúcim odtok za pozorované chladné obdobia.

Kľúčové slová: sneh, snehové sucho, variabilita klímy, odtok

Abstract

Snow drought is currently a hot topic in many scientific studies. It can be characterized as an unusual loss of snow cover with significant hydrological and socio-economic impacts in cold regions. The main goal of this work was to evaluate the current state of research on snow drought and its relationship to climate variability, as well as to analysing the cold period of winters from 2016 to 2024. The data used were obtained from weather stations operated by the Department of the physical geography and geoecology of the Faculty of Sciences of the Charles University and by the Czech Hydrometeorological Institute in the Bohemian Forest region (Sumava) with respect to inter-annual variability of snow covet and climate characteristics. This bachelor's thesis is divided into two parts. The first part consists of a review of mainly foreign literature, which examines the issue of snow drought, its different types and its impact on runoff and future water supplies. The second part presents the results of the analysis based on the provided data. In this work, the snow drought classification of (Dierauer, Allen and Whitfield 2019) was used to evaluate the given cold seasons. The results revealed the presence of warm snow drought during the cold seasons 2019-2020 and 2022-2023. Spearman's rank correlation coefficient was used to assess the strength of the relationship between the observed characteristics. Analysis of the influence of air temperature and precipitation did not reveal clear dominant variable influencing snow characteristics. Nevertheless, these results suggest a general relationship between the observed characteristics, with temperature proving to be the dominant factor influencing runoff during the observed cold periods.

Key words: snow, snow drought, snow, climate variability, runoff

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Snehová pokrývka.....	10
2.1. Vývoj snehovej pokrývky	10
2.2. Faktory ovplyvňujúce snehovú pokrývku	11
2.3. Dôležitosť snehovej pokrývky	12
3. Sezónna variabilita snehu	13
3.1. Snehové sucho.....	13
3.2. Príčiny snehového sucha	14
3.3. Typy snehového sucha	15
4. Dopad snehového sucha.....	17
4.1. Obvyklý odtok zo snehu.....	18
4.2. Dopad snehového sucha na odtok	18
4.3. Dopad na budúce zásoby vody.....	19
5. Dáta a metódy spracovania	20
5.1. Fyzicko-geografická charakteristika záujmového územia	20
5.2. Vstupné dáta.....	25
5.3. Pozorované charakteristiky	26
5.4. Spracovanie dát a využité metódy.....	26
5.4.1. Normalita dát.....	26
5.4.2. Spearmanov korelačný koeficient	27
5.4.3. Klasifikácia snehového sucha podľa Dierauer, Allen a Whitfield (2019)	27
6. Výsledky	28
6.1. Zhodnotenie pozorovaných zím	28
6.2. Faktory ovplyvňujúce pozorované charakteristiky	29
6.3. Identifikácia snehového sucha	34
7. Diskusia.....	35
7.1. Diskusia použitých dát a metód	35
7.1.1. Vstupné dáta.....	35
7.1.2. Pozorované charakteristiky	36
7.1.3. Využité metódy	36
7.2. Diskusia výsledkov	37
8. Záver	40
9. Zdroje.....	41
9.1. Literatúra	41

9.2.	Dátové zdroje	44
9.3.	Zoznam obrázkov a tabuliek	45

1. Úvod

Sneh je dôležitý klimatický prvok ovplyvňujúci prírodné prostredie aj ľudskú činnosť. Výskyt snehovej pokrývky je predpokladom pre vytvorenie dostatočného množstva povrchovej aj podzemnej vody, kladne pôsobí na rastlinný kryt ako jeho tepelná izolácia, vysokou mierou odrazivosti (albedo) zvyšuje intenzitu odrazeného žiarenia, je základným faktorom zimnej rekreácie (Tolasz et al. 2007). Snehová pokrývka má významný vplyv na vodné zdroje a je dôležitým zdrojom pitnej vody pre takmer jednu pätinu svetovej populácie. Funguje teda ako prirodzená zásobáreň, ktorá uchováva vodu až do období s vyššími teplotami (Edwards, Scalenghe, a Freppaz 2007). Výskyt snehových zrážok v oblastiach väčšinou závisí na mnohých geografických a klimatických faktoroch: zemepisná šírka, zemepisná výška, vzdialenosť od hlavných vodných plôch a charakter regionálnej cirkulácie vzduchu. Zemepisná šírka a zemepisná výška z veľkej časti ovládajú teplotný režim v regiónoch a rozhodujú, kde je dosť chladno aby sa objavili snehové zrážky (DeWalle a Rango 2008).

Stredná Európa, ktorá sa nachádza v miernom teplotnom pásme, typicky zažíva sezónne zmeny hydroklimatických premenných. V chladnom období sa v horských oblastiach vyskytujú nízke teploty a akumulácia snehu. Tieto faktory majú veľký vplyv na horskú snehovú pokrývku, ktorá počas chladných období dočasne zadržiava veľké množstvo vody a pri jarnom topení je kľúčovým zdrojom zásobovania riek v nížinách na jar a leto, čo je dôležité v obdobiach s malým množstvom zrážok, taktiež je zásobárňou podzemnej vody, ktorá má v letnom období takisto vplyv na odtok. Avšak v posledných desaťročiach došlo k poklesu snehovej pokrývky v horských oblastiach Európy a Severnej Ameriky (Blahušíaková et al. 2020; Nedelcev a and Jenicek 2021). Nastáva všeobecne pokles všetkých hodnôt charakteristiky snehovej pokrývky, znižuje sa počet dní so snehovou pokrývkou aj počet dní, kde výška snehovej pokrývky presahuje určité hodnoty, znižujú sa sumy výšky nového snehu aj mesačné a sezónne maximá výšky. Horská snehová pokrývka je veľmi citlivá na teplotu vzduchu, reakcia snehu na zvýšenie teploty vzduchu však nie je jednoznačná, čo má za následok veľkú variabilitu medzi rôznymi oblasťami a nadmorskými výškami s rôznou klímou (Jenicek et al. 2021; Tolasz et al. 2007).

Hlavným cieľom tejto práce bolo zhodnotenie súčasného stavu výskumu týkajúceho sa snehového sucha, jeho vzťahu k variabilite klímy a vplyvu na odtok pomocou rešerše odbornej literatúry a analýza klimatologických a hydrologických dát 2016-2024 z experimentálnych povodí PŘF UK na Šumave s ohľadom na medziročnú variabilitu snehovej pokrývky

a charakteristiky klímy. Taktiež boli položené dve hlavné výskumné otázky. Prvá má za cieľ objasniť, výskyt a prejav ukazovateľa snehového sucha aj na území Českej republiky, konkrétne v oblasti Národného parku Šumave. Druhá výskumná otázka sa zameriava na vplyv variability klimatických podmienok na zimný a jarný odtok. Boli taktiež formulované hlavné výskumné hypotézy. Pri prvej výskumnej otázke sa predpokladá, že zvyšovaním teplôt vzduchu dôjde k prejavom snehového sucha aj na území Českej republiky. Zvyšovaním teploty vzduchu v chladných obdobiach sa predpokladá nárast podielu kvapalných zrážok nad snehovými a skorší začiatok topenie snehovej pokrývky. To môže vyústiť k skoršiemu odtoku vody zo snehovej pokrývky.

2. Snehová pokrývka

2.1. Vývoj snehovej pokrývky

Snehová pokrývka je významným hydrologickým činiteľom. Sneh je zmes ľadu, vody a vzduchu, tvorí sa v atmosfére počas zrážok, kryštalizáciou ľadových častíc. Vznik snehu a ľadových kryštálikov je zložitý proces, ktorý zahŕňa interakciu veľmi ochladených kvapiek vody a drobných ľadových kryštálov. Ochladené kvapky vody vznikajú v oblakoch kondenzáciou vodnej pary na kondenzačných jadrách z pôdneho prachu, znečistení, lesných požiarov, morskej soľnej hmly a ďalších zdrojov. V týchto mrakoch sa zároveň tvoria drobné ľadové kryštály v dôsledku samovoľného mrznutia ochladených vodných kvapôčok, sublimácia vodnej pary na ľadových jadrách alebo v dôsledku mrznutia vodných kvapiek na ľadových jadrách. Typ kryštálov, ktoré vzniknú závisí hlavne od teploty a vlhkosti prostredia, jeden mrak dokáže vyprodukovať mnoho rôznych typov kryštálov, ale najčastejšie majú hexagonálny tvar (Doesken a Judson 1997; DeWalle a Rango 2008; Singh a Singh 2001).

Počas svojho pádu na zem môžu prejsť snehové kryštály výraznými premenami v dôsledku zmien teploty a vlhkosti s nadmorskou výškou. Mnoho snehových kryštálov sa ešte pred pádom na povrch roztopí alebo sa vyparí (evaporuje). Charakter povrchovej vrstvy po snežení závisí od počiatočnej formy kryštálov a na poveternostných podmienkach počas depozície. Po depozícii sa sneh môže rýchlo rozptýliť topením alebo sublimáciou alebo pretrvávajú po dlhú dobu, ak pretrvávajú tak jednotlivé ľadové zrná metamorfujú na snehovú pokrývku, primárne v dôsledku účinkov teploty a tlaku následne napadaného snehu (Armstrong a Brun 2010; Doesken a Judson 1997). Existujú dva typy metamorfózy snehu a to **metamorfóza suchého snehu**, pričom suchý sneh je definovaný ako sneh, ktorý neobsahuje žiadnu vodu v tekutej forme. V tomto prípade sú póry v suchom snehu vyplnené len vzduchom, ktorý je zvyčajne nasýtený vodnou parou, typicky sa vyskytuje pri teplotách, ktoré sú pod bodom mrazu. Pri tomto type metamorfózy dochádza k zmene tvaru kryštálov na zaoblenejšie, čo spôsobuje zväčšenie hustoty snehovej pokrývky. Druhý typ metamorfózy je **metamorfóza vlhkého snehu**, ktorá je riadená hlavne tým, že malé ľadové kryštály majú o niečo nižšiu teplotu topenia ako väčšie ľadové kryštály. Keď sa teda začne ohrievať snehová pokrývka, ako prvé sa začnú topiť menšie ľadové zrná a tie väčšie sa začnú zaobľovať. Voda z roztopených menších ľadových kryštálov začne nahrádzať vodnú paru v póroch, čo výrazne zvyšuje rýchlosť prenosu energie medzi ľadovými zrnami. Opakované topenie a znovu mrznutie spôsobuje vznik veľkých spojených zhlukov ľadových kryštálov (Armstrong a Brun 2010; DeWalle a Rango 2008).

2.2. Faktory ovplyvňujúce snehovú pokrývku

Topografia je jedným z hlavných faktorov ovplyvňujúcich rozmiestnenie snehovej pokrývky. Preto vysokohorské prostredia charakterizované zložitým terénom a výrazným výškovým gradientom vykazujú veľké rozdiely v hĺbke snehu na veľmi krátkej vzdialenosti (López-Moreno a Stähli 2008).

Akumulácia snehu a ablačné procesy sú primárne ovplyvňované geografickou šírkou a teplotou vzduchu. Lokálne topografické faktory, vrátane nadmorskej výšky a sklonu výrazne ovplyvňujú snehovú pokrývku prostredníctvom distribúcie slnečného žiarenia. Zvyčajne sneh na svahoch smerom k slnku vydrží kratšie ako na zatienených svahoch (Saydi a Ding 2020). Na otvorených priestranstvách má na snehovú pokrývku veľký vplyv aj vietor, ktorý svojim vplyvom dokáže redistribuovať sneh, pričom ho zvyčajne presúva z horských chrbtov a náveterných svahov do závetří rôznych topografických útvarov. Tento pohyb spôsobený vetrom môže za niektorých podmienok viesť až k nebezpečným lavínovým situáciám (Liston a Sturm 1998). Kvôli smeru prichádzajúcej vodnej pary je tiež na náveterných svahoch viac snehu než na záveterných. Akumuláciu snehu môže ovplyvňovať aj redistribúcia snehu gravitáciou (napr. lavínami), teda na strmších svahoch je tendencia výskytu snehu nižšia než na svahoch s nižším sklonom (Saydi a Ding 2020).

Mnoho štúdií, označilo lesný porast ako významný aspekt ovplyvňujúci akumuláciu a topenie snehu. Väčšina z nich uvádza, že husté lesné porasty môžu znížiť množstvo akumulovaného snehu o viac než 50 % v porovnaní s nezalesnenými plochami, aj keď vplyv lesného porastu na snehovú pokrývku sa môže meniť v závislosti od klímy, topografie a charakteristike lesného porastu. V chladných oblastiach ihličnatých lesov, je zadržiavanie padajúcich zrážok (intercepcia) kľúčovým procesom, ktorý riadi akumuláciu a rozloženie snehu na viac ako 20 % zemského povrchu (Lv a Pomeroy 2019). Po dopade zrážok na povrch pokrytý vegetáciou dochádza najprv k interkepcii, pričom vplyvom vyšších teplôt časť zachytených zrážok priamo sublimuje, nezúčastní sa teda hydrologického cyklu, alebo dochádza k roztopeniu a následnému vypareniu, pričom časť roztopeného snehu môže dopadnúť na povrch v podobe vodných kvapiek. Zvyšok snehu zachytený vegetáciou postupne spadne na zem. Po vyčerpaní kapacity interkepcie sa voda dostáva priamo na povrch pôdy a následne je na povrchu pôdy jej časť zachytená vo forme povrchovej retencie a zvyšok infiltruje do pásma aerácie (DeWalle a Rango 2008; Trizna 2004).

Ľudská činnosť patrí tiež k faktorom, ktoré vplývajú na snehovú pokrývku. Urbanizácia môže zvýšiť množstvo nepriepustných povrchov, čím sa mení hydrologický cyklus a výsledkom je zníženie pôdnej vlhkosti a akumulácie snehovej pokrývky (Fang a Leung 2023).

2.3. Dôležitosť snehovej pokrývky

Permanentná alebo sezónna snehová pokrývka sa vyskytuje vo veľkých častiach sveta, aj keď jej rozsah na južnej hemisfére je omnoho menší kvôli menšej rozlohe. Ročný podiel snehových zrážok sa zvyšuje vplyvom nadmorskej výšky a zemepisnej šírky, kde sa množstvo slnečnej energie v priebehu roka výrazne mení (Seibert et al. 2015). Snehová pokrývka ma významnú rolu v globálnom hydrologickom cykle, počas zimy je to zásobáreň vody, ktorá sa na jar postupne uvoľňuje. Snehová pokrývka a jej následne topenie dodáva najmenej jednu tretinu vody, ktorá sa využíva na zavlažovanie a pestovanie plodín (DeWalle a Rango 2008). Sneh má vysoké albedo, čo znamená, že veľká časť prichádzajúcej slnečnej energie je odrazená späť do atmosféry. Albedo nového snehu môže byť až 0,9, zatiaľ čo počas starnutia snehu klesá na 0,5. Typické hodnoty pre oblasti bez snehovej pokrývky sú medzi 0,1-0,3. Sneh ma tiež nízku tepelnú vodivosť, čo znamená, že toky energie medzi atmosférou a zemou sú snehom výrazne redukované. Zimná snehová pokrývka súčasne pôsobí ako izolácia pre miestne prostredie a poskytuje izolačnú vrstvu pre vegetáciu a hibernujúce zvieratá (Seibert et al. 2015). Počas teplého obdobia, keď sa zamrznutá pôda začína rozmrazovať a zachováva si priemernú priepustnosť, sa sneh môže pomaly topiť a voda z neho čiastočne infiltrovať do pôdy. Následne sa môže dostať do kolektoru a zásobovať ho (Huang et al. 2024). V porovnaní s dažďovými zrážkami, voda z topiaceho sa snehu má schopnosť sa lepšie infiltrovať do koreňovej zóny, teda tvorí veľkú časť zásobovania podzemnej vody (Dierauer, Allen a Whitfield 2019). Snehová pokrývka úzko súvisí s klimatickými podmienkami a je známa ako zásadný prediktor klimatických zmien (Safari a Hejabi 2024). V extrémnych prípadoch, môže pri nadmernom topení snehu, niekde v kombinácii so silnými jarnými zrážkami, viesť až ku katastrofickým záplavám. Rýchle topenie snehu môže tiež spôsobiť zosuvy pôdy. Naopak nedostatočné topenie snehu môže spôsobovať nízke prietoky riek v lete, alebo aj sucho, čo môže mať významné ekonomické, environmentálne a ekologické následky (Seibert et al. 2015).

3. Sezónna variabilita snehu

3.1. Snehové sucho

Snehové sucho je v súčasnosti veľmi aktuálne téma mnohých odborných štúdií, aj keď ešte neexistuje zjednotená definícia tohto javu, dalo by sa zjednodušene charakterizovať ako nezvyčajný úbytok snehovej pokrývky, ktorý má v chladných oblastiach značné hydrologické a socioekonomické dopady (Han et al. 2025).

Snehová pokrývka vzniká akumuláciou pevných zrážok v chladnom období a je zásobárňou sladkej vody, pričom pri nasledujúcom topení snehu v jarom a letnom období poskytuje vodu vodným nádržiam a udržiava prietok vo vodných tokoch, ktoré môžu byť v týchto obdobia ovplyvňované nízkym úhrnom zrážok a zvýšenou mierou procesu vyparovania vody z pôdy a rastlín (evapotranspirácia) (Dierauer, Allen a Whitfield 2019).

Predchádzajúce štúdie kvantifikovali snehové sucho rôznymi spôsobmi. Každý prístup vo všeobecnosti pozoruje anomálie vo vodnej hodnote snehu (SWE) v porovnaní s dlhodobými historickými podmienkami. Následne rozlišuje medzi snehovým suchom spôsobeným nižšími než normálnymi zrážkami a tými spôsobenými teplotami vyššími než normálnymi (Hammond et al. 2024).

Keďže snehová pokrývka odráža až 80% dopadajúceho slnečného žiarenia má významný dopad na regionálnu a globálnu klímu (Yeşilköy, Baydaroğlu a Demir 2024). Sezónny sneh je dôležitou súčasťou klimatického systému Zeme, ale teplejšie a kratšie zimy spôsobené zmenou klímy znížia zásoby snehu vo väčšine sezónne zasnežených oblastiach sveta, čo bude mať dôsledky na dostupnosť sladkej vody na jar a v lete. Spomedzi viacerých environmentálnych faktorov a fyziografických charakteristík zohráva teplotná variabilita dôležitú úlohu pri regulácii vodnej hodnoty snehu (SWE) v horských oblastiach. S očakávaným zvyšovaním teplôt v horských oblastiach sa vyskytli obavy o množstvo vody, ktoré by bolo v budúcnosti uložené v snehovej pokrývke na celom svete. V oblastiach, kde je hydrologický cyklus často ovplyvňovaný dynamikou snehu, môže sucho vyvolané zvýšením teploty a znížením zrážok silne ovplyvniť hydrologický režim a vodné zdroje týchto oblastí. Snehové sucho, t.j. nedostatok akumulácie snehu v zime, sa môže vyskytnúť z úplne odlišných klimatických dôvodov, a teda mať rôzne hydrologické a socio-ekonomické dôsledky (Gottlieb a Mankin 2022; Huning a AghaKouchak 2018; Safari a Hejabi 2024). Predchádzajúce štúdie preukázali, že zmena klímy spôsobená antropogénnymi faktormi sa už prejavila zvýšenými zimnými teplotami, zníženým podielom zrážok v chladnom období a zmenou načasovania odtoku

(Pierce a Cayan 2013). Pochopenie vplyvov, ktoré stoja za výskytom snehového sucha je zásadné pre pochopenie potencionálnych zmien v závažnosti sucha, ktoré môžu nastať v budúcnosti (Wang et al. 2024).

3.2. Príčiny snehového sucha

Snehové sucho je zložitý fenomén, ktorý môže byť spôsobený priamymi faktormi, ako napr. nízky úhrn snehových zrážok, vysoké teploty a vplyv vetra, ale aj nepriamymi faktormi, pod ktoré spadá vlhkosť pôdy, teplota pôdy a potenciálna evapotranspirácia.

Na snehovú pokrývku nevplyvajú len prírodné faktory ale aj ľudské aktivity, ktoré ovplyvňujú klimatické podmienky odlesňovaním, urbanizáciou a rôznymi poľnohospodárskymi činnosťami. Tie môžu viesť k zmene albeda povrchu a energetickej bilancie, čo môže následne vplývať na načasovanie a množstvo sneženia a topenia snehu (Fang a Leung 2023). Načasovanie a rozsah topenia snehu sú výrazne ovplyvňované vplyvom zmeny klímy a medzoročnou premenlivosťou počasia. Pri vyšších teplotách dochádza k skracovaniu období so snehovými zrážkami a snehovou pokrývkou a skoršiemu topeniu tohto snehu (Mott, Vionnet a Grünwald 2018). Je očakávané, že v budúcnosti vplyvom zmeny klimatických podmienok sa výskyt teplých a suchých podmienok zvýši. Preto s postupujúcim globálnym otepľovaním môže dôjsť k zmenám v množstve snehových zrážok a v spôsobe topenia snehu, dokonca aj v oblastiach, ktoré boli predtým považované za oblasti s vysokým úhrnom snehových zrážok. Pri suchých pôdných podmienkach a vysokých teplotách pôdy môže dochádzať k zvýšeniu topeniu snehu alebo zníženiu akumulácie snehu, čo nakoniec vedie k redukovaniu snehovej pokrývky (Fang a Leung 2023; Wang et al. 2024).

Jednou z príčin môžu byť zmeny zrážok, ktoré sú však viac regionálne a nestále. Hoci vo vyšších zemepisných šírkach je pravdepodobný ich nárast, v stredných zemepisných šírkach, ktoré sú o niečo suchšie, dôjde k ich poklesu, takže zmeny zrážok môžu mať protichodné dopady na snehovú pokrývku. Nadmorská výška má tiež významnú úlohu pri budúcich zmenách snehovej pokrývky. Vysoké polohy bývajú chladnejšie, preto sa vyžaduje väčšie oteplenie, aby došlo k topeniu (Pierce a Cayan 2013).

Nárast teploty vzduchu spôsobený globálnym otepľovaním sa vo všeobecnosti spája so zníženým počtom dní s teplotou pod bodom mrazu v chladných mesiacoch. Menej časté snehové zrážky sú nahradené častejšími zrážkami v kvapalnej forme, pričom môže vznikať fenomén nazývaný dážď na sneh (rain-on-snow, ROS). Ten vzniká, keď už na existujúcu snehovú pokrývku na povrchu padajú zrážky vo forme dažďa, ktoré zamrznú a vytvárajú na

povrchu ľadovú vrstvu. Navyše, ak na snehovú pokrývku padá dažď dochádza k roztopeniu určitej časti tejto snehovej pokrývky, tvoriaca sa voda môže presiaknuť a ohriať pôdu. Vplyv dažďa na sneh (ROS) na klímu závisí od výšky snehovej pokrývky a teploty prostredia v dňoch, keď zrážky padajú vo forme dažďa. Očakáva sa však, že celková početnosť dažďa na sneh (ROS) sa celkovo môže znížiť v dôsledku všeobecne menšieho množstva snehu. V prípade povodia rieky Sitter v Švajčiarskych Alpách sa ukázalo, že počet prípadov dažďa na sneh (ROS) by sa mohlo zvýšiť až o 50 % pri oteplení o 2°C - 4°C, zatiaľ čo oteplenie o viac ako 4°C by opäť viedlo k poklesu. Takéto zmeny vplývajú na zníženie vodnej hodnoty snehu (SWE) a na jarné topenie snehu, čo vedie nielen k nedostatku vody na začiatku leta v chladných klimatických oblastiach, ale aj k zníženiu vodnej hodnoty snehu. To je spojené s úbytkom množstva a trvania snehovej pokrývky čo by mohlo mať za následok zníženie albeda a následné zosilnenie globálneho otepľovania (Cohen, Ye a Jones 2015; Irannezhad, Ronkane, a Malekian 2022; Seibert et al. 2015).

3.3. Typy snehového sucha

Snehové sucho sa spravidla rozdeľuje na dva hlavné typy a to:

- a. Suché snehové sucho, vzniká pri abnormálnom nedostatku zrážok v chladných obdobiach.
- b. Teplé snehové sucho spôsobené nezvyčajne vysokými teplotami v chladných obdobiach, čo vedie k nižšiemu množstvu zrážok, ktoré padajú vo forme snehu.

Vzhľadom k rôznym klimatickým faktorom, ktoré na ne vplývajú, majú tieto dva typy snehového sucha rozdielne hydrologické a socio-ekonomické dôsledky (Han et al., 2025). Niektoré štúdie popisujú ešte tretí typ snehového sucha, ktoré je kombináciou už spomínaných typov a označuje sa ako teplé suché snehové sucho. Jeho negatívne dopady sú tiež kombináciou dopadov už spomínaných typov, preto sa stáva najnebezpečnejším typom snehového sucha (Dierauer et al., 2019). V predchádzajúcich štúdiách sa na monitorovanie snehového sucha využívalo mnoho rôznych typov pozorovania, ako napr. pozorovanie vodnej hodnoty snehu (SWE), SWE predstavuje hydrologický parameter, ktorý označuje objemové množstvo vody obsiahnuté v snehovej pokrývke vzniknuté jej roztopením. Podľa (Harpold, Rajagopal, a Dettinger 2017), ktorí robili výskum snehového sucha v pohoriach na západe USA, sú zimy s podnormálnou vodnou hodnotou snehu (SWE) a nadnormálnymi zrážkami klasifikované ako zimy s teplým snehovým suchom a zimy s podnormálnou vodnou hodnotou snehu (SWE) a aj podnormálnymi zrážkami sú klasifikované ako zimy so suchým snehovým suchom (Tabuľka

1). Základom pre toto rozdelenie boli merania vodnej hodnoty snehu (SWE), robené 1.apríla, čo zhruba zodpovedá dátumu maximálnej akumulácie snehu, teda najväčšej vodnej hodnoty snehu a kumulatívnych zrážok, od 1.novembra do 1.apríla.

Snehové sucho	Priemerná zimná teplota vzduchu	SWE	Celkové zimné zrážky (P) – kvapalné, či snehové	SWE / P
Suché	Akákoľvek (žiaden priamy vplyv)	podpriemerná	podpriemerné	≈ 1
Teplé	nadpriemerná	podpriemerná	Priemerné až nadpriemerné	< 1

Tabuľka 1: Porovnanie suchého a teplého snehového sucha podľa (Harpold, Rajagopal, a Dettinger 2017)

Táto metóda však podľa (Wang et al. 2024) vedie k nepresnému zhodnoteniu, lebo nezohľadňuje faktory, ktoré spôsobujú snehové sucho. Podľa ich výskumu je dôležité skúmať suché a teplé snehové sucho z hľadiska pozorovania vývoju snehovej pokrývky počas zimného obdobia. Na to vyvinuli a zaviedli novú klasifikáciu, ktorá je založená na neparametrickom štandardizovanom indexe SWE (Nonparametric Standardized SWE Index, NSWEI) a štandardizovanom indexe zrážok (Standardized Precipitation Index, SPI). Dva základné typy snehového sucha (D_{type}) charakterizovali následnými rovnicami:

$$D_{type} = \text{suché} = \text{if}\{(NSWEI \leq -0,5) \& (SPI \leq -0,5)\} \quad (1)$$

$$D_{type} = \text{teplé} = \text{if}\{(NSWEI \leq -0,5) \& (SPI > -0,5)\} \quad (2)$$

V oboch prípadoch je základný predpokladom snehového sucha podnormálny neparametrický štandardizovaný index SWE ($NSWEI \leq -0,5$), suché snehové sucho je navyše dané aj podnormálnym úhrnom zrážok ($SPI \leq -0,5$) a teplé snehové sucho je zase navyše dané nadnormálnym alebo skoro normálnym úhrnom zrážok ($SPI > -0,5$). Parametre NSWEI a SPI sa získavajú v chladnom období – od október predchádzajúceho roka do marca nasledujúceho roka - v trojmesačnom rozsahu. Najviac využívaná metóda je zatiaľ metóda od (Dierauer, Allen a Whitfield 2019), v ktorej sú zimy s podnormálnou maximálnou vodnou hodnotou snehu (SWE) klasifikované ako teplé, suché alebo kombinácia teplého a suchého snehového sucha na základe zimných zrážok (P) a teplôt vzduchu, pri ktorých dochádzalo k topeniu snehu (thawing degree, TD) a charakterizovali ich rovnicami:

$$D_{type} = \text{suché} = \text{if}\{(SWE_i < \overline{SWE}) \& (P_i < \bar{P}) \& (TD_i < \overline{TD})\} \quad (3)$$

$$D_{type} = \text{teplé} = \text{if}\{(SWE_i < \overline{SWE}) \& (P_i > \bar{P})\} \quad (4)$$

$$D_{type} = \text{teplé a suché} = \text{if}\{(SWE_i < \overline{SWE}) \& (P_i < \bar{P}) \& (TD_i > \overline{TD})\} \quad (5)$$

Kde SWE_i , P_i , TD_i sú maximálne SWE, zimné zrážky a stupne topenia, ktoré boli vypočítané ako súčet priemerných denných teplôt za všetky zimné dni s priemernou dennou teplotou nad 0°C , v danom roku i , v uvedenom poradí, $\overline{SWE}$, $\overline{P}$ a $\overline{TD}$ sú dlhodobé priemery daných veličín pre dané obdobie a D_{type} je druh snehového sucha. Kvôli časovej variabilite snehovej pokrývky je použité maximálne SWE a nie SWE k 1. aprílu daného roka.

4. Dopad snehového sucha

Pochopenie oblasti, načasovania a závažnosti snehového sucha je zásadné pre efektívne hospodárenie s vodnými zdrojmi a aj pre zmiernenie vplyvov meniacich sa klimatických podmienok. Horské povodia sú významne ovplyvňované snehom ale v posledných desaťročiach sa v mnohých horských oblastiach začala znižovať vodná hodnota snehu (SWE). Následné jarné topenie snehu sa začína vyskytovať skôr v roku, čo naznačuje reakciu dynamiky snehu a topenia snehu na zvyšovanie teploty vzduchu v dôsledku klimatických zmien (Jenicek a Ledvinka 2020). Nedostatok akumulovaného snehu alebo až snehové sucho môže mať významný vplyv na fenológiu lesa. Bolo zistené, že vplyvom snehového sucha bol v stredných zemepisných výškach posunutý začiatok vegetačného obdobia lesov o 6 dní (Fang a Leung 2023). Analýzy predchádzajúcich snehových súch dokazujú, že najzávažnejšie snehové suchá spôsobujú teplé a suché zimné podmienky vyskytujúce sa súčasne, pričom najmenej závažne snehové sucho vzniká pri teplých zimných podmienkach. Závažnosť a početnosť teplých snehových súch závisí od priemernej teploty v zime. V oblastiach, kde sú priemerné teploty nad $-3,1^{\circ}\text{C}$, je väčšie riziko výskytu tohto typu snehového sucha (Dierauer, Allen a Whitfield 2019). Zmeny v množstve zrážok majú tendenciu ovplyvňovať objem odtoku a najmä maximálnu akumuláciu snehu, ktorá sa zvyčajne vyskytuje koncom zimy na začiatku obdobia topenia. Na druhej strane zmeny teploty ovplyvňujú najmä načasovanie odtoku. Zvyšovanie teploty vedie k skoršiemu odtoku na jar alebo v zime a k zníženiu prietokov v lete a na jeseň. Platí to najmä v prípade, že nedochádza k zmenám zrážok (Barnett, Adam a Lettenmaier 2005). V oblastiach, kde ubúdajú snehové zrážky, sa spravidla mení odtok z topiaceho sa snehu na odtok zo zrážok v kvapalnej forme s výnimkou niektorých povodí v Strednej Amerike, Stredomorí a Strednej Ázii, kde sa predpokladá pokles odtoku zo snehových aj kvapalných zrážok (Seibert et al. 2015). Suché snehové sucho vedie k zníženiu ročného prietoku v tokoch, čo ovplyvňuje dostupnosť pitnej vody a aj vody využiteľnej na zavlažovacie účely. To vedie k znižovaniu objemu vody v nádržiach a znižovanie výroby vodnej energie (Wang et al. 2024). Vplyvom pretrvávajúceho globálneho otepľovania je pravdepodobné, že po suchom snehovom

suchu bude nasledovať vlna horúčav spôsobená intenzívnym pôdnym a atmosférickým suchom (Fang a Leung 2023). Predpokladá sa, že počas teplého snehového sucha nezvyčajne nízka snehová pokrývka zníži albedo a zvýši množstvo slnečného absorbovaného zemskej povrchom, čo priamo spôsobí vyššie teploty vzduchu (Wang et al. 2024).

Anomálne nízke jarné snehové zásoby môžu viesť k nedostatku vody, prečerpaniu podzemných vôd, úbytku vegetácie a zvýšenému riziku lesných požiarov, čo môže výrazne ohroziť socio-ekonomickú prosperitu regiónov (Li et al. 2017). Očakáva sa, že pretrvávajúce otepľovanie klímy ešte zvýši závažnosť snehového sucha, pričom sa jeho vplyv na dostupnosť vody v teplo ročnom období pravdepodobne ešte zhorší (Han et al. 2025).

4.1. Obvyklý odtok zo snehu

Na základe výskumu na západe USA bolo dokázané, že 53 % celkového odtoku vzniká topením snehu, aj keď vo forme snehu spadne len 37 % zrážok, pričom však v horských oblastiach je topenie snehu zodpovedné za 70 % celkového odtoku (Li et al. 2017). Keď teplota v celom snehovom profile dosiahne 0°C, dochádza k topeniu snehu. Tento proces poháňaný energiou, vedie k postupným zmenám štruktúry snehu a k zvýšeniu teploty snehovej pokrývky. Prívod ďalšej energie za takýchto podmienok vedie k topeniu a odtoku vody z topiaceho sa snehu (Holko, Gorbachova, a Kostka 2011; Seibert et al. 2015). Tento odtok je tvorený či už topiacim sa snehom, alebo zrážkami, ktoré buď padajú na snehovú pokrývku alebo na vodu vyprodukovanú topením. Povrchový odtok zo snehu môže byť urýchlený v dôsledku zmrznutej alebo vodou nasýtenej pôdy. Rieky v oblastiach, ktoré sú významne ovplyvňované snehovou pokrývkou sa vyznačujú výrazne vyššími jarnými pri vyšších polohách až letnými prietokmi, ktoré v teplých obdobiach zásobujú krajinu vodou (DeWalle a Rango 2008; Seibert et al. 2015).

4.2. Dopad snehového sucha na odtok

Všetky tri typy snehového sucha vedú k výrazným zmenám v odtoku. Pri teplom snehovom suchu dochádza vplyvom vyšších teplôt k väčšiemu prietoku už v zimnom období, zatiaľ čo pri suchom type a teplom suchom type dochádza k zníženiu prietoku v zimnom aj letnom období. To má za následok výrazný pokles ročného odtoku (Han et al. 2025).

Vo výskume (Milly a Dunne 2020) na rieke Colorado bolo zistené, že priemerný ročný prietok sa znižuje o 9,3% na každý stupeň Celzia oteplenia v dôsledku zvýšenej evapotranspirácie, ktorá je spôsobená najmä stratou snehu a následným znížením odrazu slnečného žiarenia.

Zmeny v odtoku pri topení snehu majú veľký význam pre vodné zdroje. V súčasnosti odtok z topiaceho snehu zásobuje vodou veľkú časť obyvateľstva. Pri prechode snehových zrážok na dažďové by k odtoku dochádzalo v nesprávnom ročnom období a došlo by k nedostatku vody v takmer 100 povodiach na severnej pologuli. Päťina z týchto povodí čelí značnému riziku budúceho poklesu odtoku z topiaceho sa snehu, ako aj zvýšeniu dopytu po vode, ktorý nebude uspokojený odtokom z dažďových zrážok (Seibert et al. 2015).

Počas suchého a teplého suchého snehového sucha má prietok v zimnom období tendenciu klesať, zatiaľ čo počas teplého snehového sucha zvyšujúce sa teploty podnecujú zmenu zrážok zo snehových na dažďové a urýchľujú topenie snehu, čo následne zvyšuje prietok v zimných obdobiach. V dôsledku toho sa rozsah povodní spôsobených snehom môže počas teplého snehového sucha zvýšiť. V rokoch postihnutých teplým snehovým suchom skoršie topenie snehu a zmena typu zrážok zo snehových na dažďové spoločne vedú k zvýšenej pravdepodobnosti extrémneho prietoku v chladnom období.

Zníženie prietoku v teplom období znamená zvýšené riziko letného a jesenného sucha. S rastúcou intenzitou snehového sucha je pravdepodobné, že povodia budú mať častejší a závažnejší deficit prietoku v teplom období (Han et al. 2025). Dlhodobým prejavom dopadu snehového sucha na odtok môže byť celkové hydrologické sucho, ktoré významne vplýva na všetky zložky hydrologického cyklu. Výsledkom teda môže byť rozvoj všetkých typov sucha (meteorologické, poľnohospodárske a socioekonomické) (Van Loon 2015).

4.3. Dopad na budúce zásoby vody

Skúmanie zmien výskytu snehového sucha a jeho vplyv na prietok je nevyhnutné na získanie poznatkov o budúcich zásobách vody v chladných oblastiach. Napriek celkovému zvýšeniu početnosti a závažnosti snehových súch v dôsledku otepľovania klímy pretrvávajú medzi jednotlivými typmi snehových súch pozoruhodné rozdiely. Konkrétne, početnosť výskytu suchého snehového sucha sa znižuje, zatiaľ čo početnosť teplého a teplého suchého snehového sucha sa zvyšuje. To naznačuje zmenu v spôsobe vzniku snehového sucha a to od zrážkových anomálií k teplotným. Aj keď sa zvyšuje závažnosť všetkých troch typov snehového sucha, nárast závažnosti suchého snehového sucha je oveľa pomalší ako pri ostatných dvoch typoch. Suché aj teplé suché snehové sucha vplývajú na prietok v chladnom aj teplom období, čo vedie k výraznému zníženiu ročného prietoku. Pravdepodobnosť, že snehové sucha povedú k deficitu prietoku v teplých obdobiach, ako aj veľkosť deficitu prietoku teplých obdobiach sa zvyšuje so stupňujúcou sa intenzitou snehového sucha. To naznačuje, že so silnejúcim

snehovým suchom budú povodia pravdepodobne častejšie a závažnejšie pociťovať deficit prietoku v teplých obdobiach (Han et al. 2025).

5. Dáta a metódy spracovania

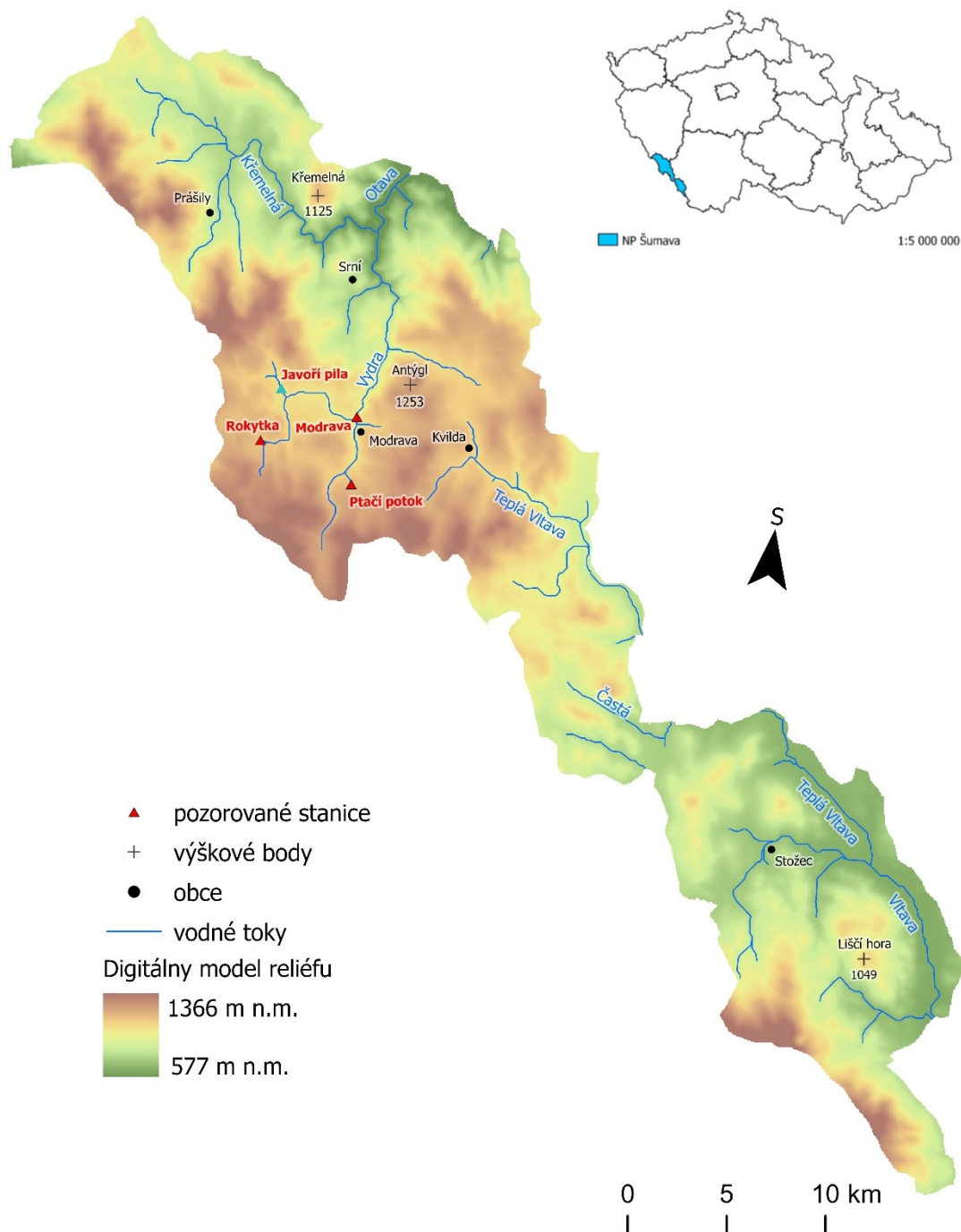
5.1. Fyzicko-geografická charakteristika záujmového územia

Šumava sa nachádza pri juhozápadnej hranici Českej republiky a radí sa medzi najrozsiahlejšie pohoria v Českej republike. V Česku je pohorie Šumavy dlhé 190 km a dosahuje šírku až 5 km so strednou výškou 920 m n.m. Najvyšším vrcholom českej strany je vrch Plechý s nadmorskou výškou 1378 m. Šumava patrí medzi najstaršie pohoria strednej Európy a geologicky ju zaradujeme do regiónu moldanubika. Prevládajú tu metamorfované horniny ako pararuly a migmatity, často s vložkami kvarcitov a erlánov. Jadrom pohoria sú Šumavské pláne, čo je rozsiahla náhorná rovina s nadmorskou výškou okolo 1000 m. Táto oblasť je tiež známa rozsiahlym výskytom rašelinísk. Na Šumave sú výrazné pozostatky pôsobenia ľadovcov, ich pôsobením vzniklo vrch Plechý a mnohé ľadovcové jazerá, napr. Čertovo jazero alebo Plešné jazero. Celé územie bolo poznamenané procesmi vrásnenia, preto nie je jednoduché toto územie geologicky opísať (NP Šumava 2025).

Z pedologického hľadiska má Šumava horský charakter s prevahou kyslých pôdotvorných substrátov. Najviac zastúpené pôdne typy sú kambizeme, ktoré sa hlavne vyskytujú v nadmorských výškach do 800 m, kryptopodzoly a podzoly, ktoré sa vyskytujú v nadmorských výškach nad 1000 m a rankery, ktoré sa nachádzajú na exponovaných vrcholoch terénnych vyvýšenín. Podľa historických dát Českého hydrometeorologického ústavu sa priemerná teplota medzi rokmi 2015-2024 pohybovala medzi 3°C - 7°C a priemerný úhrn zrážok sa pohyboval od 600 mm v nižšie položených oblastiach do 1400 mm v oblastiach s vyššou nadmorskou výškou. Z hydrologického hľadiska väčšina územia patrí k úmoriu Severného mora, povodie Labe, len malá časť územia spadá do povodia Dunaja, ktorý patrí k úmoriu Čierneho mora. Nachádzajú sa tu pramene mnohých riek ako Vltava, Otava, Blanice.

Krajinný pokryv Šumavy je prevažne tvorený ihličnatými lesmi, z veľkej časti sú to smrekové lesy, taktiež je tu výskyt rozsiahlych rašeliniský a močiarov (Česká geologická spoločnosť 2017a; 2017b; NP Šumava 2025). Záujmové územie tejto práce je len časť Šumavy ohraničená územím Národného parku Šumava (Obrázok 1), ktorý má rozlohou 680 km². Na jeho juhozápade sú strmé svahy, ktoré postupne na severozápad klesajú. Pozorované boli štyri snehomerné stanice, ktoré merajú teplotu vzduchu, úhrn zrážok a rôzne snehové premenné, ako

je výška snehu a vodná hodnota snehu (SWE). Okrem stanice Modrava všetky merali aj prietok, za hydrologické obdobie 2016-2024:



Obrázok 1: Zaujímavé územie - Národný park Šumava

Rokytká je stanica, ktorá sa nachádza v nadmorskej výške 1090m v blízkosti toku Rokytká (Obrázok 1). Priemerná mesačná teplota za pozorované obdobie sa na tejto stanici pohybovala v rozmedzí od -4°C do $13,6^{\circ}\text{C}$. Najviac celkových zrážok napadlo za mesiac december 1646 mm a najmenej za mesiac apríl a to 707 mm (Obrázok 2, a). Najvyššia priemerná výška snehu na tejto stanici bola za mesiac február 67 cm a jeho vodná hodnota (SWE) bola 196 mm (Obrázok 3, a). Z geologického hľadiska tu prevažujú kvartérne nespevnené sedimenty (Česká geologická spoločnosť 2017a; 2017b).

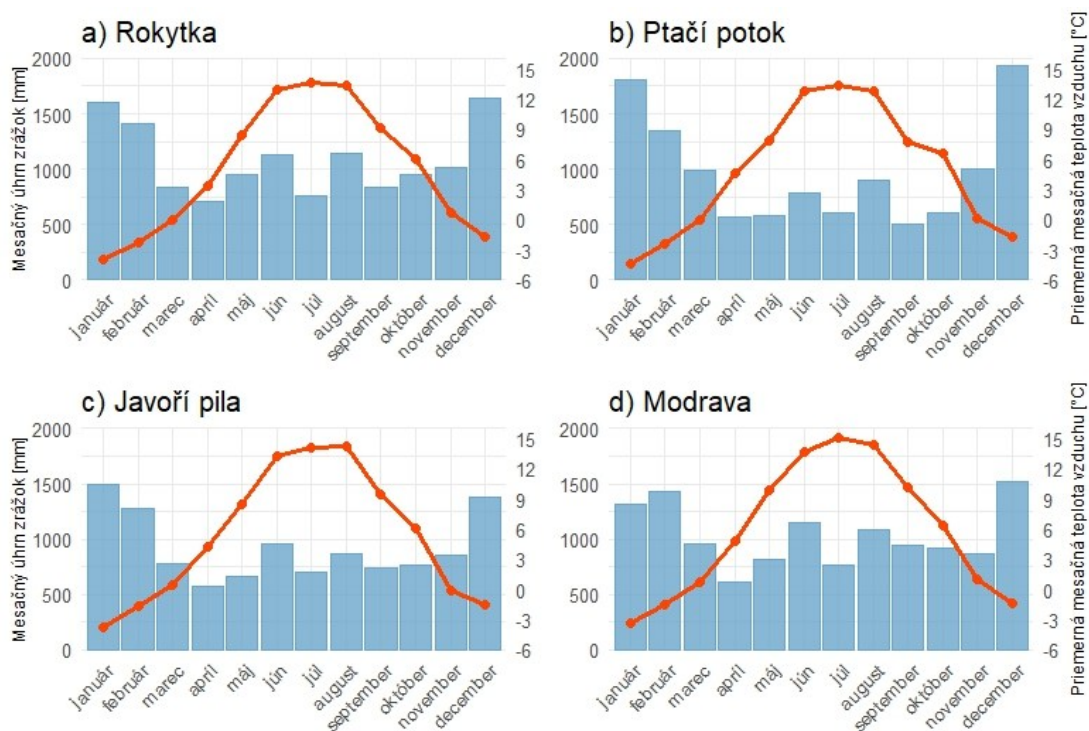
Ptačí potok je najvyššie položená skúmaná stanica v nadmorskej výške 1130 metrov. Nachádza sa v blízkosti toku s názvom Ptačí potok (Obrázok 1) a prevládajú tu nivinné ale aj piesčito-hlinité a hlinito-piesčité sedimenty. Priemerné mesačné teploty sa za merané obdobie pohybovali od $-4,5^{\circ}\text{C}$ do $13,5^{\circ}\text{C}$. Zrážok za najdaždivější mesiac celkovo napadlo okolo 1900 mm a najnižšie celkové zrážky napadli za mesiac september a to 498 mm (Obrázok 2, b). Vzhľadom na to, že je to najvyššie položená stanica zo všetkých pozorovaných staníc, tu bola najvyššia priemerná mesačná výška snehu 71 cm s vodnou hodnotou (SWE) 209 mm (Obrázok 3, b) (Česká geologická spoločnosť 2017a; 2017b).

Javoří pila je druhá najnižšie položená stanica s nadmorskou výškou 1035m. Nachádza sa v blízkosti vodného toku Javoří potok (Obrázok 1). Sú tu silne zastúpené nivinné a aj ďalšie nespevnené sedimenty. Teploty za pozorované obdobie boli v rozmedzí od $-3,7^{\circ}\text{C}$ do $14,1^{\circ}\text{C}$, najvyšší úhrn zrážok bolo za mesiac január 1498 mm (Obrázok 2, c). Najvyššia priemerná výška z pozorované obdobie bola 54,7 cm vo februári s vodnou hodnotou snehu (SWE) 228 mm (Obrázok 3, c) (Česká geologická spoločnosť 2017a; 2017b).

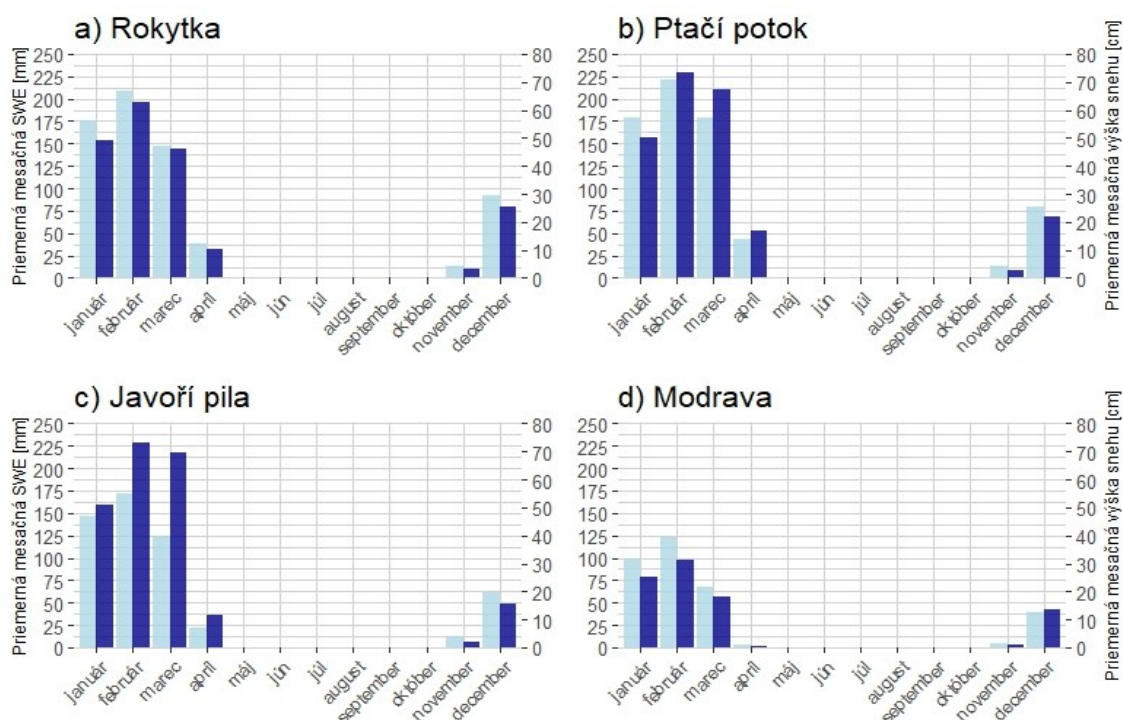
Modrava je stanica ktorá sa nachádza v strede obce Modrava a z pozorovaných staníc je to najnižšie položená stanica vo výške 990 m n. m (Obrázok 1). Z geologického hľadiska je okolie stanice tvorené nivinnými sedimentami a vo väčšej vzdialenosti prevažujú metamorfity-pararula až migmatit. Najnižšia priemerná teplota tu bola nameraná za mesiac január $-3,4^{\circ}\text{C}$ a najvyššia za mesiac júl $15,1^{\circ}\text{C}$. Oproti ostatným staniciam mala aj najnižší mesačný úhrn zrážok 1521 mm a to za mesiac december (Obrázok 2, d). Výška snehu a vodná hodnota snehu boli oproti ostatným staniciam menšie, pričom najvyššia priemerná výška snehu bola za mesiac február a to 39 cm s vodnou hodnotou (SWE) 97,6 mm (Obrázok 3, d) (Česká geologická spoločnosť 2017a; 2017b).

Všetky pozorované stanice spadajú z hydrologického hľadiska do povodia Vydry, priemerné mesačné prietoky zo staníc Rokytká, Ptačí potok a Javoří zobrazuje Obrázok 4. Na staniciach

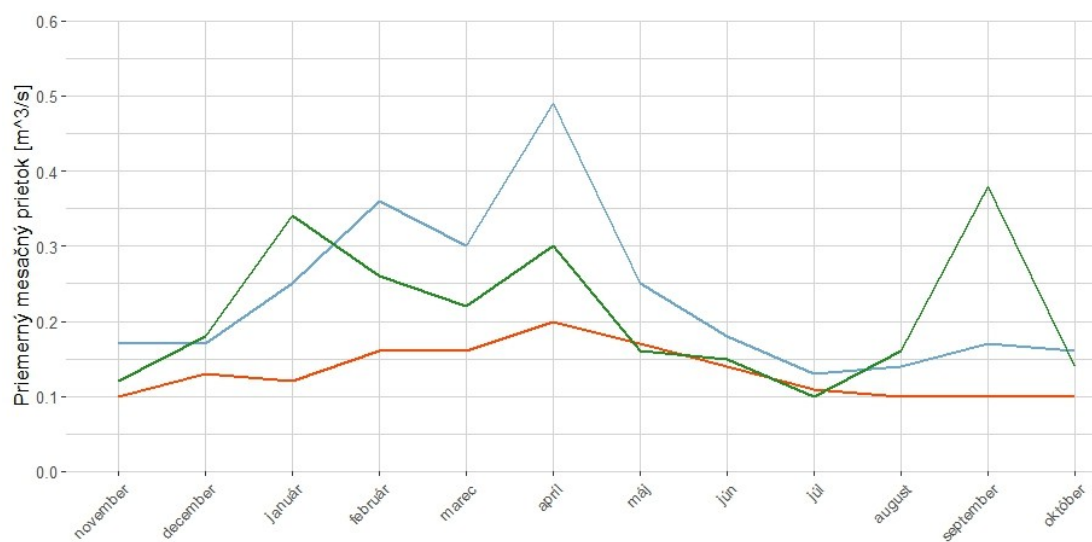
Rokytky a Ptačí potok sú dáta v období od 1.11.2015 – 31.10.2024 a na stanici Javoří pila v období až od 13.9.2016 – 31.10.2024, lebo až vtedy začalo prebiehať na tejto stanici aj meranie odtoku. Na stanici Modrava prietok meraný nebol. Z pedologického hľadiska sa tam prevažne nachádzajú gleje, konkrétne rašelinné gleje a gleje rašelinohumózne (Česká geologická spoločnosť 2017b).



Obrázok 2:: Priemerná mesačná teplota vzduchu (červená línia) a mesačný úhrn zrážok (modrý stĺpec) za hydrologické roky 2016-2024 (zdroj dát: experimentálne povodia PŘF UK, vlastná tvorba)



Obrázok 3: Priemerná mesačná vodná hodnota snehu (SWE) (svetlo modrý stĺpec) a priemerná výška snehu (tmavo modrý stĺpec) za hydrologické roky 2016-2024 (zdroj dát: experimentálne povodia PŘF UK, vlastná tvorba)



Obrázok 4: Priemerný mesačný prietok pre Rokytká (zelená línia) za hydrologické obdobie 2016-2024, Ptačí potok (červená línia) za hydrologické roky 2016-2024 a Javoří pila (modrá línia) za hydrologické roky 2017-2024 (zdroj dát: experimentálne povodia PŘF UK, vlastná tvorba)

5.2. Vstupné dáta

Pre výskum k tejto bakalárskej práci boli využité experimentálne povodia PŘF UK na Šumave (Rokytká, Ptačí potok, Javoří pila, Modrava). V práci boli použité dáta teploty vzduchu [°C], úhrnu zrážok [mm], výšky snehu [cm] a vodnej hodnoty snehu (SWE) [mm]. Stanice tieto dáta merajú v desaťminútovom intervale, ale pre potreby tejto práce boli agregované do hodinových hodnôt. Okrem stanice Modrava bol na všetkých meraný aj prietok [m³/s]. Na spracovanie použitých dát boli použité programy Microsoft Excel a RStudio.

Všetky dáta boli spracované za chladné obdobie za hydrologické roky 2016-2024, okrem dát k stanici Javoří pila, ktoré boli spracované za chladné obdobie za hydrologické roky 2017-2024. Dôvodom boli chýbajúcich dát k prietoku na tejto stanici, ktoré boli zaznamenané až od 13.9.2016. Pod pojmom chladné obdobie v tejto práci rozumieme obdobie od 1.11. do 30.4.. Dátum začiatku bol určený podľa ustáleného začiatku hydrologického roku, ktorý začína 1.11.. Koniec zimného obdobia bol určený vzhľadom k pozorovaným dátam v zadaní bakalárskej práce a zohľadňuje pozorovanie vplyvu snehu na zimný a jarný odtok. Po tomto dátume stanice buď nenamerali žiaden sneh alebo to boli zanedbateľné hodnoty.

V chladnom období roku 2022-2023 a 2023-2024 boli spriemerované hodnoty charakteristík na vyhodnotenie snehového sucha len z troch staníc Modrava, Ptačí potok a Rokytká, na stanici Javoří pila bol v tomto období výpadok v zbere dát vodnej hodnoty snehu (SWE). Taktiež pri stanici Modrava boli čiastočné výpadky v dátach o vodnej hodnote snehu (SWE) v chladných obdobiach 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 ale neboli nulové ako na stanici Javoří pila, teda boli stále zahrnuté do priemeru. Stanice Modrava, Ptačí potok a Rokytká mali tiež čiastočné výpadky v meraní teploty. Tieto výpadky však výrazne neovplyvnili celkový priemer.

Dlhodobý priemer dát daných premenných bol spravený zo stanice Churáňov na Šumave, ktorá patrí Českému hydrometeorologickému ústavu, za obdobie od roku 1980 do roku 2010 (ČHMÚ 2025). Nachádza sa v blízkosti všetkých štyroch pozorovaných staníc.

5.3. Pozorované charakteristiky

P	celkový úhrn zrážok za daný mesiac
SWEmax	maximálna vodná hodnota snehu za daný mesiac
TD (thawing degree)	stupne topenia - priemerná denná teplota za všetky zimné dni s priemernou dennou teplotou nad 0°C v danom roku

Tabuľka 2: Pozorované charakteristiky

Priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu, úhrnu zrážok, výšky snehu, vodnej hodnoty snehu (SWE) a odtoku boli vypočítané ako priemer hodinových alebo denných hodnôt v danom mesiaci.

Počet dní so snežením bol vypočítaný na základe priemernej dennej teploty a priemerného denného úhrnu zrážok. Keďže dáta zväčša neobsahujú informáciu o forme v akej zrážky padli (kvapalné či pevné) na výpočet sa použila hraničná teplota vzduchu 1°C (Blahušiaková et al. 2020). Teda dni so snežením sú tie, ktoré spĺňajú priemernú dennú teplotu pod 1°C a priemerný denný úhrn zrážok väčší ako 0 mm.

5.4. Spracovanie dát a využité metódy

5.4.1. Normalita dát

Testy normality dát sú veľmi dôležité, pretože normálne rozdelenie je základným predpokladom mnohých štatistických postupov. Pri vykonávaní štatistickej analýzy pomocou parametrických metód je overenie predpokladu normality základným krokom. Rozdelenie údajov môže byť buď „normálne“ alebo „nebude normálne“ na základe grafického skúmania alebo formálneho testu normality. Grafické metódy sú užitočné pri kontrole normality, ale nedokážu poskytnúť presný dôkaz toho, že predpoklad normality platí alebo neplatí. Preto sa vo väčšine prípadov na potvrdenie záveru z grafických metód vyžadujú numerické štatistické testy (Yap a Sim 2011).

Z toho dôvodu sme ako grafický test normality využili kvantil-kvantilový graf (Q-Q diagram) a na potvrdenie tohto grafického testu sme ešte urobili Shapiro Wilkov test, ktorý spadá k jedným s najpoužívanejších testov pre malé výbery ($3 \leq n \leq 50$). Zjednodušene sa dá interpretovať ako test, ktorý je založený na pozorovaní, či body zostrojené Q-Q grafom majú nejakú odchýlku od regresívnej priamky, ktorá je preložená týmito bodmi. Často využívanou hladinou významnosti (α) je $\alpha = 0,05$, teda ak je p-hodnota, ktorú dostaneme z tohto testu, menšia než stanovená hladina tak dostávame dôkaz pre tvrdenie, že dáta nie sú normálne rozložené (Royston 1995; Shapiro a Wilk 1965; Yap a Sim 2011).

5.4.2. Spearmanov korelačný koeficient

Na základe testu normality, z ktorého vyšlo, že väčšina premenných nespĺňala predpoklad normality, sme v tejto práci na ďalšiu analýzu dát využili neparametrický test, a to Spearmanov korelačný koeficient (ρ_s). Tento koeficient určuje jednoduchý lineárny vzťah medzi dvomi premennými. Jednoduchá lineárna korelácia znamená, že medzi dvomi premennými A , B existuje vzťah, podľa ktorého zmena jednej z premenných povedie k zmene aj druhej. Existujú dva základné vzťahy medzi premennými a to kladný vzťah, ktorý je predstavovaným hodnotami väčšími ako nula ($\rho_s > 0$) a záporný vzťah, ktorý charakterizujú hodnoty menšie ako nula ($\rho_s < 0$). Kladný vzťah medzi dvomi premennými predstavuje spoločný nárast alebo pokles oboch premenných. Pri zápornom vzťahu medzi premennými dochádza k poklesu jednej premennej s nárastom druhej premennej. Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu sa pohybujú od -1, ktorá predstavuje lineárny záporný vzťah ($\rho_s < 0$), po 1, ktorá ukazuje lineárne kladný vzťah ($\rho_s > 0$). Nula v tomto prípade, ukazuje že medzi premennými neexistuje žiaden vzťah. Spearmanov korelačný koeficient (ρ_s) je definovaný rovnicou, kde d predstavuje rozdiel medzi poradím R_A (poradie premennej A) a R_B (poradie premennej B) a n je počet usporiadaných dvojíc (Ali Abd AlHameed 2022) :

$$\rho_s = 1 - 6\sum d^2 / n(n^2 - 1) \quad (6)$$

Pomocou Spearmanovho testu nebol zistený len korelačný koeficient, ktorý slúži na odhady miery vzťahu, ale bola zistená aj p-hodnota, ktorá predstavuje významnosť korelácie. Bežné prahové hodnoty významnosti sú 0,05 alebo 0,01. P-hodnota 0,01 je oproti bežne používanej hodnote 0,05, silne štatisticky významná. P-hodnota 0,01 znamená silný dôkaz reálneho vplyvu než len náhodnej odchýlky. Ak je p-hodnota menšia, alebo rovná hladine významnosti je štatisticky významná. Na druhej strane ak je p-hodnota vyššia ako hladina významnosti, to naznačuje, že nie je štatisticky významná (Bevans 2020).

5.4.3. Klasifikácia snehového sucha podľa Dierauer, Allen a Whitfield (2019)

Ako už bolo opísané v kapitole 3.3, klasifikácia snehového sucha podľa (Dierauer, Allen a Whitfield 2019) je založená na porovnaní maximálnej vodnej hodnoty snehu (SWE), úhrnu zimných zrážok (P) a teplôt topenia (thawing degrees, TD) za dané chladné obdobie s ich dlhodobými priemermi.

Rozhodujúce kritéria klasifikácie podľa (Dierauer, Allen, a Whitfield 2019) sú:

- $SWE_{max} < \text{dlhodobý priemer} \ \& \ \text{suma úhrn zrážok za chladné obdobie} < \text{dlhodobý priemer} \ \& \ \text{suma stupeň topenia} < \text{dlhodobý priemer} = \text{suché snehové sucho}$
- $SWE_{max} < \text{dlhodobý priemer} \ \& \ \text{suma úhrn zrážok za chladné obdobie} > \text{dlhodobý priemer} = \text{teplé snehové sucho}$
- $SWE_{max} < \text{dlhodobý priemer} \ \& \ \text{suma úhrn zrážok za chladné obdobie} < \text{dlhodobý priemer} \ \& \ \text{suma stupeň topenia} > \text{dlhodobý priemer} = \text{teplé suché snehové sucho}$

6. Výsledky

6.1. Zhodnotenie pozorovaných zím

Na stanici **Modrava** sa priemerná mesačná teplota za pozorované chladné obdobia pohybovala od $-0,9^{\circ}\text{C}$, za chladné obdobie 2016-2017, do $1,35^{\circ}\text{C}$, ktorá sa vyskytla za rok 2023-2024. Suma zrážok počas všetkých pozorovaných rokov výrazne kolísala od najnižšej hodnoty 432,6 mm, ktorá bola zaznamenaná za chladné obdobie 2016-2017, zatiaľ čo najvyššia suma zrážok dosiahla 947,5 mm za chladné obdobie 2021-2022. Merania preukázali výrazné medziročné rozdiely v priemernej výške snehu. Najchudobnejšia zima na sneh bola za chladné obdobie 2019-2020 a to 5,5 cm a najvyššia priemerná hodnota bola 39,7 cm v chladnom období 2017-2018. Hodnoty vodnej hodnoty snehu (SWE) na tejto stanici mali počas pozorovaných chladných období väčšie výpadky a sú k dispozícii len za šesť z deviatich pozorovaných rokov. Najvyššia priemerná vodná hodnota snehu (SWE) bola zaznamenaná 70,58 mm za chladné obdobie 2021-2022 a najnižšia 21,4 mm v chladnej časti roku 2019-2020. V ostatných troch rokoch nie sú hodnoty SWE dostupné.

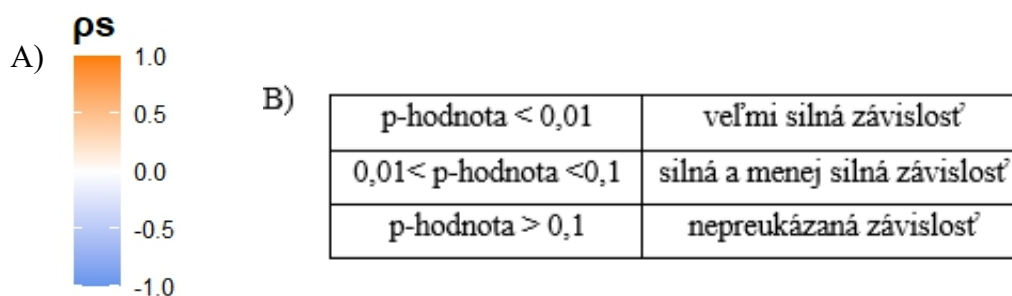
Priemerná mesačná teplota na stanici **Javoří pila** dosahovala hodnoty od $-1,5^{\circ}\text{C}$ (chladné obdobie 2021-2022), do 1°C v chladnom období 2023-2024. Celkové množstvo zrážok dosiahlo maximálnu hodnotu 1286 mm počas chladnej časti roku 2023-2024, minimálne množstvo zrážok bolo v chladnom období 2016-2017 a to 607,6 mm. Priemerné hodnoty prietoku boli najnižšie v chladnej časti roku 2020-2021, s hodnotou $0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ a maximum dosiahol $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ za obdobie 2023-2024. Za chladné obdobia pozorovaných rokov priemerná výška snehu dosiahla v období 2017-2018 maximum s hodnotou 65,6 cm a minimum 8,95 cm v období 2019-2020. Vodná hodnota snehu (SWE) mala maximum 261,2 mm, počas chladného obdobia 2017-2018, minimum bolo zaznamenané v chladnom období 2020-2021, keď dosiahla 33,8 mm. Je dôležité poznamenať, že údaje vodnej hodnoty snehu (SWE) za posledné dve chladné obdobia (2022-2023, 2023-2024) neboli dostupné.

Na stanici **Rokytká** dosiahla priemerná mesačná teplota hodnoty od -1.8°C počas obdobia 2016-2017, ktoré bolo najchladnejšie za pozorované obdobie, až po $0,95^{\circ}\text{C}$ v období 2023-2024. Celková suma zrážok dosiahla najvyššiu hodnotu 1004 mm v chladnom období 2018-2019, zatiaľ čo najnižší úhrn bol 574,8 mm za chladné obdobie 2016-2017. Priemerná výška snehu nadobudla maximum 57,5 cm v chladnej časti roku 2018-2019 a minimum 14,6 cm v období 2019-2020. Hodnoty priemernej vodnej hodnoty snehu (SWE) dosiahli maximum 166,8 mm v chladnej časti roku 2018-2019, pričom minimum 40,3 mm sa vyskytlo v chladnom období 2019-2020. Údaje o SWE za chladné obdobie 2017-2018 neboli zaznamenané. Priemerný prietok dosiahol najnižšiu hodnotu $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$ za chladnú časť roka 2020-2021 a najvyššiu $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ v období 2016-2017. Na tejto stanici chýbali údaje o prietoku za posledné dve chladné obdobia (2022-2023, 2023-2024).

Priemerná teplota na stanici **Ptačí potok** počas sledovaných chladných období sa priemerná mesačná teplota pohybovala od najnižšej hodnoty $-2,2^{\circ}\text{C}$ v chladnom období 2016-2017, až po najvyššiu hodnotu $0,85^{\circ}\text{C}$ za obdobie 2023-2024. Suma zrážok dosiahla maximálnu hodnotu 1169,2 mm v chladnej časti roku 2018-2019, pričom minimum 571,1 mm bolo namerané za obdobie 2016-2017. Najvyššia nameraná primeraná hodnota výšky snehu 81,8 cm sa vyskytla za chladné obdobie 2017-2018 a najnižšia 14 cm v období 2022-2023. Maximum priemernej vodnej hodnoty snehu (SWE) bolo zaznamenaná počas chladného obdobia 2017-2018, keď dosiahlo 260,3 mm, minimum 32 mm sa vyskytlo za obdobie 2022-2023. Priemerné hodnoty prietoku sa pohybovali od $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ v chladnom období 2016-2017 do $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ za obdobie 2023-2024. Na tejto stanici chýbal údaj o prietoku za chladné obdobie 2018-2019.

6.2. Faktory ovplyvňujúce pozorované charakteristiky

Na základe Spearmanovho korelačného koeficientu, ktorý meria silu vzťahu medzi dvomi premennými boli vytvorené „heatmapy“ pre všetky štyri stanice. V obrázkoch je farbami popísaná sila a smer korelácie (ρ_s), odtiene modrej predstavujú $\rho_s < 0$, pre hodnoty najbližšie k -1 je farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $\rho_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je farba najtmavšia. Pre $\rho_s = 0$ odpovedá biela farba (Tabuľka 3, A). Typom písma je znázornená významnosť danej korelácie. Veľmi silnú závislosť (p -hodnota $< 0,01$) predstavuje **tučné písmo**, silná a menej silná závislosť je znázornená *kurzívou* a znakom „*“, nepreukázaná sila závislosti má všeobecný typ písma (p -hodnota $> 0,1$) (Tabuľka 3, B).



Tabuľka 3: A)- sila a smer korelácie (0 < pozitívna, 0 > negatívna) B)- významnosť korelácie

Na stanici **Modrava** (Obrázok 5) výsledky vzťahu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu a snehovými charakteristikami preukázali pri všetkých snehových charakteristikách (počet dní so snehom, priemerná vodná hodnota snehu (SWE), priemerná výška snehu) významnú negatívnu závislosť (p-hodnota < 0,01), teda rastom jednej premennej dochádza k poklesu druhej. Vzťah priemerného mesačného úhrnu zrážok so snehovými charakteristikami prejavoval významný pozitívny vzťah (p-hodnota < 0,01), ak dôjde k nárastu alebo poklesu jednej premennej druhá premenná sa bude pohybovať v rovnakom smere. Najsilnejší vzťah na tejto stanici bol medzi priemernou výškou snehu a priemernou vodnou hodnotou snehu (SWE), ktorý vykazoval silný významný pozitívny vzťah.

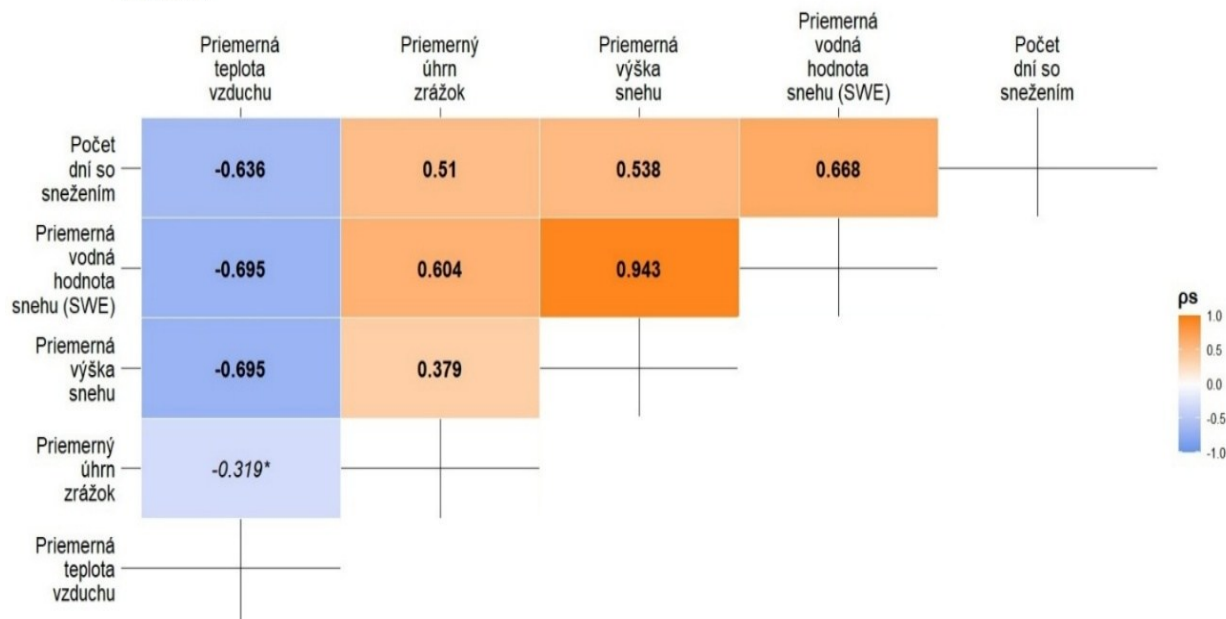
Na stanici **Javoří pila** (Obrázok 6) mal vzťah medzi priemernou teplotou vzduchu a snehovými charakteristikami a priemerným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami v oboch prípadoch stredne silnú koreláciu, teplota a snehové charakteristiky vykazovali negatívnu a úhrn zrážok a snehové charakteristiky pozitívnu. Na tejto stanici bol najsilnejší pozitívny vzťah medzi priemernou výškou snehu a priemernou vodnou hodnotou snehu (SWE). Vplyv priemernej teploty na priemerný odtok preukázal mierny až slabý pozitívny vzťah, ktorý naznačuje, že ak jedna premenná bude stúpať druhá má tendenciu stúpať zároveň s prvou. Vplyv priemerného úhrnu zrážok a priemerného odtoku preukázal slabý negatívny vzťah s nepreukázanou významnosťou. To naznačuje, že existuje určitý dôkaz o negatívnom vzťahu, ale nie je dostatočne silný. Vzťah snehových charakteristík a priemerného odtoku, vykazoval veľmi slabú koreláciu, ktorá mala nepreukázanú významnosť (p-hodnota > 0,1).

Stanica **Ptačí potok** (Obrázok 7) vykazovala tiež významný stredne silný negatívny vzťah (p-hodnota < 0,01) medzi priemernou teplotou a snehovými charakteristikami. Na tejto stanici sa najvýznamnejší pozitívny vzťah vyskytol medzi priemernou výškou snehu a priemernou vodnou hodnotou snehu (SWE). Vzťah priemerného odtoku a snehových charakteristík bol nepreukázaný. Teplota však na tejto stanici mala významný stredne silný vzťah (p-hodnota < 0,01) medzi priemernou teplotou vzduchu a priemerným odtokom, teda so zvyšujúcou sa

teplotou vzduchu dochádzalo k zvyšovaniu odtoku. Vzťah priemerného odtoku a priemerného úhrnu zrážok mal mierne významný negatívny vzťah, to vykazuje, že zvyšovaním zrážok má odtok tendenciu klesať.

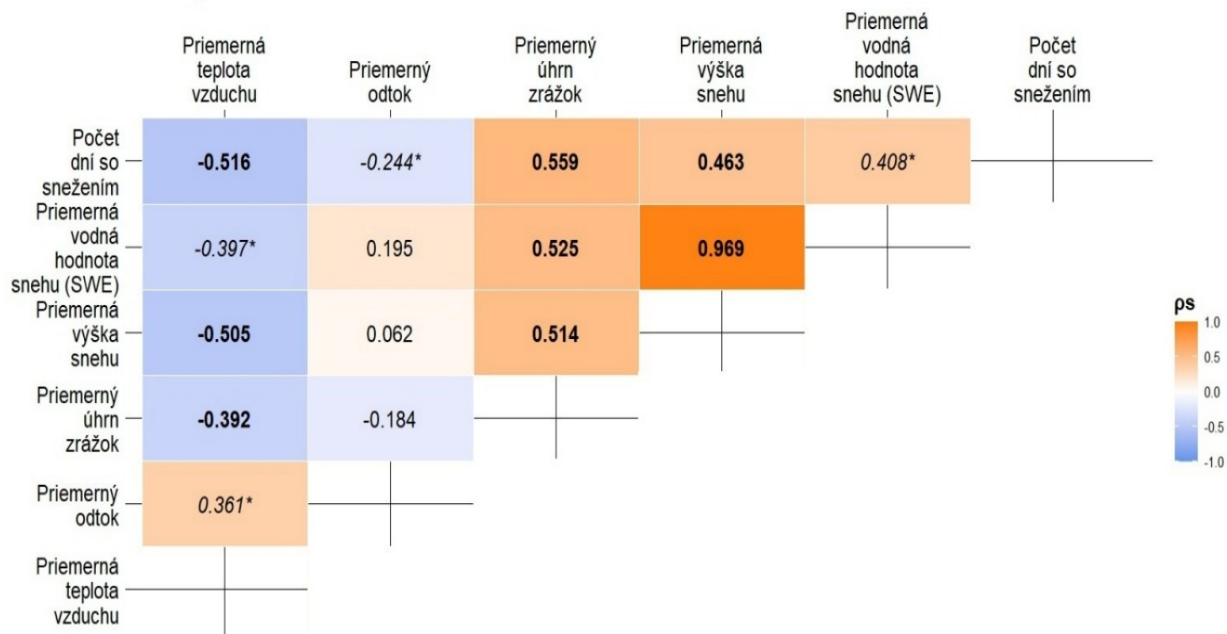
Na stanici **Rokytká** (Obrázok 8) priemerná teplota vzduchu a snehové charakteristiky vykazovali významný stredne silný až silný vzťah. Vzťah priemerného úhrnu zrážok a počtu dní so snežením mal významnú stredne silnú pozitívnu koreláciu vzťah ($p\text{-hodnota} < 0,01$). Zatiaľ čo vzťah priemerného úhrnu zrážok a priemernej výšky snehu a vzťah priemerného úhrnu zrážok a priemernej vodnej hodnoty snehu (SWE) menej významný slabý až stredne silný vzťah ($0,01 < p\text{-hodnota} < 0,1$). Slabý až veľmi slabý vzťah s nepreukázanou významnosťou ($p\text{-hodnota} > 0,1$) bol medzi snehovými charakteristikami charakteristikách (počet dní so snehom, priemerná vodná hodnota snehu (SWE), priemerná výška snehu) a priemerným odtok. Priemerná teplota a priemerný odtok vykazovali stredne slabý pozitívny vzťah ($0,01 < p\text{-hodnota} < 0,1$). Významnosť vzťahu medzi priemerným úhrnom zrážok a priemerným odtok bol nepreukázaný a vykazoval slabú negatívnu koreláciu ($p\text{-hodnota} > 0,1$).

Modrava



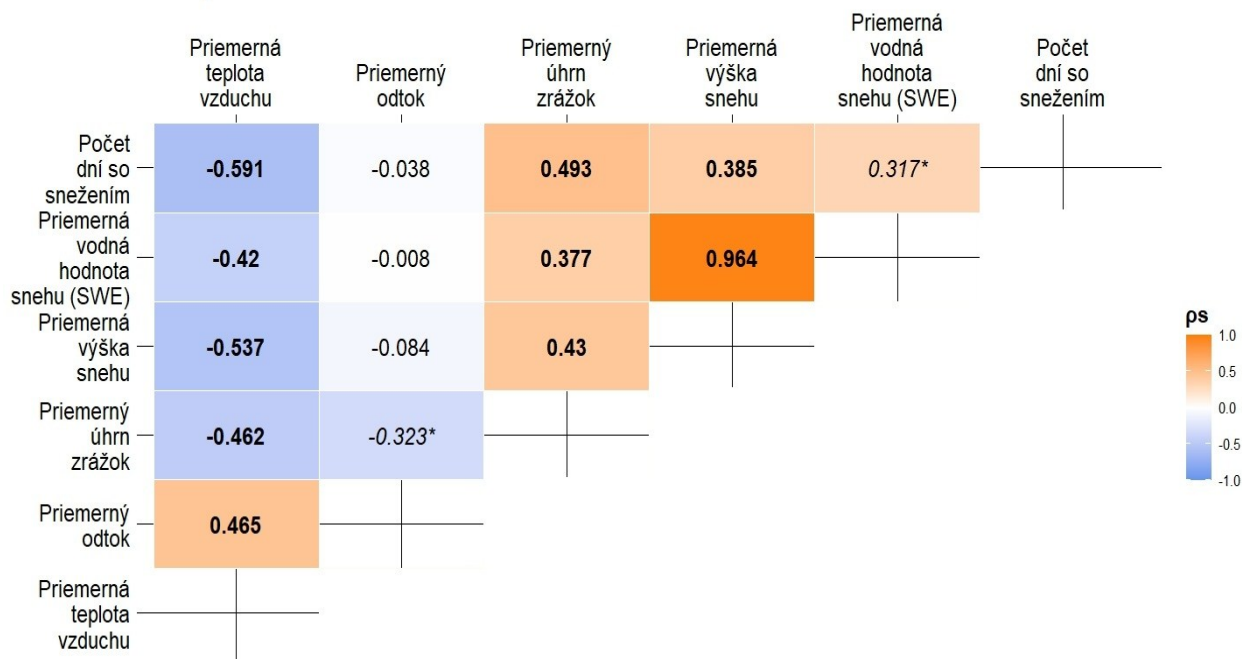
Obrázok 5: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Modrava. Pre $p_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $p_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $p_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: **veľmi silná** (p -hodnota $< 0,01$), **silná a menej silná** ($0,01 < p$ -hodnota $< 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p -hodnota $> 0,1$)

Javoří pila



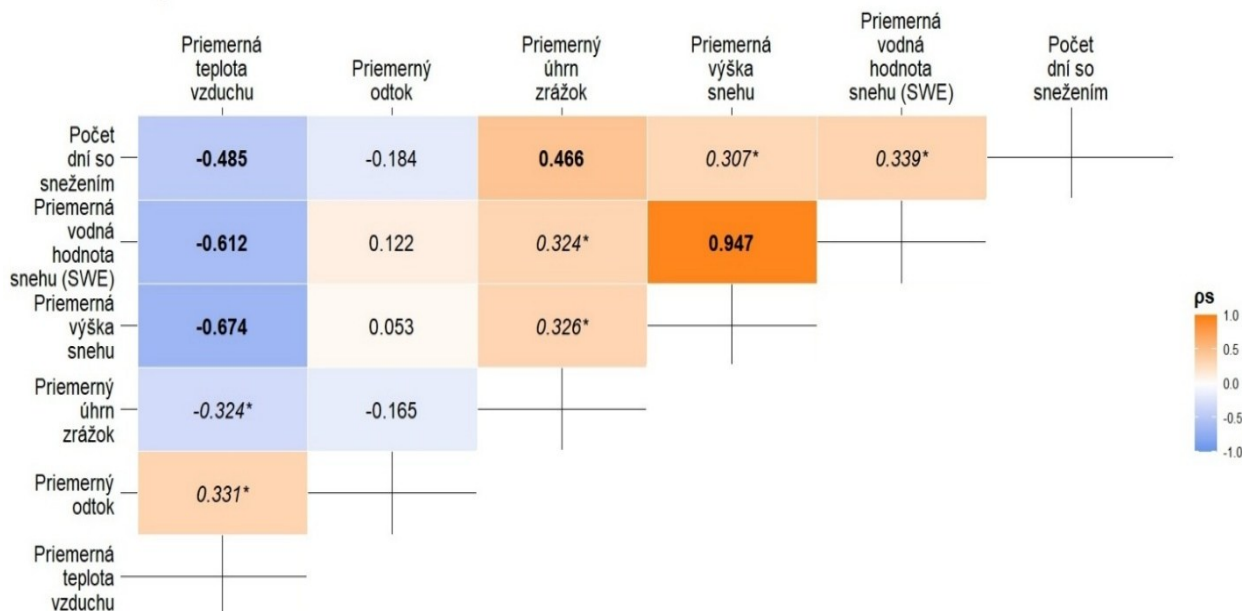
Obrázok 6: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Javoří pila. Pre $p_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $p_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $p_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: **veľmi silná** (p -hodnota $< 0,01$), **silná a menej silná** ($0,01 < p$ -hodnota $< 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p -hodnota $> 0,1$)

Ptačí potok



Obrázok 7: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Ptačí potok. Pre $p_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $p_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $p_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: **veľmi silná** (p -hodnota $< 0,01$), **silná a menej silná** ($0,01 < p$ -hodnota $< 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p -hodnota $> 0,1$)

Rokytky



Obrázok 8: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Rokytky. Pre $p_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $p_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $p_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: **veľmi silná** (p -hodnota $< 0,01$), **silná a menej silná** ($0,01 < p$ -hodnota $< 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p -hodnota $> 0,1$)

6.3. Identifikácia snehového sucha

Vyhodnotené dáta zo všetkých štyroch staníc (Rokytká, Ptačí potok, Modrava, Javoří pila), boli využité na vypočítanie priemeru základných charakteristík potrebných na zhodnotenie snehového sucha podľa (Dierauer, Allen a Whitfield 2019).

Na základe podmienok uvedených vyššie (kap. 5.4.3) bolo na území týchto štyroch staníc vyhodnotené snehové sucho v chladno období roku 2019-2020 a v chladnom období roku 2022-2023. V obidvoch prípadoch išlo o teplé snehové sucho. V ďalších rokoch nebolo snehové sucho preukázané (Tabuľka 4).

	SWE_{max} [cm]	Suma zrážky [mm]	Suma stupeň topenia (TD) [°C]	Typ sucha
Dlhodobý priemer	210,86	517	297,45	
2015-2016	218,25	859,9	344,58	nepreukázané
2016-2017	255	546,4	203,4	nepreukázané
2017-2018	355,25	815,88	312,76	nepreukázané
2018-2019	360	1017,53	291,44	nepreukázané
2019-2020	158	868,18	329,94	teplé
2020-2021	221	640,95	179,93	nepreukázané
2021-2022	307,8	924,6	169,92	nepreukázané
2022-2023	150	702,23	237,17	teplé
2023-2024	246,03	915,2	404,51	nepreukázané

Tabuľka 4. Klasifikácia pozorovaných chladných období z hľadiska výskytu snehového sucha podľa Dierauer, Allen a Whitfield 2019

7. Diskusia

7.1. Diskusia použitých dát a metód

7.1.1. Vstupné dáta

Na spracovanie praktickej časti boli vyžité dáta merané v desaťminútovom intervale, ale pre potreby tejto práce boli agregované do hodinových hodnôt. Avšak pri úhrne zrážok sa využívali aj dáta, ktoré mali len denný zber dát, a to za obdobie 1.11.2015 – 31.10.2022 zo všetkých štyroch staníc. Táto forma dát bol využitá, z dôvodu chybného hodinového merania dát úhrnu zrážok na všetkých staniciach počas uvedeného obdobia.

Jeden z hlavných problémov pri zapracovaní poskytnutých dát boli výpadky v meraní, spôsobené či už prírodnými podmienkami alebo poruchami meracích prístrojov. Tie výpadky mali rôzne trvanie, od pár hodín alebo dní až po výpadky v celom zimnom období. Takéto dlhotrvajúce výpadky výrazne ovplyvnia konečné výsledky analýzy.

Na stanici **Rokytká** došlo k najväčším výpadkom merania teploty za obdobie 2021-04. Pri výške snehu boli výpadky zaznamenané za celé obdobie 2016-11. Pri prietoku to boli výpadky za celé obdobia 2017-01, 2019-10 a 2021-04. Najdlhší výpadok bez prerušenia bol v meraní vodnej hodnoty snehu (SWE) za obdobie 2018-01 až po začiatok 2018-04.

Pri stanici **Ptačí potok** neboli až také závažné výpadky v meraných charakteristikách. Dáta o teplote na tejto stanici boli však zlúčené z dvoch meracích prístrojov na tejto stanici, keďže jeden z prístrojov vykazoval nepresnosti spôsobené menším radiačným krytom. Teplota napriek tomu mala menšie výpadky a to za obdobie od polovice 2021-03 do 2021-04 a od konca 2021-10 do 2021-11. Krátkodobý výpadok nastal aj pri meraní prietoku a to počas celého obdobia 2019-04.

Na stanici **Modrava** došlo ku krátkodobým výpadkom merania všetkých premenných. Pri teplote sa vyskytlo mnoho menším výpadkov merania, najdlhší bol od polovice 2023-02 do 2023-04. Pri výške snehu išlo prevažne o krátkodobé výpadky a to od polovice do konca 2017-04 a na konci 2023-12. Najdlhšie výpadky sa vyskytli pri meraní vodnej hodnoty snehu (SWE). Vyskytlo sa mnoho krátkodobých, ako za celý mesiac 2016-02, 2023-12 a od polovice do konca 2017-04, ale aj dlhodobé od konca 2018-12 po začiatok 2019-04 a od konca 2018-01 po začiatok 2018-04. Tieto výpadky mali veľký vplyv na konečné zhodnotenie pozorovaného obdobia.

Stanica **Javoří pila** mala podobne ako ostatné mnoho krátkodobých výpadkov, napr. výpadok teploty za celý mesiac 2020-11 a výpadok pri merní prietoku od 2020-02 po začiatok 2020-03. Okrem toho tu nastali aj významné dlhodobé výpadky v meraní vodnej hodnoty snehu (SWE) a to za celé zimné obdobia od 2022-11 po 2023-04 a od 2023-11 po 2024-4. Treba ešte podotknúť, že na tejto stanici bol prietok meraný až od 2016-10.

Ako riešenie krátkodobých výpadkov, by mohla byť extrapolácia na základe trendov. Táto metóda umožňuje predpovedať priebeh daného javu na základe jeho doterajšieho vývoja. Ďalším riešením by mohla byť tiež priestorová interpolácia, pri ktorej dochádza k odhade daných chýbajúci údajov pomocou dát dostupných z okolitých meracích staníc. Pri dlhodobých výpadkoch, ktoré trvali celé chladné pozorované obdobie, by však za využitia týchto dát mohlo dôjsť ku zakresleniu koncových výsledkov. Jedným z dôvodov prečo tieto metódy neboli využité v tejto práci, bolo krátke pozorované obdobie.

7.1.2. Pozorované charakteristiky

Priemerné hodnoty daných charakteristík (teplota, úhrn zrážok, SWE, výška snehu, prietok), boli vypočítané ako priemery za jednotlivé mesiace daného chladného obdobia.

Počet dní so snežením bol vypočítaný na základe (Blahušiaková et al. 2020). Keďže dáta zväčša neobsahujú informáciu o forme v akej zrážky padli (kvapalné či pevné), na výpočet sa použila hraničná teplota vzduchu 1°C. Dni so snežením sú tie, ktoré spĺňajú priemernú dennú teplotu pod 1°C a priemerný denný úhrn zrážok väčší ako 0 mm.

Maximálna vodná hodnota snehu (SWE_{max}) označuje najvyššiu nameranú vodnú hodnotu snehu (SWE) za dané chladné obdobie, bez ohľadu na to kedy bola zaznamenaná.

7.1.3. Využité metódy

Na vyhodnotenie snehového sucha bola využitá klasifikácia podľa (Dierauer, Allen a Whitfield 2019), ktorá využíva na zhodnotenie sucha maximálnu vodnú hodnotu snehu (SWE_{max}) a nie vodnú hodnotu snehu ku dňu 1.4., ktorá sa využíva v klasifikácii podľa (Harpold, Rajagopal a Dettinger 2017) (viz kap. 3.3). Klasifikácia podľa (Dierauer, Allen a Whitfield 2019) bola uprednostnená z dôvodu častejších výpadkov dát o vodnej hodnote snehu ku dňu 1.4..

Na vyhodnotenie vzťahov medzi premennými sa mohlo využiť viacero metód ako Spearmanov korelačný koeficient alebo Pearsonov korelačný koeficient. Pri výbere metódy bol rozhodujúci test normality, pričom Pearsonov korelačný koeficient vyžaduje predpoklad normálneho rozdelenia oboch pozorovaných premenných zatiaľ čo Spearmanov korelačný koeficient je

neparametrická metóda a nevyžaduje normálne rozdelenie dát. Na základe testov normality, z ktorého vyšlo, že väčšina premenných nespĺňala test normality, bol nakoniec k analýze sily vzťahov medzi pozorovanými premennými využitý Spearmanov korelačný koeficient. Táto metóda sa využívala aj v iných štúdiách, ktoré skúmali vzťah medzi klimatickými a snehovými charakteristikami, ako v štúdií od (Maskey, Uhlenbroo, a Ojha 2011).

7.2. Diskusia výsledkov

Táto práca sa zaoberala relatívne krátkym obdobím, ktoré činilo len deväť rokov. Súčasne došlo k mnoho chybám v zaznamenávaní údajov, ktoré toto obdobie v niektorých prípadoch ešte viac skrátili. Pri analýze bol využitý už spomínaný Spearmanov korelačný koeficient, ktorý môže byť pri práci s menším množstvom hodnôt menej spoľahlivý. Na celkový výsledok môžu navyše vplývať anomálne hodnoty, ktoré pri takomto malom výbere majú zásadný vplyv na koncový výsledok.

Z výsledkov vplyvu priemernej mesačnej teploty na snehové charakteristiky bol zistený stredne silný negatívny vzťah medzi premennými. Tento vzťah naznačuje, že so zvyšujúcou sa teplotou majú dni so snežením, výška snehu a vodná hodnota snehu (SWE) tendenciu ubúdať. Avšak, aj keď je tento vzťah preukázaný, jeho stredná hodnota poukazuje na možnosť vplyvu aj iných faktorov než teploty.

Výsledky analýzy vplyvu úhrnu zrážok na snehové charakteristiky preukázali stredne silný pozitívny vzťah medzi premennými. S narastajúcim úhrnom zrážok majú snehové charakteristiky tendenciu sa zvyšovať. Tento vzťah však poukazuje na to, že úhrn zrážok nie je jediným faktorom, ktorý ovplyvňuje snehové charakteristiky.

Výsledky vplyvu teploty vzduchu a úhrnu zrážok nepreukázali jednoznačnú dominantnú premennú vplývajúcu na snehové charakteristiky. Tento nejednoznačný výsledok môže byť ovplyvnený už spomínaným výpadkom dát. Napriek tomu, tieto výsledky poukazujú na všeobecný vzťah medzi pozorovanými charakteristikami.

Bolo tiež vyhodnotené, ako klimatické a snehové charakteristiky ovplyvňovali celkový odtok počas pozorovaného chladného obdobia. Výsledky preukázali, že najvýznamnejší vplyv na odtok mala teplota vzduchu. Medzi teplotou a odtokom bol preukázaný stredne silný pozitívny vzťah. So zvyšujúcou sa teplotou v chladnej časti roku dochádza k postupnému nárastu prietoku. Na druhej strane vzťah medzi priemerným odtokom a priemernou výškou snehu nebol preukázaný ako štatisticky významný. To naznačuje, že samotná výška snehu nemala pravdepodobne výraznú úlohu pri určovaní veľkosti prietoku v pozorovaných chladných

obdobíach. Pri vzťahu s vodnou hodnotou snehu (SWE) bol preukázaný len veľmi slabý pozitívny vzťah, čo naznačuje, že pri zvýšení vodnej hodnoty snehu (SWE) je len mierna tendencia zvýšenia prietoku. Vzťah úhrnu zrážok a prietoku preukázal len slabý negatívny korelačný koeficient, čo naznačuje, že zvyšujúce sa zrážky v chladnom období by mohli byť spojené so znižovaním prietoku. Jedným z hlavných faktor ovplyvňujúcich tento vzťah môže byť forma zrážok. V chladnom období zrážky prevažne padajú vo forme snehu, ktorý sa okamžite neprejaví na prietoku, ale akumuluje sa na povrchu a vytvára snehovú pokrývku, čo by sa teda dalo popísať ako dočasný negatívny vzťah.

Vyhodnotenie výskytu snehového sucha na základe klasifikácie podľa (Dierauer, Allen a Whitfield 2019), preukázalo výskyt snehového sucha len v dvoch chladných obdobia za celé pozorované obdobie. Hodnotenie snehového sucha sa robili za celé územie a vychádzalo zo spriemerovaných hodnôt všetkých staníc. V chladnom období 2020-2021 bolo identifikované teplé snehové sucho. Pri tomto type sucha sa však nezohľadňuje teplota, hoci v tomto období bola suma stupňov topenia výrazne vyššia ako dlhodobý priemer. Tento údaj však naznačuje zvýšené teploty v tomto období, ktoré pravdepodobne mali vplyv na rýchlejšie topenie snehu alebo formu zrážok, ktoré padali. Druhý výskyt snehového sucha bol zaznamenaný za chladné obdobie 2023-2024. Rovnako ako v prvom prípade sa jednalo o teplé snehové sucho. Pre toto chladné obdobie boli však do priemeru zahrnuté len tri stanice, z dôvodu chýbajúcich dát o vodnej hodnote snehu (SWE) na stanici Javoří pila. Hodnota sumy stupňov topenie (thawing degree, TD) bola za toto chladné obdobie nižšia než priemer, čo bolo pravdepodobne spôsobené veľkým výpadkom dát o teplote na stanici Modrava. Absencie týchto dát mohla ovplyvniť presnosť vyhodnotenia dát.

Pri zhodnotení snehového sucha na jednotlivých staniciach došlo k vyššiemu počtu prípadov snehového sucha. Pri stanici **Modrava** sa vyskytovalo snehové sucho počas šiestich chladných období z deviatich. Pričom minimálne dva tieto výskyty by mohli byť odôvodnené chýbajúcimi dátami o vodnej hodnote snehu (SWE). Ostatné výskyty snehového sucha boli klasifikované ako teplé snehové sucho.

Na stanici **Javoří pila** sa vyskytlo snehové sucho len v chladnom období 2019-2020, bolo klasifikované ako teplé snehové sucho. V ostatných rokoch nebolo preukázané, aj keď podľa zhodnotenia ostatných staníc by bolo predpokladané, že sa teplé snehové sucho vyskytne v chladnom období 2022-2023, nemožno tento predpoklad potvrdiť lebo v tomto období chýbajú dáta o vodnej hodnote snehu.

Stanica **Ptačí potok** mala preukázané len jedno snehové sucho v chladnom období 2022-2023, klasifikované ako teplé snehové sucho.

Na stanici **Rokytká** sa snehové sucho vyskytlo za tri chladné obdobia a to 2015-2016, 2019-2020 a 2022-2023, pričom všetky boli taktiež klasifikované ako teplé snehové sucho.

Zo zhodnotení snehového sucha na jednotlivých staniciach vyplynulo, že za niektoré chladné obdobia sa vyskytlo viacero prípadov snehového sucha, zatiaľ čo počas iných nebolo možné snehové sucho odhaliť. Mnohé z týchto prípadov však vznikli len v dôsledku chýbajúcich dát vodnej hodnoty snehu (SWE). Z toho dôvodu sa rozhodlo, že sa zhodnotenie snehového sucha za pozorované obdobie v tejto práci vykonala za celé územie namiesto jednotlivých staníc, aby sa predišlo rozsiahlejším nepresným zhodnoteniam.

Na všetkých staniciach bola počas viacerých chladných období zaznamenaná vyššia suma stupňov topenia (thawing degree, TD) než je dlhodobý priemer. Toto zistenie naznačuje postupné zvyšovanie teplôt počas chladných období. Za chladné obdobie 2023-2024 je zaznamenané na území týchto štyroch pozorovaných staníc až dvojnásobné zvýšenie hodnoty sumy stupňov topenia (thawing degree, TD) oproti dlhodobému priemeru (Tabuľka 4). To sa zhoduje s poznatkami nadobudnutými v rešeršnej časti tejto práce, týkajúcich sa úlohy globálneho otepľovania a následnej zvyšujúcej sa teploty vzduchu ako hlavný iniciátor zmien v úbytku snehovej pokrývky.

8. Záver

Prvým cieľom bakalárskej práce bolo zhodnotenie súčasného stavu výskumu týkajúceho sa snehového sucha. Rešeršná časť práce bola zameraná na definovanie pojmu snehové sucho a jeho klasifikovanie na základe rôznych štúdií. Z nich boli následne identifikované tri typy snehového sucha, spolu s ich rôznymi príčinami vzniku a následnými dopadmi.

Druhá časť práce sa sústredila na analýzu poskytnutých dát klimatických a snehových charakteristík a zimného a jarného odtoku. Na analýzu bol využitý Spearmanov korelačný koeficient, ktorého výsledky poskytli informácie o vzťahu medzi pozorovanými charakteristikami. Pri vzťahu snehových charakteristík a teploty vzduchu a úhrnu zrážok nebol preukázaný dominantný fakt, ktorý by na dané snehové charakteristiky vplýval. Bol však preukázaný všeobecný vzťah medzi nimi. Naopak ako hlavný faktor ovplyvňujúci jarný a zimný odtok sa jednoznačne preukázala byť teplota vzduchu.

Na základe vyhodnotenia a následnej klasifikácie daných zím sa potvrdil výskyt snehového sucha na danom území počas dvoch chladných období a to 2019-2020 a 2022-2023. V oboch prípadoch bolo charakterizované ako teplé snehové sucho.

V analytickej časti boli zodpovedané obe výskumné otázky. Potvrdil sa výskyt snehového sucha aj na území Českej republiky a zároveň bolo poukázané na vplyv variability klimatických podmienok na jarný a zimný odtok.

Vzhľadom k predpokladanému vývoju klimatických podmienok, môže dôjsť v budúcnosti k zvýšenému riziku výskytu snehového sucha hlavne v chladných klimatických oblastiach. Preto rozšírenie poznatkov o fungovaní a interakcii snehovej pokrývky s rôznymi klimatickými faktormi je dôležité na správne pochopenie ich rôznych dopadov. Tie môžu mať následne významný vplyv na odtokové pomery a následne ovplyvniť dostupnosť vody v regióne.

Preto je dôležitá analýza predchádzajúcich prípadov výskytu snehového sucha za účelom predikovania a následného zvládnutia podobných situácií v budúcnosti.

9. Zdroje

9.1. Literatura

- Ali Abd AlHameed, Khawla. 2022. "Spearman's Correlation Coefficient in Statistical Analysis". *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications* 13 (1).
- Armstrong, Richard L., Eric Brun. 2010. *Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Barnett, T. P., J. C. Adam, D. P. Lettenmaier. 2005. "Potential Impacts of a Warming Climate on Water Availability in Snow-Dominated Regions". *Nature* 438 (7066): 303–9.
- Bevans, Rebecca. 2020. "Understanding P Values | Definition and Examples". Scribbr. 16. júl 2020. <https://www.scribbr.com/statistics/p-value/>.
- Blahušiaková, Andrea, Matoušková, Milada, Jeníček, Michal, Ledvinka, Ondřej, Kliment, Zdeněk, Podolinská, Jana, Zora Snopková. 2020. "Snow and climate trends and their impact on seasonal runoff and hydrological drought types in selected mountain catchments in Central Europe". *Hydrological Sciences Journal* 65 (12): 2083–96.
- Cohen, Judah, Hengchun Ye, Justin Jones. 2015. "Trends and Variability in Rain-on-Snow Events". *Geophysical Research Letters* 42 (17): 7115–22.
- Česká geologická společnost. 2017a. "Geovědní mapy 1 : 500 000". 2017a. <https://mapy.geology.cz/geocr500/#>. (cit. 16.4. 2025)
- Česká geologická společnost. 2017b. "Půdní mapa 1 : 50 000". 2017b. <https://mapy.geology.cz/pudy/#>. (cit. 16.4. 2025)
- DeWalle, David R., Albert Rango. 2008. *Principles of Snow Hydrology*. Cambridge, UK New York: Cambridge University Press.
- Dierauer, Jennifer R., Diana M. Allen, Paul H. Whitfield. 2019. "Snow Drought Risk and Susceptibility in the Western United States and Southwestern Canada". *Water Resources Research* 55 (4): 3076–91.
- Doesken, Nolan J., Arthur Judson. 1997. *The snow booklet: a guide to the science, climatology, and measurement of snow in the United States*. 2nd ed. Fort Collins, CO: Colorado Climate Center, Dept. of Atmospheric Science, Colorado State University.
- Edwards, Anthony C., Riccardo Scalenghe, Michele Freppaz. 2007. "Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: A review". *Quaternary International, The Soil Record of Quaternary Climate Change*, 162–163 (marec):172–81.

- Fang, Yilin, L. Ruby Leung. 2023. “Northern Hemisphere Snow Drought in Earth System Model Simulations and ERA5-Land Data in 1980–2014”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 128 (23): e2023JD039308.
- Gottlieb, Alexander R., Justin S. Mankin. 2022. “Observing, Measuring, and Assessing the Consequences of Snow Drought”, apríl.
- Hammond, John, Annie Putman, Theodore Barnhart, Graham Sexstone, Gregory McCabe, David Wolock, Aaron Heldmyer, Stephanie Kampf. 2024. “Streamflow timing and magnitude during snow drought depend on snow drought type and regional hydroclimate”. *Hydrological Sciences Journal* 69 (13): 1702–16..
- Han, Juntai, Yuting Yang, Yuhan Guo, Changming Li, Ziwei Liu, Zhuoyi Tu, Haiyang Xi. 2025. “Changes in Snow Drought and the Impacts on Streamflow Across Northern Catchments”. *Water Resources Research* 61 (1): e2024WR037492.
- Harpold, Adrian, Seshadri Rajagopal, Michael Dettinger. 2017. “Defining Snow Drought and Why It Matters”. *Eos*. 28. február 2017. <http://eos.org/opinions/defining-snow-drought-and-why-it-matters>.
- Holko, Ladislav, Liudmyla Gorbachova, Zdeněk Kostka. 2011. “Snow Hydrology in Central Europe”. *Geography Compass* 5 (4): 200–218.
- Huang, Yinlong, Yangdi Jiang, Bei Jiang, Ryan T. Bailey, Badrul Masud, Brian Smerdon, Monireh Faramarzi. 2024. “Modelling impacts of climate change on snow drought, groundwater drought, and their feedback mechanism in a snow-dominated watershed in western Canada”. *Journal of Hydrology* 636 (jún):131342.
- Huning, Laurie S., Amir AghaKouchak. 2018. “Mountain snowpack response to different levels of warming”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (43): 10932–37.
- Irannezhad, Masoud, Anna-Kaisa Ronkanen, Arash Malekian. 2022. “Editorial: Climate Impacts on Snowpack Dynamics”. *Frontiers in Earth Science* 10 (august).
- Jenicek, Michal, Jan Hnilica, Ondrej Nedelcev, Vaclav Sipek. 2021. “Future changes in snowpack will impact seasonal runoff and low flows in Czechia”. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 37 (október):100899.
- Jenicek, Michal, Ondrej Ledvinka. 2020. “Importance of Snowmelt Contribution to Seasonal Runoff and Summer Low Flows in Czechia”. *Hydrology and Earth System Sciences* 24 (7): 3475–91.

- Li, Dongyue, Melissa L. Wrzesien, Michael Durand, Jennifer Adam, Dennis P. Lettenmaier. 2017. “How Much Runoff Originates as Snow in the Western United States, and How Will That Change in the Future?” *Geophysical Research Letters* 44 (12): 6163–72.
- Liston, Glen E., Matthew Sturm. 1998. “A Snow-Transport Model for Complex Terrain”. *Journal of Glaciology* 44 (148): 498–516.
- López-Moreno, Juan I., Manfred Stähli. 2008. “Statistical analysis of the snow cover variability in a subalpine watershed: Assessing the role of topography and forest interactions”. *Journal of Hydrology* 348 (3): 379–94.
- Lv, Zhibang, John W. Pomeroy. 2019. “Detecting intercepted snow on mountain needleleaf forest canopies using satellite remote sensing”. *Remote Sensing of Environment* 231 (september):111222.
- Maskey, Shreedhar, Stefan Uhlenbrook, Sunal Ojha. 2011. “An Analysis of Snow Cover Changes in the Himalayan Region Using MODIS Snow Products and In-Situ Temperature Data”. *Climatic Change* 108 (1): 391–400.
- Milly, P. C. D., K. A. Dunne. 2020. “Colorado River flow dwindles as warming-driven loss of reflective snow energizes evaporation”. *Science* 367 (6483): 1252–55.
- Mott, Rebecca, Vincent Vionnet, Thomas Grünwald. 2018. “The Seasonal Snow Cover Dynamics: Review on Wind-Driven Coupling Processes”. *Frontiers in Earth Science* 6 (december).
- Nedelcev, Ondrej, Michal Jenicek. 2021. “Trends in seasonal snowpack and their relation to climate variables in mountain catchments in Czechia”. *Hydrological Sciences Journal* 66 (16): 2340–56.
- “NP Šumava”. 2025. Národní park Šumava. 2025. <https://www.npsumava.cz/priroda/prirodnipomery/>.
- Pierce, David W., Daniel R. Cayan. 2013. “The Uneven Response of Different Snow Measures to Human-Induced Climate Warming”, jún.
- Royston, Patrick. 1995. “Remark AS R94: A Remark on Algorithm AS 181: The W-test for Normality”. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 44 (4): 547–51.
- Safari, Hadi, Montaseri ,Majid, Somayeh and Hejabi. 2024. “Spatiotemporal changes in snow cover and their relationship with drought events in the Lake Urmia basin”. *Hydrological Sciences Journal* 69 (1): 46–62.
- Saydi, Muattar, Jian-li Ding. 2020. “Impacts of topographic factors on regional snow cover characteristics”. *Water Science and Engineering* 13 (3): 171–80.

- Seibert, Jan, Michal Jenicek, Matthias Huss, Tracy Ewen. 2015. "Chapter 4 - Snow and Ice in the Hydrosphere". V *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, zostavil John F. Shroder, Wilfried Haeberli, a Colin Whiteman, 99–137. Hazards and Disasters Series. Boston: Academic Press.
- Shapiro, S. S., M. B. Wilk. 1965. "An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)". *Biometrika* 52 (3/4): 591–611.
- Singh, Pratah, Vijay Pratap Singh. 2001. *Snow and Glacier Hydrology*. Water Science and Technology Library 37. Dordrecht Boston London: Kluwer academic.
- Tolasz, Radim, Tat'ána Míková, Anna Valeriánová, Vít Vozenílek, Rudolf Brázdil, Otto Bulír, Petr Dobrovolný, Martin Dubrovský, Lenka Hájková, Zuzana Bastýrová, ed. 2007. *Atlas podnebí Česka: = Climate atlas of Czechia*. Praha: Český Hydrometeorolog. Ústav.
- Trizna, Milan. 2004. *Klimageografia a hydrogeografia*. 1st vyd. Bratislava: Geo-grafika.
- Van Loon, Anne F. 2015. "Hydrological Drought Explained". *WIREs Water* 2 (4): 359–92.
- Wang, Zhixia, Shengzhi Huang, Vijay P. Singh, Zhenxia Mu, Guoyong Leng, Ji Li, Weili Duan, et al. 2024. "Contrasting characteristics and drivers of dry and warm snow droughts in China's largest inland river basin". *Journal of Hydrology: Regional Studies* 53 (jún):101751.
- Yap, B. W., C. H. Sim. 2011. "Comparisons of various types of normality tests". *Journal of Statistical Computation and Simulation* 81 (12): 2141–55.
- Yeşilköy, Serhan, Özlem Baydaroğlu, Ibrahim Demir. 2024. "Is snow drought a messenger for the upcoming severe drought period? A case study in the Upper Mississippi River Basin". *Atmospheric Research* 309 (október):107553.

9.2. Dátové zdroje

ARCDATA PRAHA, ZÚ, ČSÚ (2025): ArcČR 500 – digitální geografická databáze, verzia 4.0, <https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-4-0> (cit. 12.3. 2025).

ČHMÚ: Český hydrometeorologický ústav, Ministerstvo životního prostředí.

VÚV TGM (2025): Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD) – digitální geografická databáze, www.dibavod.cz (cit. 12.3. 2025).

9.3. Zoznam obrázkov a tabuliek

Obrázok 1: Zaujmové územie - Národný park Šumava	21
Obrázok 2:: Priemerná mesačná teplota vzduchu (červená línia) a mesačný úhrn zrážok (modrý stĺpec) za hydrologické roky 2016-2024 (zdroj dát: experimentálne povodia PŘF UK, vlastná tvorba)	23
Obrázok 3: Priemerná mesačná vodná hodnota snehu (SWE) (svetlo modrý stĺpec) a priemerná výška snehu (tmavo modrý stĺpec) za hydrologické roky 2016-2024 (zdroj dát: experimentálne povodia PŘF UK, vlastná tvorba)	24
Obrázok 4: Priemerný mesačný prietok pre Rokytka (zelená línia) za hydrologické obdobie 2016-2024, Ptačí potok (červená línia) za hydrologické roky 2016-2024 a Javoří pila (modrá línia) za hydrologické roky 2017-2024 (zdroj dát: experimentálne povodia PŘF UK, vlastná tvorba)	24
Obrázok 5: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Modrava. Pre $\rho_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $\rho_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $\rho_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: veľmi silná (p-hodnota $< 0,01$), silná a menej silná ($0,01 < \text{p-hodnota} < 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p-hodnota $> 0,1$)	32
Obrázok 6: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Javoří pila. Pre $\rho_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $\rho_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $\rho_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: veľmi silná (p-hodnota $< 0,01$), silná a menej silná ($0,01 < \text{p-hodnota} < 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p-hodnota $> 0,1$)	32
Obrázok 7: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Ptačí potok. Pre $\rho_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $\rho_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $\rho_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: veľmi silná (p-hodnota $< 0,01$), silná a menej silná ($0,01 < \text{p-hodnota} < 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p-hodnota $> 0,1$)	33

Obrázok 8: Hodnoty Spearmanovho korelačného koeficientu medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu, priemerným mesačným úhrnom zrážok a snehovými charakteristikami na stanici Rokytka. Pre $\rho_s < 0$ odpovedajú odtiene modrej farby, pre hodnoty najbližšie k -1 je modrá farba najtmavšia, odtiene oranžovej odpovedajú $\rho_s > 0$, pre hodnoty najbližšie k 1 je oranžová farba najtmavšia. Pre $\rho_s = 0$ odpovedá biela farba. Významnosť korelácie predstavuje: **veľmi silná** (p-hodnota $< 0,01$), silná a menej silná ($0,01 < \text{p-hodnota} < 0,1$) zobrazená znakom „*“, nepreukázaná (p-hodnota $> 0,1$) 33

<i>Tabuľka 1: Porovnanie suchého a teplého snehového sucha podľa (Harpold, Rajagopal, a Dettinger 2017)</i>	16
Tabuľka 2: Pozorované charakteristiky	26
Tabuľka 3: A)- sila a smer korelácie ($0 < \text{pozitívna}$, $0 > \text{negatívna}$) B)- významnosť korelácie	30
Tabuľka 4. Klasifikácia pozorovaných chladných období z hľadiska výskytu snehového sucha podľa Dierauer, Allen a Whitfield 2019	34